

669.01

M 54

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

2

669.01
М54

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

2

КОНСТРУКЦИЯ И РАБОТА ПЕЧЕЙ

Под научной редакцией
проф. д-кт. техн. наук *В. А. Криандина*

Допущено Министерством высшего и среднего
специального образования СССР в качестве
учебника для студентов металлургических специальностей
высших учебных заведений



МОСКВА «МЕТАЛЛУРГИЯ», 1986

УДК 669.04 (075.8)

М54
В. А. КРИВАНДИН, И. Н. НЕВЕДОМСКАЯ, В. В. КОБАХИДЗЕ,
В. В. БЕЛОУСОВ, А. В. ЕГОРОВ, В. А. КРУЖКОВ,
Ю. П. ФИЛИМОНОВ, Р. ШТЕЙНГАРДТ

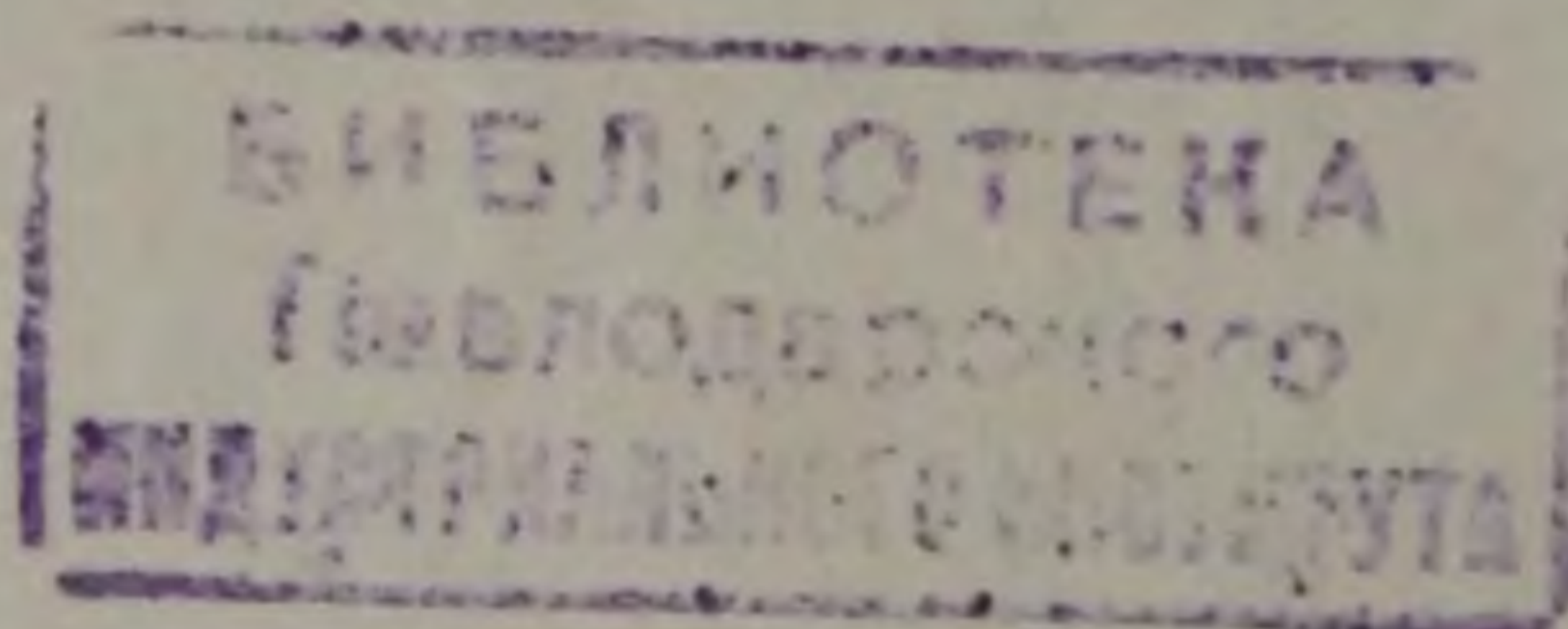
Рецензенты: проф. докт. техн. наук А. Г. Зеньковский, кафедра металлургических печей УПИ

УДК 669.04 (075.8)

Металлургическая теплотехника. В 2-х томах. 2. Конструкция и работа печей: Учебник для вузов/Кривандин В. А., Неведомская И. Н., Кобахидзе В. В. и др. — М.: Металлургия, 1986. 592 с.

В книге освещены основные вопросы общей теории тепловой работы печей, а также технология и принципы расчета процессов плавления стали, нагрева слитков и заготовок и сушки материалов. Рассмотрены конструкции и работа плавильных, нагревательных и сушильных печей, применяемых в черной и цветной металлургии и машиностроении. Описаны элементы конструкций и вспомогательного оборудования печей: устройства для генерации тепла (горелки, форсунки, электрические нагреватели), для утилизации тепла уходящих газов, для получения сжатого воздуха, пара и кислорода; газоочистные устройства. Книга является учебником для студентов металлургических и машиностроительных вузов. Может быть полезна широкому кругу инженеров—металлургов, машиностроителей и теплотехников. Ил. 251. Табл. 39. Библиогр. список: 41 назв.

401766



М $\frac{2601000000-192}{040(01)-86}$ 3-86

© Издательство
«Металлургия», 1986 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	8
Раздел I. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ПЕЧЕЙ	9
Глава 1. Классификация печей	9
1. Классификация печей по принципу теплогенерации	9
2. Классификация печей по технологическому назначению и конструктивным признакам	10
Глава 2. Основные положения общей теории печей М. А. Глинкова	11
1. Общие сведения	11
2. Процессы теплогенерации и режимы работы печей	12
3. Радиационные режимы работы печей-теплообменников	13
4. Конвективный режим работы печей-теплообменников	18
5. Режимы работы печей-теплогенераторов	19
Глава 3. Общая характеристика тепловой работы печей	20
1. Теплотехнические характеристики работы печей	20
2. Тепловой баланс и расход топлива	22
Раздел II. СЖИГАНИЕ ТОПЛИВА В ПЛАМЕННЫХ ПЕЧАХ	25
Глава 4. Пламя и его значение в тепловой работе печей	25
1. Требования к пламени	25
2. Характеристики пламени	28
3. Условия смешения топлива с воздухом	37
Глава 5. Выбор топлива и методов его сжигания	41
1. Выбор топлива	41
2. Выбор метода сжигания топлива	43
Глава 6. Сжигание газообразного топлива	45
1. Горелки с предварительным смешением	46
2. Пламенные двухпроводные горелки	55
3. Пламенные турбулентные горелки	60
4. Горелки с регулируемой длиной пламени	63
5. Плоскопламенные горелки	65
6. Радиантные трубы	69
Глава 7. Сжигание жидкого топлива	72
1. Общая характеристика мазутного факела	73
2. Сравнительная характеристика форсунок	75
3. Форсунки низкого давления	76
4. Форсунки высокого давления	79
5. Комбинированное газо-мазутное отопление	83
Раздел III. МАТЕРИАЛЫ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И МЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ПЕЧЕЙ	86
Глава 8. Огнеупорные материалы	86
1. Классификация огнеупорных изделий	86
2. Свойства огнеупорных материалов	88
3. Огнеупорные изделия	94
4. Неформированные огнеупорные материалы	109
Глава 9. Теплоизоляционные материалы	114
1. Естественные теплоизоляционные материалы	115
2. Искусственные теплоизоляционные материалы	115
Глава 10. Строительные материалы и металлы, применяемые для печей	117
1. Строительные материалы	117
2. Металлы, применяемые в печестроении	118

Глава 11. Строительные элементы печей	119
1. Фундамент	119
2. Каркас	121
3. Кладка	122
Глава 12. Сооружение печей	126
1. Последовательность работ	126
2. Техника безопасности	128
Глава 13. Служба огнеупоров и футеровки металлургических печей	129
1. Разрушение огнеупорных изделий	129
2. Выбор огнеупоров для футеровки печей	131
3. Футеровка плавильных печей	132
4. Футеровка нагревательных печей	136
Глава 14. Механическое оборудование печей	137
1. Печные шагающие конвейеры	137
2. Печные цепные конвейеры	145
3. Печные роликовые конвейеры (печные рольганги)	149
4. Вращающиеся поды печей	154
5. Выкатные поды печей	158
Раздел IV. УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛА ОТХОДЯЩИХ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ	160
Глава 15. Теплотехнические основы и сравнительная оценка различных методов утилизации тепла отходящих дымовых газов	160
1. Методы утилизации тепла	160
2. Характеристика теплообменных устройств	162
Глава 16. Регенеративные теплообменники	163
1. Общие сведения	163
2. Конструкции регенераторов	166
3. Основы расчета регенераторов	170
Глава 17. Рекуперативные теплообменники	171
1. Общая характеристика теплообмена в рекуператорах	171
2. Температурное поле рекуператора	173
3. Конструкции рекуператоров	178
4. Расчет рекуператоров	188
Глава 18. Теплосиловые устройства	190
1. Котельные агрегаты ТЭЦ	190
2. Котлы-утилизаторы	192
3. Турбинные установки	192
Раздел V. ОХЛАЖДЕНИЕ ПЕЧЕЙ И ДЫМОВЫХ ГАЗОВ	196
Глава 19. Испарительное охлаждение металлургических печей	196
1. Система испарительного охлаждения доменных печей	197
2. Система испарительного охлаждения мартеновских печей	199
3. Система испарительного охлаждения нагревательных печей	201
Глава 20. Охлаждение конвертерных газов	202
1. Характеристика газов	202
2. Способы отвода газов	203
3. Способы и схемы охлаждения газов	204
4. Конвертерные паровые котлы-утилизаторы	205
5. Водяное охлаждение конвертерных газов	208
6. Исходные данные к расчету охладителей конвертерных газов	209
Раздел VI. ОЧИСТКА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ	211
Глава 21. Теоретические основы и общая характеристика газоочистных устройств	211
1. Сухая механическая очистка газов	212

2. Очистка газов фильтрацией	218
3. Мокрая очистка газов	221
4. Электрическая очистка газов	226
Глава 22. Очистка газов доменного производства	232
1. Характеристика запыленности доменного газа	232
2. Методы очистки доменного газа	235
3. Очистка вредных выбросов в атмосферу	237
Глава 23. Очистка газов в сталеплавильном производстве	237
1. Очистка отходящих газов мартеновских и двухванных печей	239
2. Очистка конвертерных газов	245
3. Очистка газов электросталеплавильных печей	247
Глава 24. Очистка газов печей цветной металлургии	247
1. Пылеулавливание в производстве свинца, цинка и олова	252
2. Пылеулавливание в производстве меди и никеля	255
Раздел VII. ТОПЛИВНЫЕ ПЕЧИ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ	255
Глава 25. Шахтные печи	255
1. Особенности теплообмена в слое	259
2. Доменные печи	263
3. Обжиговые печи	265
Глава 26. Теплообмен в пламенных печах	265
1. Общая характеристика	267
2. Особенности лучистого теплообмена в пламенных печах	271
3. Теплообмен при торцовом отоплении	273
4. Теплообмен при сводовом отоплении	275
Глава 27. Нагревательные печи, работающие по радиационным режимам	275
1. Общая характеристика нагревательных печей	279
2. Печи для нагрева слитков (нагревательные колодцы)	295
3. Печи для нагрева блюмов и слябов	322
4. Печи трубoproкатных и колесoproкатных цехов	327
Глава 28. Нагревательные печи, работающие по конвективному режиму	327
1. Общие сведения	329
2. Конструкции печей	334
Глава 29. Термические печи	334
1. Общая характеристика	339
2. Печи для термической обработки сортового проката	342
3. Печи для термической обработки горячекатаных листов	346
4. Печи для термической обработки холоднокатаных листов и ленты	358
Раздел VIII. ТОПЛИВНЫЕ ПЕЧИ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ	358
Глава 30. Шахтные печи	358
1. Особенности тепловой работы	361
2. Конструкция и основные показатели работы	365
Глава 31. Плавильные пламенные печи	365
1. Общие сведения	366
2. Отражательные печи для плавки медных концентратов на штейн	381
3. Печи для рафинирования меди	388
Глава 32. Трубочатые вращающиеся и нагревательные печи	388
1. Основные характеристики и конструкция вращающихся печей	391
2. Тепловой и температурный режимы работы вращающихся печей	392
3. Нагревательные печи	

Раздел IX. ТОПЛИВНЫЕ ПЕЧИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРО-	
МЫШЛЕННОСТИ	395
Глава 33. Вагранки и нагревательные печи кузнечных цехов	395
1. Вагранки	395
2. Нагревательные печи кузнечных цехов	398
Глава 34. Термические печи	404
1. Печи для термической обработки тяжелых и крупногабаритных изделий	405
2. Печи для термической обработки автотракторных деталей	408
3. Термические печи специального назначения	410
Глава 35. Сушила	413
1. Установки для сушки сыпучих материалов	413
2. Установки для сушки изделий	417
Раздел X. ПЕЧИ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ С ТЕПЛОГЕНЕРА-	
ЦИЕЙ ЗА СЧЕТ ВЫГОРАНИЯ ПРИМЕСЕЙ МЕТАЛЛА	424
Глава 36. Теплотехника сталеплавильных процессов	424
1. Общая характеристика	424
2. Тепловой баланс рабочего пространства сталеплавильного агрегата	427
3. Продувка сталеплавильной ванны кислородом	430
4. Газокислородная продувка	439
5. Предварительный подогрев скрапа и его значение	440
Глава 37. Кислородные конвертеры	444
1. Общая характеристика	444
2. Кислородные конвертеры с верхней продувкой	446
3. Кислородные конвертеры Кал—До	451
4. Кислородные конвертеры с донной продувкой	454
Глава 38. Мартеновские и двухванные печи	456
1. Общие сведения	456
2. Устройство мартеновских печей	458
3. Работа мартеновских печей	463
4. Двухванные печи	471
Раздел XI. ПЕЧИ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ С ПОЛНЫМ ИЛИ	
ЧАСТИЧНЫМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХИМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ СЫРЬЕ-	
ВЫХ МАТЕРИАЛОВ	477
Глава 39. Печи для обжига сульфидных концентратов в кипящем	
слое	477
1. Общая характеристика и принцип работы	477
2. Аэродинамический режим работы печей	478
3. Тепловой и температурный режимы процесса	483
4. Конструкция печей	485
Глава 40. Конвертеры заводов цветной металлургии	487
1. Общие характеристики и принцип работы	487
2. Тепловой и температурный режимы работы	490
3. Конструкция конвертеров	493
Глава 41. Печи для автогенной плавки медных концентратов на	
штейн и черновую медь	495
1. Общие сведения и принцип работы печей для плавки на штейн	495
2. Тепловой и температурный режимы работы печей для плавки на штейн	499
3. Конструкция печей взвешенной плавки на штейн	504
4. Принцип работы печей для плавки на черновую медь	506

Раздел XII. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЕЧИ	508
Глава 42. Общая характеристика электрических печей	508
1. Общие сведения	508
2. Основные понятия и закономерности	511
3. Общая характеристика электрических печей, применяемых в черной и цветной металлургии	514
4. Общая характеристика электрических печей, применяемых в машиностроении	516
Глава 43. Дуговые и плазменные печи	517
1. Дуговые сталеплавильные печи	517
2. Дуговые вакуумные печи	522
3. Рудовосстановительные печи	526
4. Плазменные печи	529
Глава 44. Индукционные печи	540
1. Канальные печи	540
2. Тигельные печи	542
3. Вакуумные печи	545
4. Установки для плавки во взвешенном состоянии	546
5. Нагревательные установки	548
Глава 45. Печи сопротивления	550
1. Печи прямого действия	550
2. Печи косвенного действия	553
3. Вакуумные печи сопротивления	560
4. Плавильные печи сопротивления	563
Глава 46. Специальные печи	566
1. Установки диэлектрического нагрева	566
2. Электронно-лучевые печи	568
3. Лазерные установки	578
4. Оптические печи	579
5. Установки для зонной плавки	581
Рекомендательный библиографический список	585
Приложение I	587
Приложение II	588
Предметный указатель	589

ПРЕДИСЛОВИЕ

В соответствии с принятыми XXVII съездом КПСС решениями в 12-й пятилетке предусматривается создать и внедрить в производство принципиально новое оборудование и материалы, прогрессивную технологию, улучшить использование топливно-энергетических ресурсов, широко внедрять безотходную и энергосберегающую технологию, утилизировать вторичные ресурсы.

Бурный технологический прогресс последних десятилетий не оставил в стороне и развитие конструкций тепловых агрегатов, являющихся важнейшим оборудованием современных металлургических и машиностроительных предприятий, заводов по производству строительных материалов. Производство чугуна, стали, проката невозможно без использования современных металлургических печей, как немислимы без печей цветная металлургия, литейные, кузнечные и термические цехи машиностроительных заводов, заводы по производству огнеупорных и строительных материалов. Все большее значение приобретают вопросы теплоэнергетики (использование вторичных энергоресурсов и др.) и охраны окружающей среды.

Совершенно очевидно, что современный металлург-технолог должен иметь фундаментальную подготовку по металлургической теплотехнике — науке, составляющей основу металлургического производства.

Авторы данного учебника стремились преподнести студентам самый современный материал по печам черной и цветной металлургии, машиностроения; по элементам печей, огнеупорным и строительным материалам, по теплоэнергетическим и газоочистным установкам черной и цветной металлургии. Должное освещение получили как топливные, так и электрические печи.

Приведенный материал основывается на достижениях отечественной науки и практики и учитывает уровень развития металлургической теплотехники в зарубежных странах.

Отдельные главы учебника написаны следующими авторами: 1—7, 15—17, 25—29, 36—38 — В. А. Кривандиным; 8—13 — И. Н. Неведомской; 14 — В. А. Кружковым; 18—24 — В. В. Белоусовым; 30—32, 39—41 — В. В. Кобахидзе; 35 — Ю. П. Филимоновым; 42, 43 (кроме п. 4), 44, 45 и 46 (кроме п. 2) — А. В. Егоровым; п. 4 гл. 43 и п. 2 гл. 46 — Р. Штейнгардтом; 33, 34 — совместно В. А. Кривандиным и Р. Штейнгардтом.

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам: коллективу кафедры металлургических печей УПИ под руководством проф. Ю. П. Ярошенко и проф. А. Г. Зеньковскому за большую работу по рецензированию книги и за весьма ценные замечания.

Авторы также будут благодарны за все замечания, которые просят направлять по адресу: 117936, Москва, Ленинский проспект, дом 4, Московский институт стали и сплавов, кафедра теплофизики и теплоэнергетики металлургического производства.

Раздел I ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ПЕЧЕЙ

Глава 1

КЛАССИФИКАЦИЯ ПЕЧЕЙ

1. Классификация печей по принципу теплогенерации

Тепловыделение в печах представляет собой процесс превращения какого-либо вида энергии в тепловую энергию. Источниками получения тепла являются: а) химическая энергия топлива (топливные печи); б) химическая энергия жидкого металла или шихты; в) электрическая энергия.

Превращение химической энергии топлива в тепловую энергию происходит в результате сгорания топлива в так называемых топливных печах. В металлургии к таким печам относятся пламенные печи и печи, работающие по слоевому режиму. Рабочее пространство пламенных печей только в очень малой степени заполнено обрабатываемым материалом, который обычно располагается на поду. Основная часть рабочего пространства заполнена пламенем и раскаленными дымовыми газами, передающими тепло материалу. Подобные печи работают на газообразном и жидком топливах.

Сжигание топлива в печах, работающих по слоевому режиму, обычно применяют при обработке кускового материала. Чаще всего оно осуществляется в вертикальных (шахтных) печах, где материал либо распределяется по всему объему и раскаленные газы проходят между его кусками, либо частицы его распределены в газообразном теплоносителе. Для слоевого режима работы печей характерно тесное переплетение всех трех видов теплопередачи (тепловое излучение, конвекция, теплопроводность). Разделить их часто не представляется возможным.

Известны три разновидности слоевого режима: с плотным, кипящим и со взвешенным слоем обрабатываемого материала.

В печах с плотным (фильтрующим) слоем шихта, в состав которой может входить и твердое кусковое топливо, расположена плотным слоем по всему объему печи и медленно продвигается вниз. Горячие газы — продукты сгорания топлива — проходят через слой между отдельными его кусками. Это наиболее распространенный режим работы слоевых печей. Он характерен для шахтных печей, широко распространенных в металлургии.

В печах с кипящим слоем слой под динамическим действием газов находится в разуплотненном состоянии и энергично перемешивается. В таких печах может выгорать как размельченное топливо, так и горючие компоненты, содержащиеся в обрабатываемой шихте. Иногда вместе с воздухом подают газообразное топливо. Широкое использование печи с кипящим слоем получили в цветной металлургии для обжига сульфидных концентратов различных металлов, для сушки и кальцинации глинозема.

В печах со взвешенным слоем обрабатывают материалы, доведенные до пылевидного состояния. При этом мелкие частицы материала отделены друг от друга газовой прослойкой и, будучи «взвешены», движутся вместе с ним. Применяют размолотое твердое и газообразное топливо. В печах цветной металлургии широко используется тепло сгорания серы при плавке сульфидов цветных металлов.

Как в черной, так и в цветной металлургии широко распространены вечные агрегаты, в которых источником получения тепловой энергии является процесс выгорания элементов, содержащихся в обрабатываемом металле или в проплавляемой шихте. В черной металлургии таким основным элементом является углерод, который выжигается из чугуна при производстве стали в конвертерах. В цветной металлургии широко распространены процессы получения металлов из сульфидного сырья, в котором основным горючим элементом является сера.

Выжигание серы является основным процессом теплогенерации в автогенных процессах, протекающих в жидкой ванне, процессах конвертирования.

Во всех этих агрегатах процесс теплогенерации происходит непосредственно в материале или в объеме, заполненном размельченной шихтой, и поэтому органически сочетается с принятой технологией, причем выделяющееся тепло равномерно распределяется по всей массе обрабатываемого материала.

Существуют и такие печи, в которых тепловыделение обусловлено и химической энергией топлива, и химической энергией жидкого металла. К таким печам, занимающим промежуточное положение между топливными печами и конвертерами, относятся мартеновские печи. В этих печах топливо сгорает над ванной металла, пламя и раскаленные газы также находятся над ванной металла, т. е. идут процессы, присущие пламенным печам. Вместе с тем в металлической ванне происходит выгорание примесей, сопровождаемое выделением тепла, причем очень существенным, вплоть до того, что в некоторые периоды плавки теплогенерация за счет химической энергии жидкого металла может иметь решающее значение.

Основой превращения электрической энергии в тепловую является теплогенерация:

- 1) при прохождении электрического тока через газ;
- 2) при воздействии электрического тока на магнитное поле и создании вихревых токов в металле;
- 3) при переманчивании и поляризации диэлектриков;
- 4) при прохождении электрического тока через твердое (а иногда и жидкое) тело, обладающее электропроводностью;
- 5) за счет кинетической энергии электронов.

Перечисленные принципы теплогенерации лежат в основе конструкций следующих групп печей и установок: дуговых и плазменных печей, индукционных печей, установок диэлектрического нагрева, печей сопротивления, электронно-лучевых печей.

Вид процесса теплогенерации, осуществляемого в печном агрегате, в решающей степени определяет как конструкцию печи, так и характер тепломассообменных процессов, протекающих в ее рабочем пространстве.

2. Классификация печей по технологическому назначению и конструктивным признакам

По технологическому назначению металлургические печи делят на плавильные и нагревательные.

Плавильные печи предназначены для получения металлов из руд и переплавки металла с целью придания ему необходимых свойств. В этих печах материалы изменяют свое агрегатное состояние.

Нагревательные печи применяют для нагрева материалов с целью обжига (известняка, магнезита, огнеупорных материалов и др.) и сушки (литейных форм, руды, песка и др.), а также для придания металлу пластических свойств перед обработкой давлением, для термической обработки, чтобы изменить внутреннее строение и структуру металла. В нагревательных печах металлы и материалы не изменяют своего агрегатного состояния.

Внутри каждой из этих групп печи подразделяют в соответствии с теми технологическими операциями, которые в них проводят. Так, плавильные печи могут быть чугуноплавильные, сталеплавильные, медеплавильные и др. Нагревательные печи могут служить для обжига огнеупорных материалов, нагрева металла перед прокаткой и ковкой, термообработки металла. Эти группы печей подразделяют еще и по конструктивным признакам, методам транспортирования металла в печах, характеру продукта, подвергаемого нагреву. Например, печи для нагрева перед прокаткой разделяют на следующие группы: а) нагревательные колодцы, методические печи, камерные нагревательные печи и др.; б) садочные, толкательные, с вращающимся подом; в) для нагрева слитков, блюмов, труб, сутунки и др.

Топливные печи подразделяют по виду применяемого топлива. Так, сталеплавильные мартеновские печи могут быть газовые и мазутные.

В соответствии с методами утилизации тепла отходящих дымовых газов печи подразделяют на регенеративные и рекуперативные.

Электрические печи классифицируют по способу превращения электрической энергии в тепловую: дуговые электрические, сопротивления и индукционные.

Современные печи представляют собой сложные тепловые агрегаты, состоящие из собственно печи и вспомогательного оборудования. Собственно печь включает в себя рабочее пространство и устройства для получения тепловой энергии: горелки, форсунки в топливных печах и электроды, резисторы в электрических печах. В рабочем пространстве печи осуществляются те технологические операции, для которых предназначена печь. В состав вспомогательного оборудования входят устройства для утилизации тепла отходящих дымовых газов, вентиляторы и дымососы, дымовые трубы, различные клапаны, задвижки и др.

Глава 2

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ПЕЧЕЙ М. А. ГЛИНКОВА

1. Общие сведения

В настоящее время в промышленности очень широко используется печное оборудование. В таких важных отраслях, как черная и цветная металлургия, машиностроение, производство строительных материалов, легкая и даже пищевая промышленности, эксплуатируется большое число различных печей и нагревательных установок. Развитие и совершенствование печного оборудования происходило по мере возникновения и развития всех важных отраслей промышленности.

Металлургическая (печная) теплотехника уже давно оформилась во вполне самостоятельное направление технической физики, использующее, дополняющее и развивающее положения таких фундаментальных разделов науки, как термодинамика, гидро- и аэродинамика, теория горения, тепло- и массоперенос. Необходимость непрерывного совершенствования конструкций печей и процессов, в них происходящих, потребовала формулирования общих научных принципов, лежащих в основе печных процессов.

В создании теории промышленных печей большой вклад внесли русские и советские ученые В. Е. Грум-Гржимайло, Н. Е. Скаредов, Н. Н. Доброхотов, М. А. Глишков. Как и любая другая, теория печей развивалась в борьбе мнений, в основе которой лежал поиск процесса, являющегося основополагающим и определяющим прежде всего качественную сторону работы печей. Развитие техники существенным образом влияло на теорию печей, некоторые принципы, положенные в ее основу, устаревали и теряли свое значение, другие же, наоборот, возникали и развивались. Так, потеряли свое значение прогрессивные в свое время положения гидравлической теории печей В. Е. Грум-Гржимайло, не оправдало себя и представление о печах, как о тепловых машинах, работа которых зависит главным образом от их тепловой мощности.

В 1955—1975 гг. большую и очень плодотворную работу по разработке положений общей теории печей вел профессор М. А. Глишков. Принципиальным стержнем общей теории печей М. А. Глинкова является требование обеспечения наиболее благоприятных условий для интенсификации теплоотдачи к обрабатываемому в печах материалу. Основываясь на общих принципах теории печей М. А. Глинкова, можно сказать, что созданию условий для максимально возможного развития процесса теплообмена в печи должно быть подчинено все: методы теплогенерации, характер движения газов, выбор футеровки печи, ее конструктивные особенности и др.

Анализ существующих конструкций печей и их работы под этим углом зрения подтверждает правильность положений общей теории печей, разработанной М. А. Глинковым, поскольку все качественные показатели работы печей (коэффициенты использования тепла и топлива, производительность печей и др.) улучшаются при повышении интенсивности теплоотдачи к нагреваемому материалу. Общая теория печей имеет свою методологию. Она исходит из того, что исключительное многообразие печей по типам, размерам и назначению может быть с точки зрения энергетической сущности их работы заменено весьма ограниченным числом физических моделей, с помощью которых можно установить основные принципы конструирования печей.

Согласно общей теории печей, любую печь можно представить состоящей из двух зон: зоны технологического процесса и зоны генерации тепла. Причем, учитывая назначение печей, зона технологического процесса является основной, а зона теплогенерации — вспомогательной, предназначенной для создания определенных энергетических условий в зоне технологического процесса. Возможны две принципиально различных схемы работы печей:

- 1) усвоение тепла обрабатываемым материалом в зоне технологического процесса зависит от теплопередачи из зоны теплогенерации;
- 2) тепло как возникает, так и усваивается непосредственно в зоне технологического процесса.

Печи, работающие по первой схеме, получили название печей-теплообменников, по второй — печей-теплогенераторов. Возможны и смешанные схемы работы печей, когда одновременно теплогенерация имеет место и в зоне генерации тепла, и в зоне технологического процесса.

Как печам-теплообменникам, так и печам-теплогенераторам свойственны свои режимы тепловой работы. Согласно общей теории печей М. А. Глинова, в печах-теплообменниках могут осуществляться радиационный и конвективный режимы тепловой работы печей, а в печах-теплогенераторах — массообменный и электрический режимы. Режимы тепловой работы печей определяются характером процессов тепло-массопереноса и тесно связаны с процессами теплогенерации.

2. Процессы теплогенерации и режимы работы печей

Как уже отмечалось выше, в современных печах возможны три источника тепловой энергии: топливо, выгорающие примеси металла или шихты, электрическая энергия.

Наибольшее распространение получили топливные печи. В металлургических печах применяют топливо всех трех видов: твердое, жидкое и газообразное. Однако условия использования топлива этих видов совершенно различны. Топливные печи могут работать как по схеме печей-теплогенераторов, так и по схеме печей-теплообменников. Так, в слоевых печах, работающих на твердом топливе, зоны теплогенерации и технологического процесса совмещены и эти печи работают как печи-теплогенераторы, в которых осуществляется массообменный режим их тепловой работы.

При использовании газообразного и жидкого топлива зона генерации тепла обычно отделена от зоны технологического процесса определенной поверхностью, через которую передается тепло, усваиваемое в зоне технологического процесса. Здесь четко вырисовываются две задачи: внешняя — передача тепла к поверхности раздела зон (ее обычно называют поверхностью нагрева) и внутренняя — передача тепла внутрь зоны технологического процесса. Подобным образом работают широко распространенные пламенные печи, в которых осуществляется факельный метод сжигания топлива и внешняя задача определяется теплоотдачей от факела и футеровки печи к поверхности нагреваемого или проплавленного материала. Такие печи являются наиболее широко распространенными печами-теплообменниками. Передача тепла в них из зоны теплогенерации в зону технологического процесса может осуществляться как излучением, так и конвекцией, что и обеспечивает работу таких печей по конвективному, а иногда и по смешанному режимам.

В черной металлургии находят все большее применение печи-теплогенераторы, в которых тепловая энергия выделяется в зоне технологического процесса в результате окисления примесей, содержащихся в расплавленном металле. К числу таких агрегатов относятся кислородные конвертеры с верхним и нижним кислородным дутьем. Тепло, выделяющееся при окислении примесей в зоне технологического процесса — расплавленной металлической ванне, частично усваивается в этом же объеме. Возможны и смешанные случаи, когда часть необходимого тепла выделяется в зоне генерации тепла, отделенной от зоны технологического процесса, а другая часть тепла выделяется в объеме, совмещающем зоны генерации тепла и технологического процесса — в объеме металлической расплавленной ванны. Таким образом работают мартеновские печи, в которых применяется продувка ванны кислородом.

В цветной металлургии все более широко используются печи-теплогенераторы, в которых осуществляется теплогенерация за счет выгорания серы, содержащейся в размельченных шихтовых материалах, вдуваемых в рабочее пространство печи. Протекающие при этом процессы называются автогенными. В цветной металлургии возможны также смешанные типы печей — теплообменников и теплогенераторов, в которых наряду с горением серы в массе шихтовых материалов производится дополнительное сжигание топлива. Во всех этих печах-теплогенераторах осуществляется массообменный режим тепловой работы.

При использовании электрической энергии в целом ряде случаев тепловыделение осуществляется непосредственно в зоне технологического процесса (индукционные печи, печи контактного типа и др.). В таких печах, согласно классификации режимов, предложенной М. А. Глиновым, осуществляется электрический режим тепловой работы печей-теплогенераторов.

3. Радиационные режимы работы печей-теплообменников

В каждой печи, работающей по радиационному режиму, в состоянии лучистого теплообмена между собой находятся обычно три компонента: источник излучения тепловой энергии, футеровка (кладка) печи и нагреваемый материал. Так, в пламенных печах в состоянии теплообмена находятся пламя (раскаленные газы), кладка печи и нагреваемый материал. Возможно достаточно большое многообразие вариантов характера такого теплообмена, поскольку и пламя, и кладка, и нагреваемый материал могут иметь различные температуры, размеры и радиационные характеристики. Общая теория печей позволяет выбрать наиболее оптимальный режим для нагрева (расплавления) той или иной заготовки печи. Возможны следующие, наиболее распространенные случаи.

Нагреву подвергаются изделия, заполняющие в том или ином порядке все рабочее пространство или большую его часть (нагревательные колодцы печи для обжига кирпича и др.). Особенностью такого нагрева является то, что излучение от кладки не может попасть на все изделия (или на все грани нагреваемых изделий) и основное количество тепла к изделиям передается от пламени и раскаленных газов, заполняющих объем печи. Очевидно, что чем больше температура (в допустимых, конечно, пределах) и степень черноты этих газов, тем интенсивнее будет нагрев. Большинство нагреваемых изделий имеет сплошной (но обычно не серый) спектр поглощения, поэтому целесообразно, чтобы и пламя имело также сплошной спектр излучения, особенно в видимой и ближней инфракрасной областях, где имеет место излучение, свойственное температурному уровню работы металлургических печей. Из этого следует, что в таких случаях целесообразно иметь так называемое светящееся пламя, имеющее сплошной (но не серый) спектр излучения. Подобное пламя можно создать при использовании таких видов топлива, которые содержат углеводороды, способные разлагаться с выделением сажистого углерода (мазут, природный газ).

Вторым типичным случаем является такой, когда нагреваемые изделия располагаются на поду печи и сжигается топливо, дающее так называемый не-светящийся факел, т. е. факел, в котором имеет место лишь селективное излучение раскаленных газов (CO_2 и H_2O). Излучение этих газов, как известно

(см. т. 1 данного учебника), происходит только в определенных спектральных интервалах, вне которых эти газы не излучают и не поглощают энергию. Если говорить о видимой и ближней инфракрасной областях спектра (приблизительно до 3,5—4 мкм), то лишь около одной трети этого спектрального интервала перекрывается полосами излучения и поглощения CO_2 и H_2O . Вместе с тем нагреваемые изделия имеют сплошной спектр поглощения, из чего следует, что в пределах двух третей указанного спектрального диапазона металл от раскаленных газов тепла получать не будет. Этот недостаток должен быть восполнен сплошным излучением кладки, которая получает тепло от газов, раскаляется и обеспечивает излучение на нагреваемый металл.

Таким образом происходит трансформация селективного излучения раскаленных газов в сплошное излучение кладки. В тех спектральных интервалах, где излучения газов нет, металл будет получать тепло только от кладки в виде ее эффективного излучения. Кладка не имеет степени черноты, равной единице, и будет отражать падающие на нее лучистые потоки от раскаленных газов и металла. Однако отраженное излучение газов будет иметь место лишь при тех длинах волн, при которых имеет место излучение газов. Падающий лучистый поток от металла будет отражаться кладкой в соответствии со спектральным составом падающего потока и характером изменения по спектру величины поглощательной способности кладки. Учитывая, что степень черноты кладки имеет обычно достаточно большое значение, можно утверждать, что величина эффективного излучения кладки будет определяться в основном ее собственным излучением, которое будет тем больше, чем выше температура и степень черноты кладки.

Иногда возможен такой случай, когда, обеспечивая максимальное излучение тепла на расплавляемый материал, необходимо вместе с тем предохранить кладку (свод) печи от чрезмерного перегрева. Подобное положение является типичным для мартеновских печей, где необходимо поддерживать предельно возможную высокую температуру в рабочем пространстве. В таких условиях высокотемпературный, интенсивно излучающий факел целесообразно приближать к поверхности металлической ванны, преследуя две цели: повысить максимально возможную теплоотдачу к металлу и не пережечь при этом огнеупорную футеровку печи.

Разумеется, описанные случаи не исчерпывают всего многообразия практических случаев теплообмена в металлургических печах, однако они иллюстрируют то положение, что различные технологические операции нагрева (расплавления) металла требуют соответствующих режимов теплообмена. Выбор оптимального режима теплообмена, в том числе радиационного, для различных технологических операций требует четких представлений о возможностях того или иного режима, которые обстоятельно проанализированы в общей теории печей М. А. Глинкова.

Следуя работам М. А. Глинкова, можно написать два уравнения для результирующих потоков на металл и кладку печи (при условии, что поверхности кладки и металла представляют собой две параллельные бесконечные плоскости):

$$q_m = Q_p^m + Q_k (1 - \epsilon_p) - Q_m; \quad (2-1)$$

$$q_k = Q_p^k + Q_m (1 - \epsilon_p) - Q_k. \quad (2-2)$$

Если вычесть уравнение (2-2) из уравнения (2-1), то можно получить

$$q_m = (Q_k - Q_m) (2 - \epsilon_p) + (Q_p^m - Q_p^k) + q_k. \quad (2-3)$$

В этих уравнениях: Q_m и Q_k — эффективные тепловые потоки от металла и кладки; Q_p^m и Q_p^k — падающие потоки от пламени на металл и кладку; ϵ_p — степень черноты пламени (принятая постоянной и не зависящей от температуры).

Из уравнения (2-3) следует, что величина возможного результирующего потока на металл зависит от следующих величин:

- 1) разности эффективных потоков кладки и металла;
- 2) разности излучения пламени в направлении поверхности металла и кладки;

3) величины степени черноты пламени, определяющей значение коэффициента $(2 - \epsilon_{\Pi})$ и серьезно влияющей на Q_{Π}^{κ} и $Q_{\Pi}^{\text{м}}$;

4) результирующего потока на кладку (тепловые потери кладки).

Из уравнения (2-3) видно, что могут существовать три случая радиационных режимов работы печей, характеризуемые различным соотношением падающих лучистых потоков от пламени на металл и кладку:

1) $Q_{\Pi}^{\kappa} = Q_{\Pi}^{\text{м}}$;

2) $Q_{\Pi}^{\kappa} > Q_{\Pi}^{\text{м}}$;

3) $Q_{\Pi}^{\kappa} < Q_{\Pi}^{\text{м}}$.

М. А. Глинков предложил и ввел в теорию печей и практику следующие названия этих режимов (соответственно); 1) равномерно распределенный; 2) направленный косвенный; 3) направленный прямой.

Физическая сущность этих режимов теплообмена соответствует характеру трех практических случаев, рассмотренных ниже.

Равномерно-распределенный режим

Одинаковое по величине излучение пламени на металл и кладку может иметь место при равномерном (рис. 2-1, а, кривая 1) или симметричном (рис. 2-1, а, кривая 2) распределении температуры по высоте печи при условии приблизительно аналогичного изменения степени черноты пламени. Как уже отмечалось, для создания такого режима необходимо применять такое топливо, которое при использовании соответствующих методов сжигания может обеспечить значительную величину степени черноты пламени (или как иногда говорят большую светимость). Обычно это мазут и природный газ.

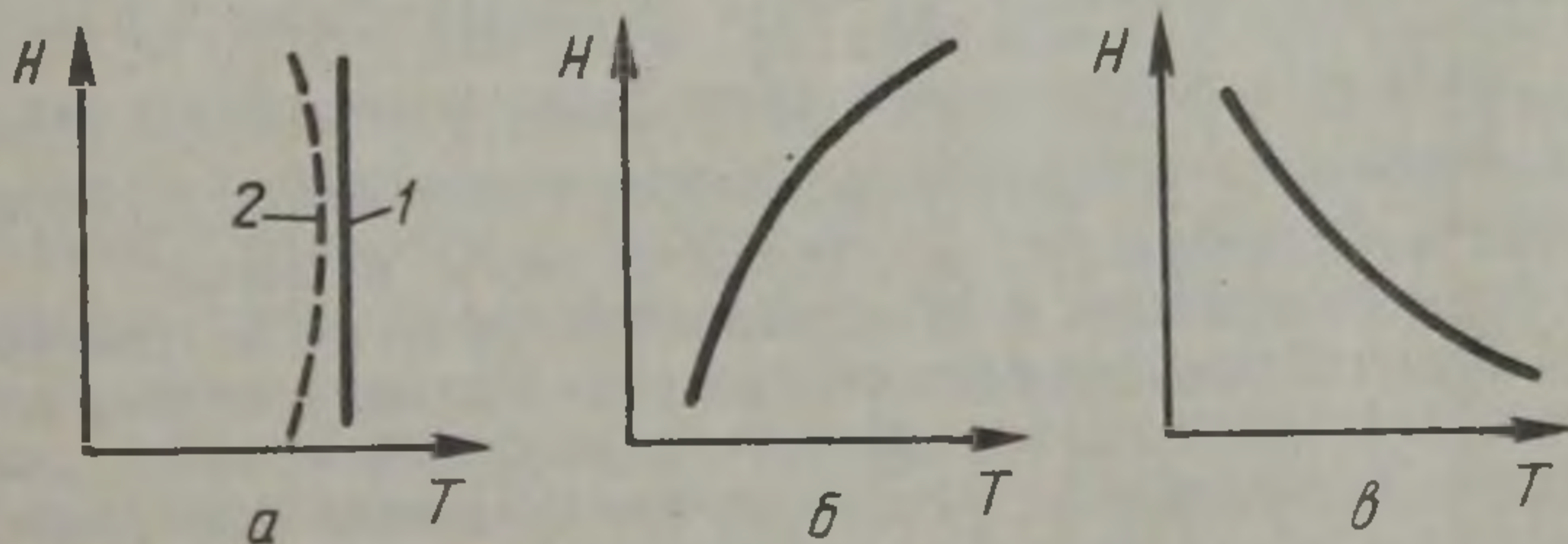


Рис. 2-1. Изменение температуры до высоты дечи при трех разновидностях радиационного режима теплообмена: а — равномерно-распределенным; б — косвенным направленным; в — прямом направленным

Как видно из уравнений (2-1), (2-2) и (2-3), степень черноты пламени (газов) при радиационных режимах играет важную роль, поскольку определяет как излучающую, так и поглощательную способность пламени. Из уравнения (2-1) видно, что возможны два предельных случая, когда $\epsilon_{\Pi} = 1$ и $\epsilon_{\Pi} = 0$. При $\epsilon_{\Pi} = 1$ пламя будет интенсивно излучать, но в то же время и полностью поглощать лучистый тепловой поток, идущий от кладки на металл. Следовательно, такое пламя полностью экранирует кладку от металла. При $\epsilon_{\Pi} = 0$ будет иметь место обратная картина: эффективное излучение кладки будет полностью доходить до металла, а излучение пламени будет отсутствовать. Такое положение характерно для направленного косвенного режима, осуществляемого в электронагревательных печах сопротивления, заполненных лучепрозрачной средой. Практические случаи занимают какое-то промежуточное положение, однако равномерно-распределенному режиму свойственна значительная величина степени черноты, при которой непосредственное излучение пламени существенно превалирует над экранированным пламенем излучением кладки.

Как известно (см. т. 1 данного учебника), степень черноты раскаленных газов зависит от трех величин: температуры газов, процентного содержания CO_2

и H_2O и толщины газового слоя. Толщина газового слоя, заключенного чаще всего между сводом печи и поверхностью нагрева, представляет собой не что иное, как высоту печи. С точки зрения излучения газов высоту печи следует делать как можно больше, однако при этом будут чрезмерно увеличиваться тепловые потери через кладку и резко возрастет стоимость печи. Поэтому существуют определенные оптимальные соотношения между поверхностью кладки печи $F_{кл}$ и поверхностью нагрева металла F_M , которые объединены в соотношении $\omega = F_{кл}/F_M$, называемом степенью развития кладки. В печах с равномерно-распределенным режимом степень развития кладки обычно определяется из конструктивных соображений, поскольку кладка не играет решающей роли в формировании теплового потока на металл.

Таким образом, для обеспечения равномерно-распределенного режима теплообмена необходимо выбирать такой метод сжигания мазута или природного газа, который обеспечивает высокие и равномерные температуру и степень черноты пламени в рабочем пространстве. Подобное распределение температуры может быть достигнуто при рассредоточенном подводе топлива и весьма развитой циркуляции газов в рабочем объеме печи.

Равномерно-распределенный режим целесообразно применять тогда, когда скорость и равномерность нагрева изделий зависят в основном от излучения пламени (газов). Такое положение, например, имеет место в нагревательных колодцах, где рабочее пространство заполнено стоящими слитками, все грани которых должны получать приблизительно одинаковое количество тепла. Если это условие не будет соблюдаться, то скорость и равномерность нагрева слитков будут на неудовлетворительном уровне. Иными словами, суммарный коэффициент теплоотдачи к поверхности нагрева в высокотемпературной печи будет практически равен сумме коэффициентов теплоотдачи излучением от пламени $\alpha_{луч}^п$ и от кладки $\alpha_{луч}^к$, т. е. $\alpha_{\Sigma} = \alpha_{луч}^п + \alpha_{луч}^к$.

Для быстрого и равномерного нагрева необходимо, чтобы для всех элементов поверхности садки величина α_{Σ} была приблизительно одинаковой. Если величина $\alpha_{луч}^к$ мала или вообще равна нулю (кладка «не видит» какие-то грани нагреваемых слитков), то α_{Σ} будет определяться величиной $\alpha_{луч}^п$, которая в свою очередь зависит от температуры и степени черноты пламени.

Здесь необходимо отметить, что возможность увеличения температуры ограничивается стойкостью применяемых огнеупоров. При всех видах радиационного режима работы печей футеровка работает в условиях высоких температур и должна обладать необходимой огнеупорностью. Однако материал футеровки должен выбираться не только по соображениям поддержания необходимого температурного уровня в печи, но и с учетом стоимости огнеупоров. Например, в нагревательных колодцах, где слитки нагреваются до $1200^{\circ}C$, по соображениям технологии нагрева достаточно иметь рабочую температуру около $1400-1450^{\circ}C$, поэтому применяемые огнеупоры должны устойчиво выдерживать именно эту температуру. Очевидно, нецелесообразно применять в этом случае более дорогие огнеупоры, способные выдержать $1700-1750^{\circ}C$. Температуру в рабочем пространстве печей обычно выбирают, исходя из стремления иметь наивысший возможный уровень процессов теплообмена, но вместе с тем ее очень часто ограничивают как по технологическим соображениям, так и в результате ограниченной стойкости огнеупорных материалов.

Косвенный направленный режим

Как следует из вышесказанного [рис. 2-1, б, уравнения (2-1) и (2-3)], при режиме косвенного направленного теплообмена ($Q_{п}^к > Q_{п}^м$) необходимо развивать собственное излучение кладки, стремясь всемерно увеличить ее эффективное излучение Q_k . Для этого требуется прежде всего соответствующее увеличение температуры кладки, что вызывает необходимость применения высококачественных огнеупорных материалов. Чрезвычайно эффективно также использование огнеупоров, обладающих высокой степенью черноты, что одновременно с влиянием температуры излучающей поверхности позволяет получить высокое зна-

чение величины собственного излучения кладки. Для интенсификации теплоотдачи от кладки в последнее время начали применять специальные обмазки, увеличивающие излучательную способность внутренней поверхности огнеупорной футеровки.

Косвенный направленный режим теплообмена можно получить практически при любом топливе, если обеспечить его рассредоточенное сжигание в непосредственной близости от поверхности кладки. Наиболее целесообразно применение такого режима теплообмена при сжигании бедного топлива (смеси коксового и доменного газов), которое в условиях иного режима теплообмена не может обеспечить высокой эффективности нагрева. При всех условиях сжигания топлива с образованием несветящегося пламени использование косвенного режима позволяет трансформировать селективное излучение газов в сплошное излучение кладки и тем самым обеспечить интенсификацию теплообмена к поверхности нагреваемого материала. В настоящее время широкое распространение получает сводовое отопление нагревательных печей, при котором установленные на своде горелки работают так, что раскаляют внутреннюю поверхность футеровки свода до весьма высокой температуры и обеспечивают значительный тепловой поток от свода на металл.

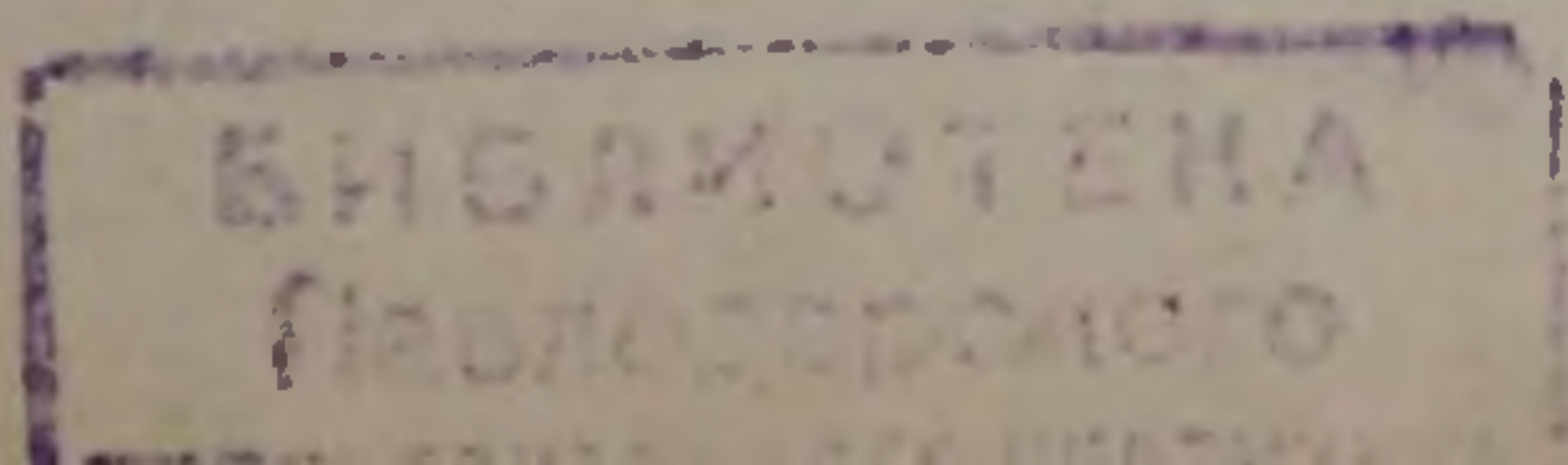
Косвенный направленный режим теплообмена может иметь место, естественно, не только при сводовом отоплении, но и во всех других случаях, когда излучение кладки играет решающую роль. Это может быть и при газовом торцовом отоплении с использованием беспламенных горелок и, как уже указывалось, в нагревательных электрических печах сопротивления, заполненных лучепрозрачной средой, и в других случаях.

Прямой направленный режим

Прямой направленный режим теплообмена (см. рис. 2-1, в) возможен при условии, когда $Q_{\text{п}}^{\text{м}} > Q_{\text{п}}^{\text{к}}$. Обеспечить это условие можно в том случае, если высокотемпературное хорошо светящееся пламя будет максимально приближено к поверхности нагрева обрабатываемого материала. При этом слой газов, располагающийся между пламенем и сводом печи, как основным элементом кладки, будет поглощать часть теплового потока $Q_{\text{п}}^{\text{к}}$ и обеспечивать тем самым вышележающее условие существования прямого направленного теплообмена. Создать такое пламя, которое имело бы несимметричное относительно оси пламени распределение температуры и степени черноты пока, практически невозможно, поэтому создание режима прямого направленного теплообмена возможно лишь одним, отмеченным выше, путем — размещением пламени в непосредственной близости от теплопотребляющей поверхности.

В качестве топлива при рассматриваемом режиме теплообмена должно использоваться то, которое обеспечивает высокую температуру горения и значительную светимость пламени. Для удержания пламени в непосредственной близости от поверхности нагрева необходимо использовать устройства для сжигания топлива, обеспечивающие высокие скорости истечения топлива и окислителя. В этих условиях пламя имеет сравнительно небольшую толщину, поэтому высокая излучательная способность пламени должна создаваться и поддерживаться за счет соответствующих радиационных характеристик факела. При этом режиме надо стремиться избегать излишней циркуляции газов, способной снизить скорость движения газов в факеле и вызвать увеличение его поперечных размеров. Это может привести к выравниванию характеристик пламени и расположенного над ним газового объема, т. е. к нарушению основного условия прямого направленного теплообмена.

Подобный режим наиболее часто осуществляется в высокотемпературных плавильных, например мартеновских, печах, в которых наиболее ответственная часть футеровки печи — свод — работает на пределе огнеупорности материалов, из которых он выполнен. Приближение высокотемпературного пламени к своду может привести к выходу его из строя. Осуществление режима прямого направленного теплообмена в мартеновских печах — это наиболее характерный пример



практического использования этого режима. Однако и в нагревательных печах присутствуют элементы прямого направленного режима теплообмена в тех случаях, когда пламя располагается под углом к поверхности нагрева металла.

4. Конвективный режим работы печей-теплообменников

Под конвективным режимом работы печей понимается такой режим, при котором теплоотдача конвекцией имеет преобладающее значение, и поэтому теплоотдачей радиацией как от пламени, так и от футеровки можно пренебрегать. Как уже отмечалось в т. 1 данного учебника, в практических условиях преобладает вынужденная конвекция, для которой справедливы критериальные уравнения типа

$$Nu = KRe^n Pr^m, \quad (2-4)$$

и коэффициент теплоотдачи растет с увеличением скорости движения среды в результате уменьшения толщины пограничного слоя.

Так как теплоотдача конвекцией имеет место лишь при движении среды, то в процессе теплоотдачи конвекцией могут принимать участие газообразные и жидкие теплоносители. Как показывает анализ, физические свойства теплоносителей оказывают большое влияние на величину коэффициента теплоотдачи конвекцией. Газообразные теплоносители обеспечивают относительно невысокие значения коэффициента теплоотдачи конвекцией [не более 300—400 Вт/(м²·К)] вследствие их низкой теплопроводности вообще и в пограничном слое в частности. Жидкие теплоносители могут быть двух типов: с относительно низкой, но более высокой, чем у газов, теплопроводностью (обычно соли щелочных металлов) и с высокой теплопроводностью (металлы). При использовании жидких теплоносителей достигаемая величина коэффициента теплоотдачи обычно на порядок выше таковой для газообразных теплоносителей.

Наибольшее распространение получили конвективные печи-теплообменники, работающие с использованием газообразных теплоносителей — продуктов сгорания топлива и специально подогреваемых сред (чаще всего воздуха). Преобладающее значение в общей теплоотдаче конвекция приобретает в низкотемпературных печах, сжигание топлива в рабочем пространстве которых невозможно по двум причинам:

1) при низких температурах невозможно обеспечить устойчивое горение топлива;

2) интенсивное тепловыделение в рабочем пространстве не позволяет поддерживать необходимую достаточно низкую и равномерную температуру.

В силу этого зона теплогенерации и технологическая зона в таких печах разделены и топливо сжигается вне рабочего пространства печи в так называемых подподовых или выносных топках.

Конвективный режим работы печей-теплообменников может быть подразделен на проточный и циркуляционный.

При проточном режиме газообразный теплоноситель, продвигаясь около поверхности нагрева, постепенно остывает и его температура уменьшается. При этом режиме теплоноситель отдает нагреваемому изделию часть тепла, приобретенного в зоне теплогенерации, и пополнить запас энергии теплоноситель может только в зоне теплогенерации.

При циркуляционном режиме наличие интенсивной циркуляции, приводящей к непрерывному перемешиванию объемов теплоносителя, поступающих в печь с теми объемами, которые в результате контакта с поверхностью нагрева теряют свое тепло, обеспечивает поддержание температуры теплоносителя на необходимом постоянном уровне.

Проточный режим бывает двух видов: канальный и фильтрующий. В первом случае поток теплоносителя, приобретший запас энергии в зоне генерации тепла, проходит около поверхности нагрева, отдавая тепло обрабатываемому материалу. Подобным образом работают печи, в которых осуществляется нагрев листов, ленты и других изделий, имеющих вполне определенную поверхность нагрева, около которой двигается остывающий теплоноситель.

При фильтрующем режиме нагретый теплоноситель проходит (фильтруется) через поверхность нагрева, что характерно для обработки сыпучих материалов.

Газообразный теплоноситель для конвективных проточных печей может быть самым разнообразным. Его выбор в значительной степени определяется рабочей температурой печи. Это могут быть продукты сжигания обычно газообразного топлива, которые на пути от зоны теплогенерации до технологической зоны в случае необходимости могут разбавляться или воздухом, или уже остывшими продуктами сгорания. В низкотемпературных печах с рабочей температурой 200—250 °С теплоносителем обычно служит воздух, предварительно подогретый в электрокалорифере. При всех теплоносителях, стремясь получить интенсивную теплоотдачу, необходимо обеспечивать максимально возможную (экономически оправданную) скорость движения теплоносителя. Для этой цели используют самые разнообразные приемы и приспособления (струйная обдувка, вентиляторы и др.). При обеспечении искусственной интенсивной циркуляции газообразного теплоносителя можно добиться настолько полного перемешивания объемов вновь поступающего и частично остывшего теплоносителя, что его состояние будет характеризоваться некоторой равномерной температурой и будет обеспечен тем самым циркуляционный конвективный режим работы печей.

В настоящее время конвективные режимы работы печей находят в металлургии все большее распространение как при нагреве металла, так и при его охлаждении. Наиболее эффективным является сравнительно новый метод скоростного конвективного (ударного) нагрева металла перед обработкой давлением, позволяющий достигнуть высокой интенсивности нагрева металла без перегрева футеровки печи. Все большее значение приобретают процессы струйного нагрева и охлаждения в протяжных термических печах.

5. Режимы работы печей-теплогенераторов

Массообменный режим

Как уже отмечалось, в печах-теплогенераторах зоны теплогенерации и технологического процесса совмещены и процессы тепловыделения неразрывно связаны с технологическими физико-химическими и массообменными процессами, протекающими в рабочих пространствах печей.

Выделение тепла в печах-теплогенераторах может осуществляться как в результате сжигания твердого топлива, перемешанного с обрабатываемым материалом, так и в результате окисления примесей, содержащихся в расплавленном металле и проплавляемой шихте. Массообменные режимы нашли практическое применение в следующих печах:

слоевых с плотным (фильтрующим) кипящим и взвешенным слоем, в которых сжигается твердое топливо;

конвертерах для производства стали, в которых тепло выделяется при окислении углерода и других примесей, содержащихся в жидком чугуне;

печах кислородно-взвешенной плавки для получения меди, в которых тепло выделяется в результате выгорания серы и в меньшей степени железа, содержащихся в обрабатываемой шихте.

В этих печах существует теснейшая взаимосвязь между процессами тепловыделения и технологическими процессами. Горение топлива или окисление примесей расплавленного металла или вдуваемой в печь шихты вызывают соответствующие изменения температуры в микрообъемах зоны технологического процесса и оказывают влияние на развитие диффузионных (массообменных) процессов, лежащих в основе технологических операций. Так, например, в доменных печах, работающих с плотным (фильтрующим) слоем, горение кокса обеспечивает достижение температуры, при которой происходит восстановление железа из его оксидов. В конвертерах для производства стали повышение температуры в определенных частях расплавленной ванны обеспечивает повышение скорости диффузии окислителя в расплавленный чугун, в результате чего создаются необходимые предпосылки для повышения скорости удаления примесей в металлической ванне в целом.

В печах для автогенной плавки на штейн, в которых осуществляются процессы, связанные с окислением сульфидов, выгорание серы и железа создает температурные условия, необходимые для расплавления шихты и последующего разделения расплава на штейн и шлак. Следует отметить, что принципиально возможны и находят практическое применение смешанные топливно-автогенные процессы.

Электрический режим

Под электрическим режимом работы печей-теплогенераторов понимается такой режим, при котором тепло в зоне технологического процесса возникает в результате преобразования электрической энергии, вводимой непосредственно в эту зону.

Зона технологического процесса при электрическом режиме работы печей может находиться в твердом, жидком или газообразном состоянии. При твердом состоянии технологической зоны электрическая энергия подводится прямо к обрабатываемому материалу, который нагревается с целью обработки давлением или для термической обработки. Это часто встречающиеся на практике контактный или индукционный нагревы. Технологическая зона находится в жидком состоянии в индукционных плавильных печах, применение которых непрерывно расширяется. Газообразная технологическая зона составляет основу работы плазменных, чаще всего, плавильных печей, обеспечивающих получение особо качественных сталей.

Глава 3

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ПЕЧЕЙ

1. Теплотехнические характеристики работы печей

Работа каждой печи характеризуется рядом показателей, наиболее важными из которых являются температурный и тепловой режимы, коэффициент полезного теплоиспользования и производительность.

Температурный режим

Температура печи — важный теплотехнический показатель ее работы, хотя термин «температура печи» носит несколько условный характер. Дело в том, что в топливных печах в состоянии взаимного теплообмена находятся пламя (раскаленные газы), металл, кладка, которые имеют различную температуру. Причем температура всей печи не может определяться ни одним из этих значений температуры, а представляет собой какую-то усредненную величину, применительно к которой обычно и используют термин «температура печи».

Температура зависит от ряда факторов, важнейшие из которых — температура горения топлива и характер потребления тепла (включая тепловые потери), свойственные печи данной конструкции. Для ориентировочного определения действительной температуры печи T_d иногда используют весьма приближенное соотношение

$$T_d = \eta T_k,$$

где T_k — калориметрическая температура горения топлива; η — пирометрический коэффициент, зависящий от конструкции печи и изменяющийся обычно в пределах 0,65—0,80.

Температура печи зависит прежде всего от ее назначения и может изменяться во времени и по объему печи.

Изменение температуры печи во времени называется температурным режимом печи. Обычно его представляют соответствующим графиком $T = f(t)$. Печи, температура которых не изменяется со временем, называются печами постоянного

действия (например, методические печи), с переменной во времени температурой — печами периодического действия (печи с выкатным подом). Изменение температуры по объему и длине печи также может иметь различный характер. Нагревательные печи, в которых температура по всему объему приблизительно одинакова, называют камерными. Печи с изменяющейся по длине температурой называются методическими.

Тепловой режим

Работа печи в значительной степени определяется тем, какое количество тепла поступает в нее. Количество тепла, которое подают в печь в каждый данный момент времени, называется тепловой нагрузкой. То наибольшее количество тепла, которое печь может нормально (без недожога топлива в рабочем пространстве) усвоить, называется тепловой мощностью.

Тепловой режим печи представляет собой изменение тепловой нагрузки во времени и может быть представлен графиком зависимости тепловой нагрузки от времени. Тепловой режим теснейшим образом связан с температурным режимом. Печи периодического действия, работающие с переменной во времени температурой, имеют переменную во времени тепловую нагрузку, тогда как печи постоянного действия работают при неизменной тепловой нагрузке.

Качество работы печи, совершенство ее конструкции как теплового агрегата характеризуется коэффициентом полезного теплоиспользования (к. п. т.) и коэффициентом использования тепла (к. и. т.).

В общем виде к. п. т. определяют следующим образом:

$$\text{к. п. т.} = \frac{Q_{\text{м}} + Q_{\text{шл}} + Q_{\text{энд}} - Q_{\text{экз}}}{Q_{\text{т}} + Q_{\text{ф}}V}$$

Учитывая, что

$$Q_{\text{т}} + BQ_{\text{ф}} - BQ_{\text{ух}} - Q_{\text{пот}} = Q_{\text{м}} + Q_{\text{шл}} + Q_{\text{энд}} - Q_{\text{экз}},$$

к. п. т. может быть выражен также в следующей форме:

$$\text{к. п. т.} = \frac{Q_{\text{т}} + BQ_{\text{ф}} - BQ_{\text{ух}} - Q_{\text{пот}}}{Q_{\text{т}} + BQ_{\text{ф}}}, \quad (3-1)$$

где B — часовой расход топлива, $\text{м}^3/(\text{кг} \cdot \text{ч})$; $Q_{\text{т}}$ — химическое тепло топлива, кДж/ч , $Q_{\text{т}} = BQ_{\text{н}}^{\text{р}}$; $Q_{\text{м}}$ и $Q_{\text{шл}}$ — тепло соответственно металла и шлака, кДж/ч ; $Q_{\text{энд}}$ и $Q_{\text{экз}}$ — тепло эндотермических и экзотермических (кроме горения топлива) реакций, кДж/ч ; $Q_{\text{ф}}$ — физическое тепло топлива и воздуха, отнесенное к единице количества топлива, кДж/м^3 , кДж/кг ; $Q_{\text{ух}}$ — тепло уходящих газов, отнесенное к единице количества топлива, кДж/м^3 , кДж/кг ; $Q_{\text{пот}}$ — тепловые потери, кДж/кг .

Для электрических печей можно написать равенство

$$Q_{\text{т}} + BQ_{\text{ф}} = 860P,$$

где P — мощность печи, кВт .

Из выражения (3-1) легко получить

$$\text{к. п. т.} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}} + Q_{\text{ф}} - Q_{\text{ух}} - Q_{\text{пот}}/B}{Q_{\text{н}}^{\text{р}} + Q_{\text{ф}}}. \quad (3-2)$$

Если $Q_{\text{ф}} = 0$, т. е. в печь поступает только тепло топлива, то коэффициент полезного теплоиспользования (к. п. т.) превращается в коэффициент полезного топливоиспользования.

Естественно, что чем выше значение к. п. т. (аналогичного коэффициенту полезного действия для разного рода агрегатов), тем лучше в тепловом отношении работает печь. Из выражения (3-2) следует, что увеличение подогрева топлива и воздуха, а также снижение температуры уходящих дымовых газов (поскольку $Q_{\text{ух}} = V_{\text{ух}}c_{\text{ух}}T_{\text{ух}}$) и тепловых потерь способствуют повышению к. п. т. печи.

Тепловые потери в печах в значительной степени зависят от факторов, связанных с конструкцией печи, поэтому, чтобы характеризовать только топливо и условия его сжигания, применяют коэффициент использования топлива (к. и. т.):

$$\text{к. и. т.} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}} + Q_{\text{ф}} - Q_{\text{ух}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}} + Q_{\text{ф}}} \quad (3-3)$$

Сопоставляя выражения (3-1) и (3-3), можно видеть, что к. п. т. всегда меньше к. и. т., поэтому при проектировании и эксплуатации печей следует стремиться к тому, чтобы к. п. т. по своей величине максимально приближался к к. и. т., для чего необходимо добиваться снижения тепловых потерь.

Производительность печей — важнейший показатель их работы, так как именно на производительности отражаются все положительные и отрицательные стороны конструкции и тепловой работы печи. В плавильных печах производительность в значительной степени зависит от характера проплавляемой шихты, в нагревательных печах — от начальной температуры металла. Как в том, так и в другом случаях на производительность большое влияние оказывает температура в рабочем пространстве печи и температура отходящих дымовых газов, а также интенсивность и характер теплопередачи от печи к нагреваемому (проплавляемому) материалу. Все это свидетельствует о том, что производительность зависит от очень многих технологических, теплотехнических и конструктивных факторов.

Обычно различают общую и удельную производительность. Общая производительность характеризует размеры агрегата и измеряется в т/ч, или т/сут. Удельная производительность, выражаемая в кг/(м²·ч), или т/(м²·ч), характеризует интенсивность работы печи и служит для оценки качества работы и сравнения печей. Удельную производительность часто называют напряженностью пода печи. Различают напряженность активного пода и напряженность габаритного пода. В первом случае производительность отнесена только к площади пода, занятой металлом, во втором — ко всей площади пода печи.

2. Тепловой баланс и расход топлива

Как видно из изложенного выше, расход топлива является важной характеристикой работы печей. На действующей печи расход топлива определяют непосредственным измерением, а для проектируемых печей — расчетным путем, используя тепловой баланс печи.

Тепловой баланс печи состоит из равных между собой приходной и расходной частей, каждая из которых складывается из ряда статей. Для печей постоянного действия тепловой баланс составляют на один час, для печей периодического действия — на один цикл работы.

Статьи приходной части теплового баланса

1. Тепло, получаемое в результате сгорания топлива, кДж/ч:

$$Q_{\text{х}} = BQ_{\text{н}}^{\text{р}},$$

где B — расход топлива, кг/ч, или м³/ч; $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ — теплота сгорания топлива, кДж/кг, или кДж/м³.

2. Тепло, вносимое подогретым воздухом, кДж/ч:

$$Q_{\text{в}} = Bc_{\text{в}}T_{\text{в}}\nu_{\text{в}},$$

где $T_{\text{в}}$ — температура подогрева воздуха, °С; $c_{\text{в}}$ — средняя удельная теплоемкость воздуха в интервале температур от 0 °С до $T_{\text{в}}$, кДж/(м³·К); ν — коэффициент расхода воздуха; $\nu_{\text{в}}$ — количество воздуха, теоретически необходимого для сжигания единицы топлива, м³/кг, или м³/м³.

3. Тепло, вносимое подогретым топливом, кДж/ч:

$$Q_{\text{т}} = Bc_{\text{т}}T_{\text{т}},$$

где c_T — средняя удельная теплоемкость топлива в интервале температур от нуля до T_T , кДж/(м³·К); T_T — температура подогрева топлива, °С.

4. Тепло экзотермических реакций. В этой статье при составлении теплового баланса учитывают все химические реакции, идущие с положительным тепловым эффектом, кроме реакций горения топлива. В нагревательных печах учитывают тепло, выделяющееся при окислении металла. При окислении 1 кг металла выделяется 5652 кДж/кг тепла, поэтому $Q_{\text{окс}} = 5652P\alpha$, кДж/ч, где P — производительность печи, кг/ч; α — величина угара металла, кг/кг металла.

Статьи расходной части теплового баланса

1. Полезное тепло (кДж/ч), необходимое для нагревания и плавления материалов. Если материалы поступают в печь холодными, то

$$Q_1 = Gc_m T_{m.к.}$$

если подогретыми, то

$$Q_1 = G(c_m T_{m.к.} - c'_m T_{m.н.}),$$

где G — количество материала, кг/ч; $T_{m.к.}$ — конечная температура нагрева металла, °С; $T_{m.н.}$ — начальная температура металла, °С; c_m — средняя удельная теплоемкость металла в интервале температур от нуля до $T_{m.к.}$, кДж/(кг·К); c'_m — средняя удельная теплоемкость металла в интервале температур от нуля до $T_{m.н.}$, кДж/(кг·К).

Для плавильных печей учитывают скрытую теплоту плавления материалов.

2. Тепло, уносимое шлаками, кДж/ч:

$$Q_2 = G_{\text{шл}} c_{\text{шл}} T_{\text{шл.}}$$

где $G_{\text{шл}}$ — количество шлаков, кг/ч; $T_{\text{шл.}}$ — температура шлака, °С; $c_{\text{шл}}$ — удельная теплоемкость шлаков, кДж/(кг·К).

3. Тепло эндотермических реакций Q_3 . Эта статья характерна для плавильных печей. К ней относится, например, тепло, идущее на разложение известняка.

4. Тепло, уносимое отходящими газами, кДж/ч:

$$Q_4 = Vv_{\text{ух}} c_{\text{ух}} T_{\text{ух}},$$

где $T_{\text{ух}}$ — температура отходящих из печи дымовых газов, °С; $c_{\text{ух}}$ — средняя удельная теплоемкость отходящих из печи газов, кДж/(м³·К).

Некоторое количество дымовых газов удаляется из рабочего пространства печи в результате выбивания через окна, щели и др. Поэтому только с некоторым приближением можно рассматривать $v_{\text{ух}}$ как полное количество газов, образующихся при сжигании единицы массы или единицы объема топлива.

5. Тепло от химической неполноты сгорания топлива. При беспламенном сжигании потери тепла от химической неполноты сгорания практически отсутствуют. При пламенном сжигании в отходящих газах обычно содержится 0,5—3 % несгоревших газов (СО и Н₂). Можно принять, что на 1 % СО содержится 0,5 % Н₂. Тогда теплота сгорания такой смеси составит 12 142 кДж/м³. Если в отходящих газах долю несгоревшего СО принять равной α , потери тепла будут равны $Q_5 = Vv_{\text{ух}}\alpha$ 1242 кДж/ч, где $v_{\text{ух}}$ — количество уходящих из печи газов, м³/кг, или м³/м³.

6. Тепло от механической неполноты сгорания (кДж/ч). Под механической неполнотой сгорания понимают различные потери топлива. Например, при сжигании твердого топлива потери составляют 3—5 %, следовательно,

$$Q_6 = (0,03 \div 0,05) BQ_{\text{н}}^p.$$

В случае газообразного топлива потери тепла от утечки газа составляют 2—3 %, тогда

$$Q_6 = (0,02 \div 0,03) BQ_{\text{н}}^p.$$

В случае жидкого топлива теряется около 1 %, т. е.

$$Q_6 = 0,01 BQ_{\text{н}}^p.$$

7. Потери тепла в результате теплопроводности через кладку. Потери тепла через свод, стены и под печи (кДж/ч) определяют по уравнению

$$Q_7 = \frac{T_{\text{кл}} - T_{\text{в}}}{s_1/\lambda_1 + s_2/\lambda_2 + 1/\alpha} F,$$

где $T_{\text{кл}}$ — температура внутренней поверхности кладки, °С; $T_{\text{в}}$ — температура окружающего воздуха, °С; s_1 и s_2 — толщина огнеупорной кладки и изоляции, м; λ_1 и λ_2 — соответственно коэффициенты теплопроводности кладки и изоляции, Вт/(м·К); α — коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху, равный 19,8 Вт/(м²·К); $1/\alpha$ соответственно равно 0,052 м²·К/Вт; F — поверхность кладки, м².

8. Потери тепла излучением через открытые окна печи, кДж/ч:

$$Q_8 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 F \Phi \varphi,$$

где C_0 — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела, равный 5,768 Вт/(м²·К⁴); T — средняя температура в печи, К; F — площадь открытого окна, м²; Φ — коэффициент диафрагмирования (см. табл. 3-1); φ — доля времени (часа), когда окно открыто.

Т а б л и ц а 3-1. Коэффициенты диафрагмирования

Ширина окна *, мм	Значение Φ при высоте окна, мм				Ширина окна **, мм	Значение Φ при высоте окна, мм			
	250	450	600	700		250	450	600	700
300	0,70	0,73	0,76	0,78	600	0,49	0,53	0,56	0,58
600	0,78	0,80	0,82	0,84	900	0,52	0,57	0,60	0,62
900	0,79	0,83	0,85	0,87	1200	0,55	0,69	0,63	0,65
1200	0,81	0,85	0,87	0,89	1500	0,56	0,61	0,64	0,67
1500	0,82	0,86	0,89	0,91					

* Толщина стенки 230 мм. * То же, 460 мм.

9. Тепло, затраченное на нагревание тары (кДж/ч). Если тара холодная, то количество тепла, требующееся на ее нагрев, составит

$$Q_9 = G_T c_T T_{\text{тар}},$$

где G_T — масса тары, кг/ч; c_T — средняя удельная теплоемкость тары в интервале температур от 0 °С до $T_{\text{тар}}$, кДж/(кг·К); $T_{\text{тар}}$ — температура нагрева тары, °С.

Если тара поступает нагретой, то учитывают только тепло, затраченное на ее дальнейшее нагревание.

10. Тепло, уносимое водой, охлаждающей отдельные части печи Q_{10} . Для определения потерь тепла на охлаждение пользуются практическими данными. Обычно эти потери составляют 10—15 % всего прихода тепла.

11. Затраты тепла на аккумуляцию его кладкой, кДж/период:

$$Q_{11} = V_{\text{кл}} \rho_{\text{кл}} c_{\text{кл}} T_{\text{кл}},$$

где $V_{\text{кл}}$ — объем кладки, м³; $\rho_{\text{кл}}$ — плотность кладки, кг/м³; $c_{\text{кл}}$ — теплоемкость кладки, кДж/(кг·К); $T_{\text{кл}}$ — средняя температура кладки, определяемая на основании расчета прогрева стен, °С.

В печах с выдвижным подом необходимо также учитывать затраты тепла на аккумуляцию огнеупорными материалами тележки. В печах периодического

действия, кроме аккумуляции тепла кладкой, тепло теряется через стены в результате теплопроводности. Затраты тепла на аккумуляцию его кладкой определяют для печей периодического действия, температура которых изменяется во времени. Тепловой баланс таких печей составляют не на 1 ч, а на весь период (цикл) их работы.

12. Неучтенные потери

$$Q_{12} = (0,1 + 0,15) (Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10} + Q_{11}).$$

Просуммировав отдельно приходные и расходные статьи теплового баланса, следует приравнять $Q_{\text{приход}} = Q_{\text{расход}}$ и получить, таким образом, одно уравнение с одним неизвестным, которым является расход топлива B . Зная величину B , можно окончательно подсчитать все статьи приходной и расходной частей теплового баланса.

Если анализируют тепловую работу действующей печи, то составляют таблицу теплового баланса, которая позволяет выяснить, какая статья расходной части баланса чрезмерно высока и, следовательно, обнаружить причину неудовлетворительной работы печи.

Для сравнения качества работы отдельных печей пользуются удельными показателями расхода тепла и топлива. Удельный расход тепла показывает, какое количество тепла затрачивается на нагрев 1 кг металла до необходимой температуры.

Часто удельный расход топлива определяют в единицах условного топлива (у. т.). За условное топливо принимают такое, теплота сгорания которого 29 330 кДж/кг. Таким образом, удельный расход топлива будет равен при $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$, выраженном в кДж/кг или кДж/м³:

$$BQ_{\text{н}}^{\text{р}}/29330G_{\text{м}} \text{ кг у.т./кг металла.}$$

Раздел II СЖИГАНИЕ ТОПЛИВА В ПЛАМЕННЫХ ПЕЧАХ

Глава 4

ПЛАМЯ И ЕГО ЗНАЧЕНИЕ В ТЕПЛОВОЙ РАБОТЕ ПЕЧЕЙ

1. Требования к пламени

В пламенных печах при сжигании газообразного или жидкого топлива образуется пламя (факел) — объем, в котором протекают и завершаются процессы сгорания горючих компонентов топлива. В пламени происходит выделение тепла, которое распространяется по печному пространству. Теплоотдача от пламени определяется в основном теплоотдающими характеристиками и условиями, в которых происходит процесс передачи тепла. Пламя является важнейшим, но лишь одним из компонентов теплообмена в рабочем пространстве печей. Наряду с пламенем в состоянии взаимного теплообмена находятся нагреваемый материал, футеровка и различные элементы печи. Все они имеют соответствующие температуру и теплообменные характеристики.

Из т. I данного учебника известно, что калориметрическая температура зависит лишь от условий сжигания топлива (коэффициента расхода воздуха, теплоты сгорания, температуры подогрева воздуха и топлива). Однако пламя, возникающее при сжигании топлива, находится не в адиабатических условиях, а в условиях интенсивного теплообмена с обрабатываемым материалом и элементами печи. Поэтому действительная температура пламени существенно отличается от калориметрической. Таким образом действительная температура пламени зависит как от величины калориметрической температуры, так и от условий теплообмена, в которых находится пламя. Действительная температура пламени в рабочем пространстве определяется назначением печи и выбирается в соответствии с технологией обработки материала. Для достижения требуемой по условиям технологии действительной температуры необходимо сжигать топливо с обеспечением соответствующей калориметрической температуры. Точное количественное соотношение между калориметрической и действительной температурой установить трудно, так как оно зависит от множества факторов.

Таким образом, первым и важнейшим требованием к пламени является обеспечение необходимого температурного уровня. Однако важную роль играет не только абсолютная величина температуры пламени, но и распределение температуры по длине и ширине рабочего пространства печи. Так как тепловой поток от пламени зависит от температуры в четвертой степени, то стремление обеспечить постепенное увеличение теплового потока от пламени на металл требует соответствующего изменения температуры пламени по длине печи.

Большое значение имеет расположение факелов в рабочем пространстве печи. Наиболее распространенными являются продольное расположение факелов, поперечное (боковое) и сводовое (вертикально в низ в сторону обрабатываемого материала). При продольном расположении факелов распределение температуры по длине пламени определяется графиком изменения температуры по длине печи. Если требуется обеспечить постепенное изменение температуры по длине печи, то необходимо обеспечить такое сжигание топлива, при котором температура пламени будет постепенно убывать по его длине. Если необходимо обеспечить наиболее высокую температуру в той зоне печи, где установлены горелки (форсунки) с ее последующим быстрым убыванием, то и способ сжигания топлива при этом должен обеспечивать соответствующий график изменения температуры газового объема (пламени). Поперечное (боковое) расположение факелов применяют в достаточно широких печах. Такое отопление должно обеспечивать не только нужную интенсивность нагрева, но и обязательно равномерность нагрева металла по ширине печи, для чего необходимо равномерное распределение температуры по длине пламени. Под сводовом расположении факелов правильное распре-

деление тепловой нагрузки по горелкам по длине и ширине печи также обеспечивает необходимый характер распределения температуры по длине и ширине рабочего пространства печи.

Основную роль в теплообмене в рабочем пространстве печи играют процессы теплообмена излучением и конвекцией. Теплообмен излучением между пламенем, кладкой и металлом зависит не только от температуры, но и от радиационных характеристик этих компонентов теплообмена, т. е. от величины их излучательной и поглощательной способности. Обрабатываемый в печи материал обычно имеет величину поглощательной способности, отличную от серого тела. Подобная картина характерна и для кладки печи. Учитывая активную роль кладки в теплообмене в рабочем пространстве пламенной печи, целесообразно радиационные характеристики пламени и кладки выбирать таким образом, чтобы обеспечивалась наивысшая величина поглощенного потока на поверхности обрабатываемого материала.

Однако создать пламя, имеющее сплошной спектр излучения, достаточно сложно. В пламени возможны практически два источника излучения: трехатомные газы (CO_2 , H_2O , SO_2) и сажистые частицы, возникшие в результате разложения углеводородов топлива при естественной или искусственной карбюрации пламени. Как известно, газы, находящиеся в пламени, имеют линейчатый спектр излучения в инфракрасной области спектра (невидимой для человека), сажистые частицы, наоборот, наибольшее количество тепловой энергии излучают в видимой для человека области спектра. Существуют различные способы сжигания топлива, при которых в пламени в результате термического разложения углеводородов топлива возникают сажистые частицы. Чем больше углеводородов в топливе, тем больше возможность для создания светящегося пламени.

Роль пламени не ограничивается его участием в теплообмене излучением. Пламя (факел) образуется струями топлива и воздуха и является важнейшей составляющей общего движения газов в печах. Движение газов определяет такие решающие факторы работы печей, как теплоотдача конвекцией и равномерность распределения температуры по рабочему объему печи.

В отдельных случаях (мартеновские печи) настильное пламя (факел) является важнейшим компонентом массообменных процессов на границе раздела фаз. Факельные струи оказывают влияние и на распределение давления по длине и высоте печи, от чего в свою очередь зависит качественный уровень работы печного агрегата, так как изменение давления вызывает нормальные или излишние подсосы холодного воздуха в печь и выбивание раскаленных газов из печи.

В ряде случаев к пламени предъявляются требования по ограничению его аэродинамической длины. Наибольшее значение это имеет при боковом расположении факела. Факельная струя раскаленных газов, несущая частицы сажи, окалины, ударяя о про-

тивоположную стенку, оказывает на нее разрушающее влияние. Поэтому допустимая аэродинамическая длина пламени должна строго увязываться с продолжительностью, в которой происходит сжигание топлива.

Таким образом, пламя должно отвечать следующим основным требованиям:

1) иметь максимально необходимую для данного типа печи температуру;

2) иметь целесообразное распределение температуры по объему печи и обеспечивать наивысший уровень теплоотдачи излучением и конвекцией;

3) в необходимых случаях должно обеспечивать должное развитие массообменных процессов;

4) влияние факельных струй на характер движения газов в печах должно быть позитивным — способствуя выравниванию температуры и развитию процессов конвективного теплообмена, факельные струи не должны разрушать элементов печи и не должны приводить к подсосу холодного воздуха в печь и чрезмерному выбиванию раскаленных газов.

Из вышесказанного ясно, что, кроме температуры и ее изменения по длине пламени, большое практическое значение имеют аэродинамические и теплообменные характеристики пламени.

2. Характеристики пламени

Общие характеристики

Как при кинетическом, так и при диффузионном способе сжигания топлива факелы представляют собой сложные струи, оказывающие значительное влияние на аэродинамику рабочего пространства печи в целом. Наиболее распространенный на практике диффузионный факел газового и жидкого топлива образуется струями топлива и воздуха, выходящими с большой скоростью из горелки или форсунки. Струи могут встречаться под различными углами друг к другу, что оказывает существенное влияние на скорость смешения топлива с окислителем и обеспечивает вместе с тем подсос продуктов сгорания из окружающего факел газового объема, создавая тем самым циркуляцию газов в рабочем пространстве печи. Возникновению подсоса в корень факела окружающих продуктов сгорания и созданию циркуляции способствуют два обстоятельства: инжектирующее действие факельных струй и (очень часто) увеличение статического давления по длине факела, что присуще струе, истекающей в ограниченное пространство. Повышенное давление в «хвосте» факела способствует возникновению циркуляционных потоков от конца факела к его началу.

В печах обычно используют не одну горелку (форсунку), а их группы. В одних случаях факелы направлены в одну сторону,

в других в противоположную, над нагреваемым металлом и под ним и т. д. Поэтому аэродинамические характеристики факела и расположение горелок (форсунок) оказывают решающее влияние на картину движения газов в печи в целом или в отдельной ее зоне.

В связи с большой сложностью явлений, происходящих в диффузионных факелах, первоначальные исследования аэродинамики факелов основывались на закономерностях, присущих свободной затопленной струе. Было проведено много исследований, посвященных изучению процессов аэродинамики и горения струи газообразного топлива, свободно истекающей в окружающее пространство. Главной целью таких исследований было определение зависимости длины свободного факела от влияния различных факторов. Обычно различают аэродинамическую и химическую длину факела. Аэродинамическая определяется как длина от среза горелки до точки на оси пламени, где скорость равна нулю. Химическая длина — это расстояние от среза горелки до участка факела, где уже отсутствует горение. В качестве примера можно привести полученное П. В. Левченко и Б. И. Китаевым выражение для определения длины факела, м:

$$L_{\phi} = K \omega_0^{0.34} d_0^{6.83}, \quad (4-1)$$

из которого видно, что длина факела растет по мере увеличения скорости истечения топлива ω_0 и диаметра газовой трубки d_0 . В этом выражении K — опытный коэффициент, равный 1,0 для коксового газа и 0,65 для генераторного газа.

Диффузионный факел значительно отличается от свободного горящего и обычно образуется двумя спутными (чаще всего коаксиальными) потоками газа и воздуха или потоками, поданными под углом друг к другу или закрученными один относительно другого. В связи с этим нельзя сделать конкретных практических выводов на основании исследования затопленных диффузионных факелов, но ряд рекомендаций можно дать.

Обычно приходится решать один из двух вопросов: или выбрать горелку по величине расхода топлива и требованиям к факелу, или при установленной горелке решать вопрос о длине пламени и других его характеристиках в зависимости от ряда режимных параметров.

На практике бывают ситуации, когда на печах, оборудованных горелками определенных конструкций, приходится изменять режимные параметры их работы. Эти изменения могут носить как кратковременный, так и достаточно долговременный характер. Часто они бывают вынужденными. К режимным параметрам работы горелок, а следовательно, и печей могут быть отнесены следующие: теплота сгорания топлива, тепловая нагрузка (расход топлива в единицу времени), расход воздуха, температура подогрева воздуха, газа. Изменение этих характеристик влечет

за собой как следствие изменение скоростей выхода из горелки газа и воздуха и величины коэффициента расхода воздуха.

В практических условиях по производственным причинам возможно изменение теплоты сгорания топлива, которое не может не оказывать влияния на длину пламени. Чем больше теплота сгорания топлива, тем больше воздуха необходимо для сжигания единицы такого топлива. Поэтому, если расход топлива не меняется, а происходит изменение теплоты его сгорания, то длина факела также будет меняться. Причем при увеличении теплоты сгорания длина факела должна увеличиваться, при уменьшении сокращаться.

Горелочные устройства обычно выбирают, исходя из каких-то наиболее оптимальных для данной печи расходов газа и воздуха. Изменение этих расходов (без изменения, естественно, выходных сечений горелок) влечет за собой изменение скоростей истечения и отклонение от оптимальных условий смешения. Это сказывается на условиях смешения и на характере тепловыделения, приводит к изменению длины факела, его температуры и теплоотдачи. Сложность процессов, происходящих в факеле при изменении расходов топлива и воздуха, усложненных индивидуальными особенностями конструкций горелок, столь велика, что однозначных точных выводов сделать не представляется возможным. С определенной степенью приближения можно считать, что увеличение тепловой нагрузки приводит к увеличению длины факела, повышению его температуры и теплоотдачи излучением.

Влияние коэффициента расхода воздуха на длину факела особенно резко сказывается при работе пламенных горелок. Так, можно считать, что увеличение величины коэффициента расхода воздуха с 1,05 до 1,4 уменьшает длину факела газового топлива вдвое. При работе горелок с предварительным смешением длина факела от величины коэффициента расхода воздуха зависит незначительно.

Использование подогретых воздуха и газа благоприятно влияет на развитие процессов смешения и горение, в результате чего укорачивается факел, повышается скорость достижения температуры воспламенения, увеличивается скорость горения и обеспечивается тем самым более интенсивное тепловыделение в факеле. При этом также повышается калориметрическая и действительная температура факела и увеличивается, как следствие, теплоотдача излучением.

Для конструирования горелок и управления тепловым режимом печи необходимы возможно более точные представления о влиянии различных параметров на характеристики пламени. В силу сложности явлений в этой области еще много неисследованных вопросов. Для реального факела, образованного струями топлива и воздуха, решающую роль играют процессы смешения.

Радиационные характеристики

Как уже отмечалось, пламя является основным теплоотдающим компонентом в пламенных плавильных и нагревательных печах. В подавляющем большинстве случаев основную часть тепла пламя передает излучением. При этом излучение пламени зависит как от его температуры, так и от его радиационных характеристик, под которыми подразумеваются интегральные и спектральные излучательные и поглощательные характеристики (спектральная и интегральная степени черноты ϵ_λ и ϵ ; спектральный и интегральный коэффициенты поглощения a_λ и a).

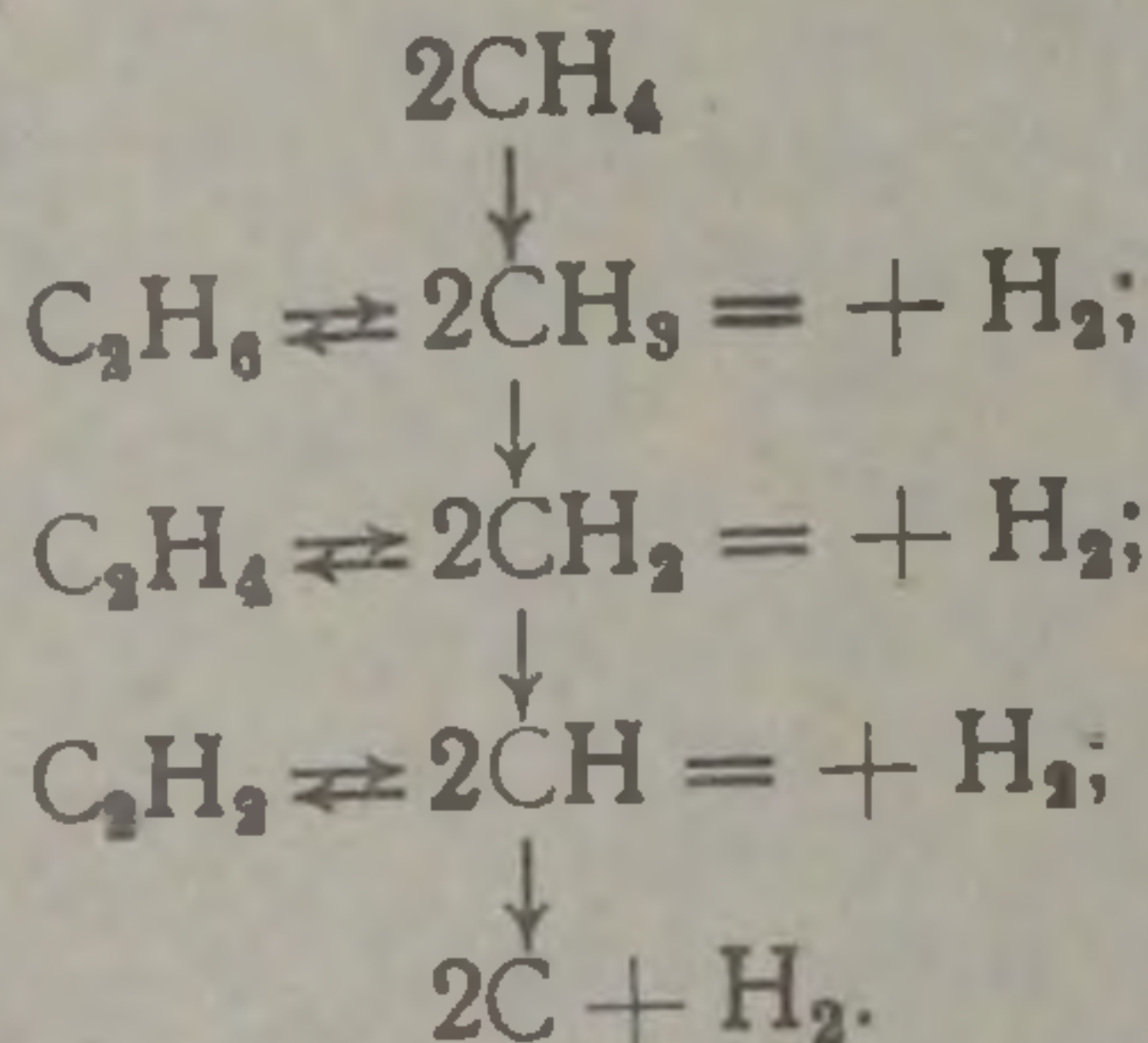
В пламени топлива в состав продуктов сгорания входят трехатомные газы (CO_2 , H_2O , а иногда SO_2), которые и вызывают тепловое излучение. Излучение трехатомных газов происходит в основном в инфракрасной области спектра и носит селективный характер, в результате чего излучение пламени, содержащего лишь газообразные продукты сгорания, не воспринимается человеческим глазом (см. том 1, гл. 21). Вместе с тем в ряде случаев газообразный объем пламени содержит взвешенные в нем различные сажистые образования, возникшие в результате разложения углеводородов топлива. Эти сажистые образования имеют сплошной спектр излучения (но не серый), включающий в себя и видимую человеком область от 0,4 до 0,76 мкм. Применительно к таким пламенам применяют термин «светимость пламени», а сами пламена называют светящимися. В светящихся пламенах излучение газообразных продуктов сгорания в соответствующих частях спектра накладывается на излучение сажистых частиц, взвешенных в газовом объеме пламени. Очевидно, что светящееся пламя может возникать лишь при сжигании таких топлив, которые содержат в своем составе достаточное количество углеводородов. Обычно это относится к жидкому топливу, природному газу, в меньшей степени к коксовому газу. Доменный и генераторный газы не могут обеспечить светимость пламени, так как не имеют в своем составе углеводородов. При сжигании этих газов может образоваться лишь несветящееся пламя.

Разложение углеводородов топлива с выделением новой дисперсной фазы (сажи) может происходить при их нагреве как в присутствии окислителя так и без него. В первом случае говорят об окислительном, во втором — о термическом пиролизе углеводородов.

При сжигании распыленного жидкого топлива в пламени создаются очень благоприятные условия для разложения жидких углеводородов топлива с выделением сажистых образований, обеспечивающих высокую излучательную способность факела. Этому же способствует возникновение углеродистого остатка при интенсивном испарении и горении капли. В силу этих причин при сжигании мазута создается светящийся факел, характеризуемый высокой излучательной способностью. Поэтому мазут в ряде

случаев используют в качестве искусственного карбюризатора, добавляя его к газообразному топливу с целью повышения (или создания) излучательной способности пламени. Природный газ состоит почти полностью из метана, в коксовом газе содержание метана составляет 25—30 %. Поэтому механизм термического разложения углеводородов рассмотрим на примере метана.

Многочисленными исследованиями установлен цепной характер процесса разложения метана, протекающего с образованием различных промежуточных продуктов. Предложен ряд схем разложения метана, из которых одна из наиболее достоверных выглядит следующим образом:



Причем свободные радикалы CH_3 , CH_2 , CH могут полимеризоваться в промежуточные продукты ароматического ряда. Характер разложения метана зависит от температурно-временных условий процесса, что достаточно четко характеризуется данными приведенными на рис. 4-1.

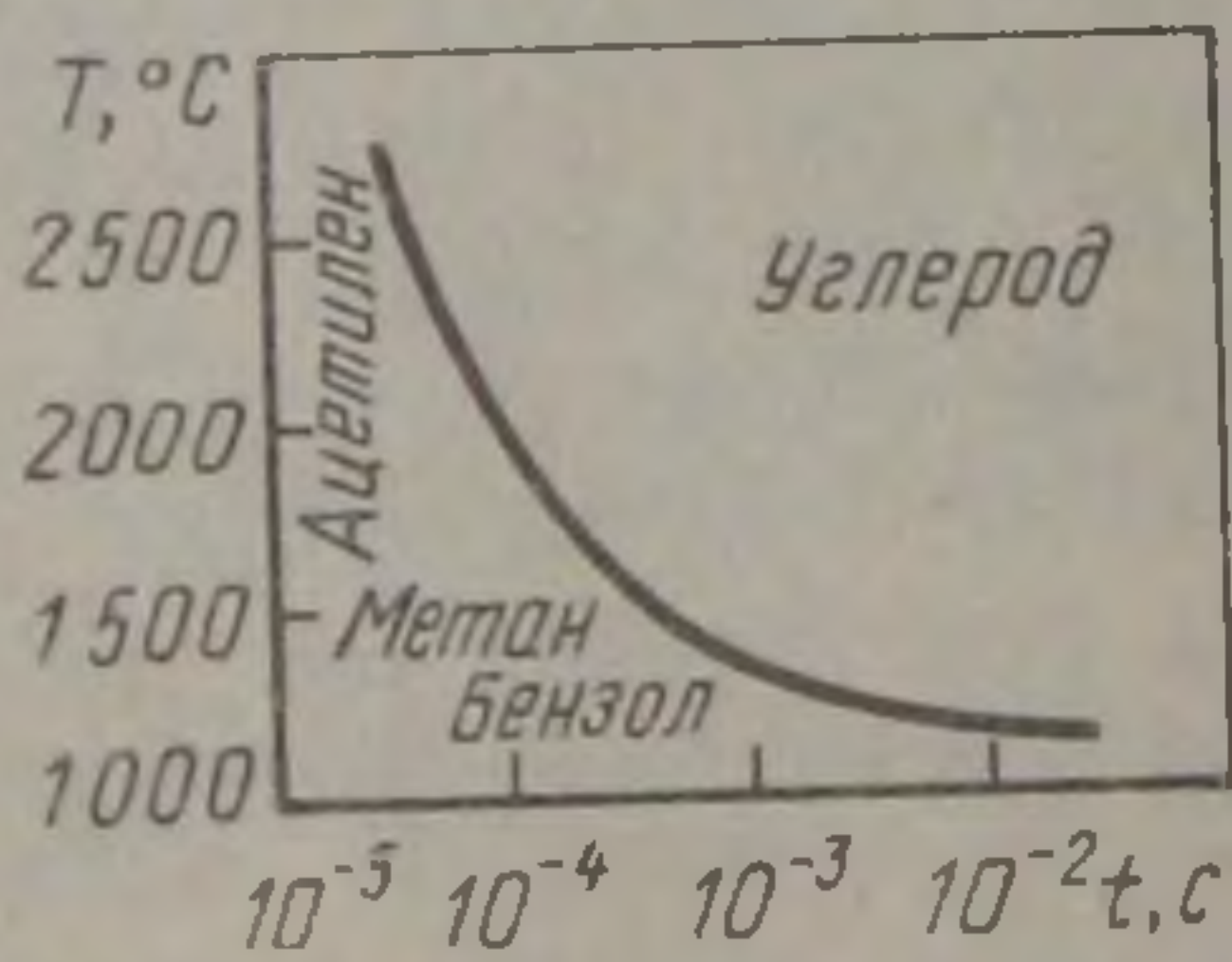


Рис. 4-1. Зависимость выхода продуктов реакции термического разложения метана от температуры и времени

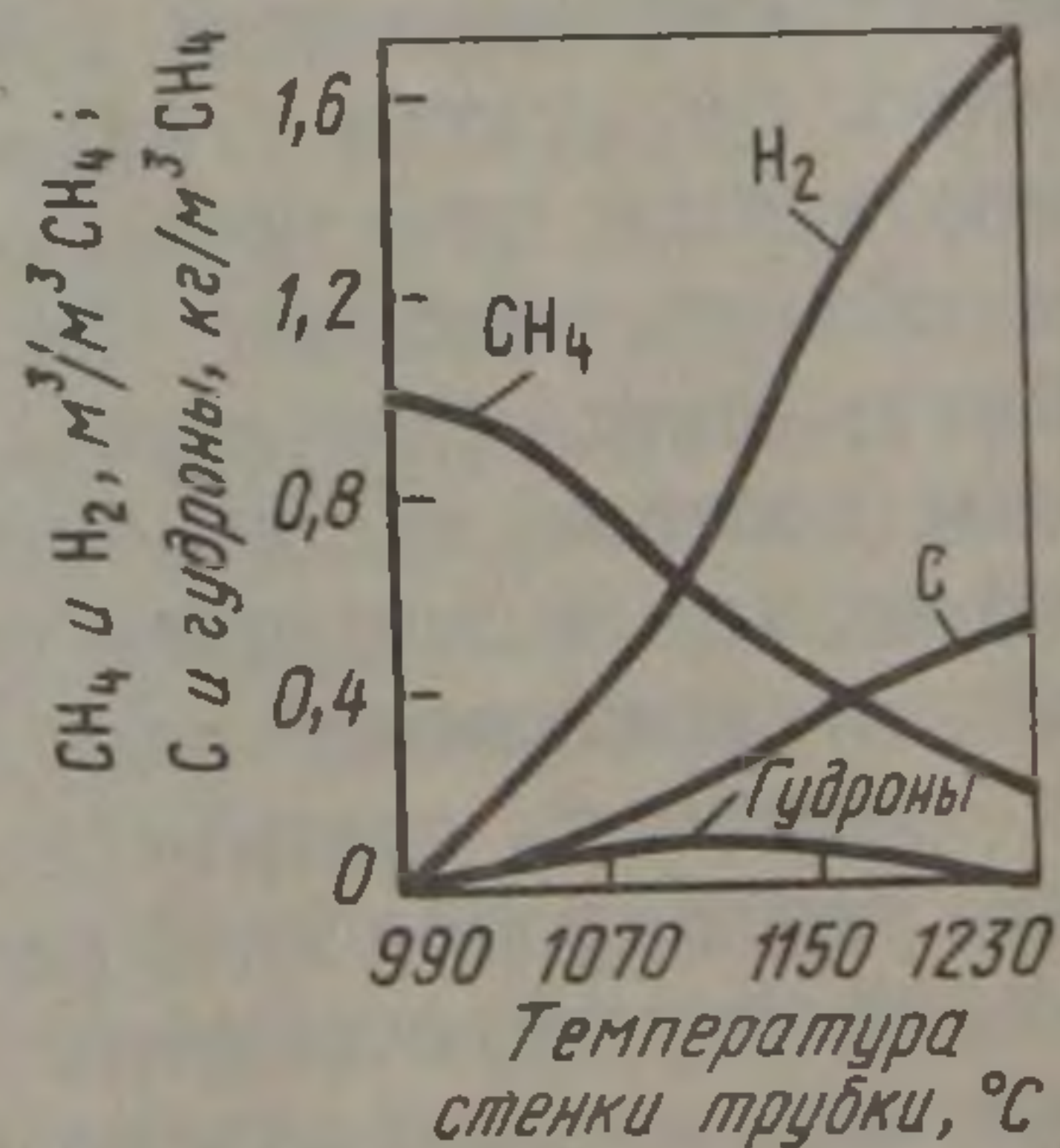


Рис. 4-2. Превращение метана в газоподогревателе

Для практического использования природного газа необходимо знать, при каких условиях следует выполнять его разложение, чтобы получить наивысший радиационный эффект пламени. С этой целью были проведены специальные исследования, при которых газ предварительно реформированный при определенных температурах и продолжительности процесса, подавался в пламя, излучение которого измерялось. Оказалось, что пламя имеет максимальное излучение при реформировании в пределах тем-

ператур 1050—1100 °С и продолжительности процесса ~0,3—0,5 с. Было установлено, что максимум излучения пламени соответствует максимальному количеству промежуточных продуктов разложения (гудронов) при монотонном возрастании количества сажистого углерода С (рис. 4-2).

Следует отметить, что развитие процесса реформирования метана может характеризоваться величиной степени разложения метана, равной отношению разложившейся части метана к его исходному количеству $[(\text{CH}_4^{\text{исх}} - \text{CH}_4)/\text{CH}_4^{\text{исх}}]$, где CH_4 — количество неразложившегося метана]. Эксперименты показали, что максимальное количество промежуточных продуктов разложения при температурно-временных условиях образуется при величине степени разложения, равной 0,4—0,5. Как показали электронно-микроскопические исследования, размеры сажистых частиц в пределах образования промежуточных продуктов разложения метана составляют 150—200 нм (являясь, по-видимому, агломератами более мелких полужидких и твердых частиц), тогда как вне этих пределов размеры частиц сажистого углерода не превышают 10—30 нм.

При отмеченных температурно-временных характеристиках процесса пиролиза метана наблюдается резкое увеличение излучательной способности пламени, что и приводит к общему увеличению теплоотдачи излучением от пламени природного газа. Объяснение этому факту следует искать в зависимости излучательной способности пламени от концентрации, размера сажистых частиц и их радиационных свойств, которая устанавливается законом Бугера—Бера:

$$\varepsilon_\lambda = a_\lambda = 1 - \exp\left(-k_{\lambda, \text{погл}} N \frac{\pi d^2}{4} l\right), \quad (4-2)$$

где ε_λ — спектральная (монохроматическая) степень черноты (излучательная способность) пламени, равная, как известно по закону Кирхгофа, спектральной поглощательной способности a_λ ; $k_{\lambda, \text{погл}}$ — спектральный коэффициент поглощения; N — штучная концентрация сажистых частиц, шт/м³; d — диаметр сажистых частиц, м; l — толщина пламени, м. Однако контролировать процесс реформирования по штучной концентрации практически невозможно, поэтому чаще пользуются концентрацией по массе G , г/м³. В этом случае, если принять плотность сажистых частиц равной 2 г/см³, G выразить в граммах, деленных на метр кубический, d — в микрометрах, а l — в метрах, формула Бугера—Бера приобретает следующий вид:

$$\varepsilon_\lambda = 1 - \exp\left(-0,75 k_{\lambda, \text{погл}} \frac{G}{d} l\right). \quad (4-3)$$

Все входящие в выражения (4-2) и (4-3) величины в соответствующей мере определяют значение величин ε_λ , интегральной

излучательной способности и общие радиационные характеристики пламени.

Современная наука изучает светящиеся пламена, используя положение теории мутной среды, разработанной английским физиком Ми. К мутным относятся такие среды, в которых одно вещество, находящееся в мелкодисперсном состоянии, взвешено в другом веществе. Светящееся пламя, в котором взвешены мельчайшие сажиные частицы, представляет собой один из примеров мутной среды. Согласно теории мутных сред, ослабление лучистого

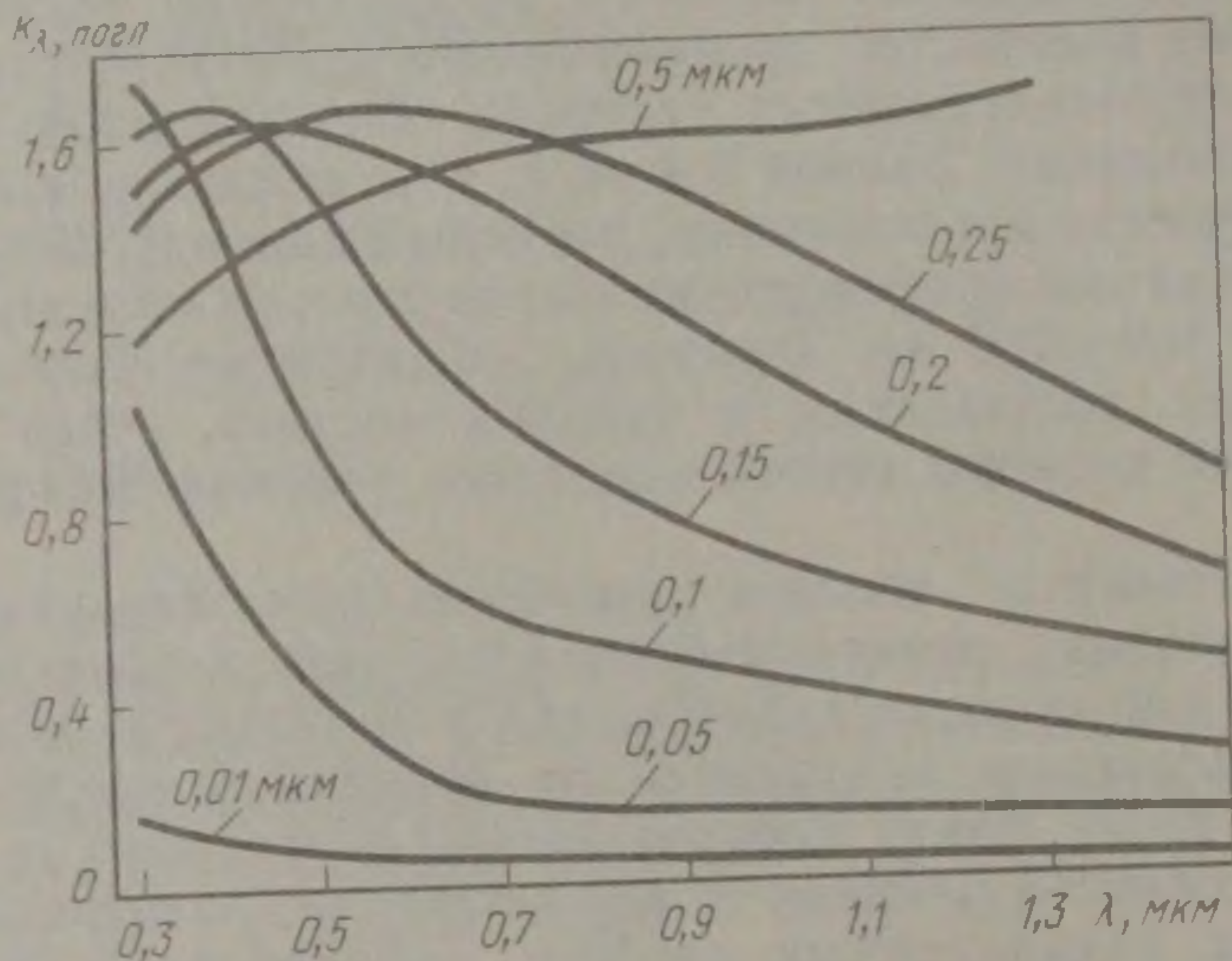


Рис. 4-3. Зависимость величины коэффициента поглощения от длины волны для частиц различного диаметра

потока, проходящего через объем такой среды, будет происходить как в результате поглощения, так и в результате рассеяния, таким образом

$$k_{\lambda, \text{осл}} = k_{\lambda, \text{погл}} + k_{\lambda, \text{расс}}$$

Все эти коэффициенты зависят от параметра $\rho = \pi d/\lambda$ (d — диаметр частиц, λ — длина волны) и комплексного показателя преломления $m = n - ik$, где n — показатель преломления; k — показатель поглощения.

Таким образом, комплексный показатель преломления представляет собой характеристику, зависящую от физико-химических свойств материала частицы. Установлено, что при $\rho \ll 1$ рассеяние очень мало и им можно пренебречь. Следовательно, коэффициент $k_{\lambda, \text{погл}}$ потока сажиных частиц (при определенных, свойственных им значениях m) зависит от размера частиц и длины волны. Эта зависимость представлена на рис. 4-3, из которого видно, что мелкие сажиные частицы [см. выражение (4-3)] обладают меньшей излучательной способностью, чем крупные.

Как следует из выражения (4-2), влияние штучной концентрации на излучение пламени весьма значительно. Так как частицы

различных размеров имеют не одинаковый коэффициент поглощения, то целесообразно оценить относительные количества мелкой $G_{м.о}$ и крупной $G_{кр.о}$ сажи, обеспечивающих одинаковый радиационный эффект. Это важно еще и с той точки зрения, что образование сажи всегда приводит к определенному недожогу и тем самым снижает температуру пламени. Предварительно надо реформировать минимально необходимую часть газа. Значения соотношения $K = G_{м.о}/G_{кр.о}$, рассчитанные для длины волны 0,65 мкм, приведены ниже:

Мелкая сажа, нм	10	10	10	50	50	50
Крупная сажа, нм	100	150	200	100	150	200
K	1,21	2,7	3,05	1,19	2,1	2,9

Как видно, увеличение концентрации мелкой сажи очень значительно и потому практически неприемлемо. Так, для того чтобы увеличить концентрацию сажи с 1 до 2 и 3 г/м³ продуктов сгорания, необходимо увеличить долю метана, затраченного на образование сажи, соответственно с 15,4 до 30,8 и 46,2 %, что неприемлемо по отмеченным выше причинам.

Толщина слоя пламени l также оказывает значительное влияние на излучение пламени. Расчеты показывают, что при сравнительно умеренной концентрации сажистых частиц в пламени, равной 1 г/м³, пламя толщиной более 0,7 м будет иметь величину $\epsilon_{\lambda} \approx 1$. В практических условиях разложение метана может протекать и в присутствии окислителя (обычно воздуха), когда часть метана сгорает, обеспечивая соответствующую температуру, а неокисленная часть метана подвергается разложению. Исследования показали, что в этом случае все вышесказанные рассуждения применимы по отношению к неокисленной части метана, к которой также применим закон Аррениуса

$$K_{эфф} = A \exp(-E/RT) \quad (4-4)$$

с величинами A и E , соответствующими процессу пиролиза метана (как в присутствии окислителя, так и без него). Величина $K_{эфф}$ может быть использована для определения степени разложения метана

$$r = 1 - \exp(-K_{эфф} l). \quad (4-5)$$

Величины, входящие в выражения (4-4) и (4-5), связывают между собой все необходимые температурно-временные характеристики процесса термического и окислительного пиролиза метана. На практике обычно встречается окислительный пиролиз метана, протекающий чаще всего при высоких температурах и малых значениях времени разложения, что приводит к образованию мелкой сажи, которая дает невысокую излучательную способность пламени, быстро выгорает и не обеспечивает светящийся факел достаточной длины. Светящийся факел природного газа может быть получен и без предварительного разложения

газа. Это имеет место, например, на нагревательных печах, в которых используются горелки типа труба в трубе. В этом случае за счет медленного смешения газа с воздухом в факеле образуются микрообъемы с недостатком окислителя, где происходит частичное разложение метана с образованием мелкодисперсной сажи. Процесс этот очень неустойчивый, светимость факела невелика и недолговечна, тогда как и для нагревательных печей бывает целесообразно иметь факел, излучающий по всему спектру, поскольку нагреваемый металл имеет сплошную по спектру поглощающую способность.

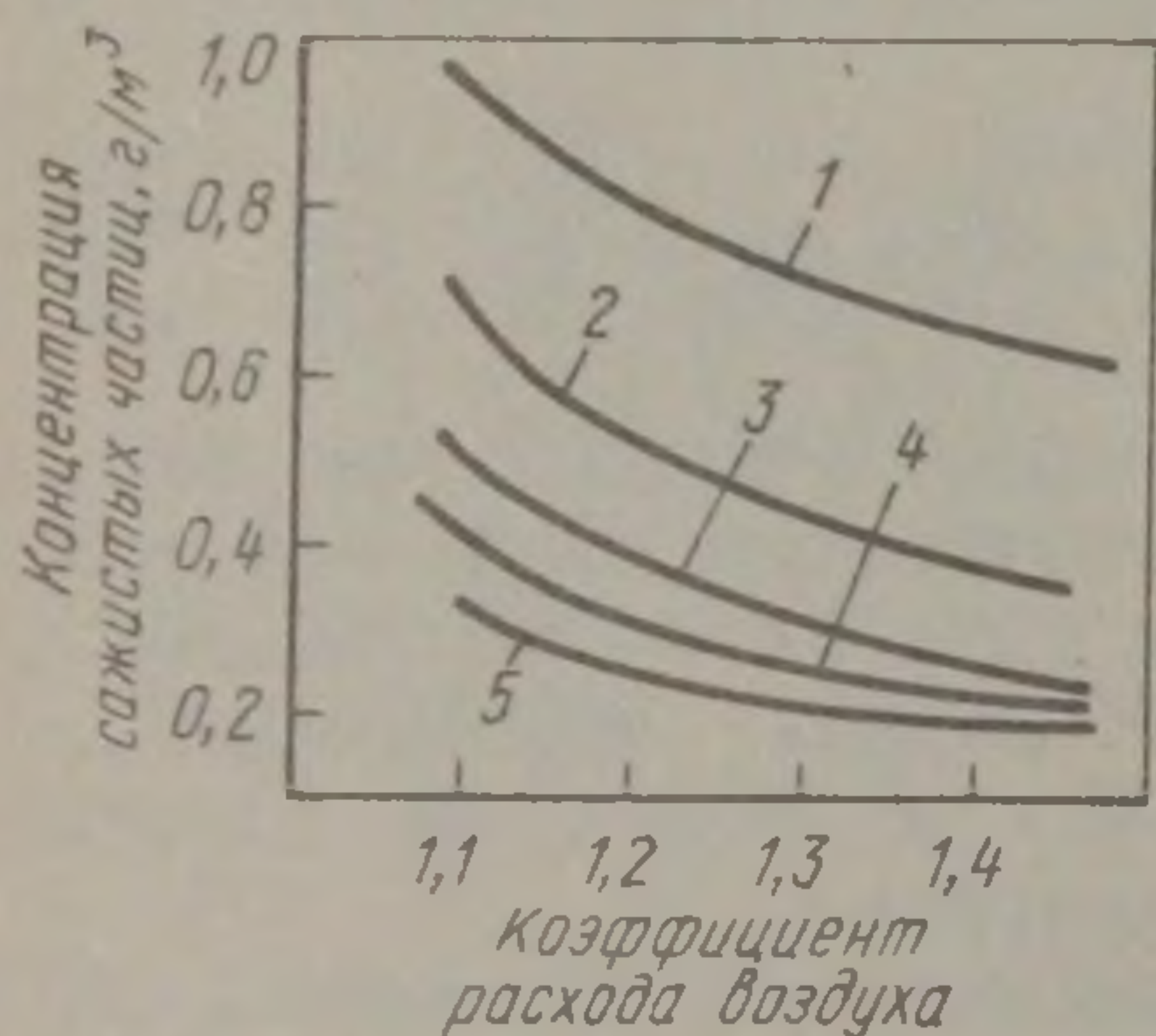


Рис. 4-4. Зависимость средней (по сечению факела) концентрации сажистых частиц в пламени мазута от коэффициента расхода воздуха при расстоянии от горелки, мм:

1 — 335; 2 — 560; 3 — 975, 4 — 1640, 5 — 1950

ного факела посвящено ряд исследований, подтвердивших правомерность приложения положений теории мутных сред к этим пламенам.

Как следует из вышеизложенного, наибольшее влияние на радиационные характеристики пламени оказывает размер сажистых частиц, от которого зависят величины коэффициентов ослабления и параметра ρ . Размер сажистых частиц в пламенах жидкого топлива определялся многими исследованиями, однако полученные данные очень разноречивы. Можно считать, что размер сажистых частиц в пламенах жидкого топлива лежит в пределах от 10 до 200 мкм (при определенном распределении сажистых частиц по размерам), т. е. значительно крупнее, чем в пламенах газообразного топлива. Концентрация сажистых частиц в пламени мазута существенно изменяется по длине пламени и в значительной степени зависит от коэффициента расхода воздуха, что подтверждается данными, приведенными на рис. 4-4.

Существенное влияние на процесс сажеобразования оказывает соотношение между содержанием углерода и водорода в топливе C/H и испаряемость жидкого топлива, характеризуемая его температурой кипения. Чем выше C/H и ниже испаряемость топлива, тем выше при прочих равных условиях уровень концентрации сажистых частиц в пламени.

Таким образом, светящееся пламя газообразного и жидкого топлива представляет собой крайне сложное явление природы, изучение которого требует точнейших методов и большой тщательности. Для расчета излучения светящегося пламени используют уравнение Бугера—Бера с последующим интегрированием величины ϵ_λ по спектру:

$$E = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} \epsilon_\lambda E_{0\lambda} d\lambda,$$

где $E_{0\lambda}$ — излучение абсолютно черного тела по Планку; ϵ_λ — излучательная способность пламени.

Расчет должен учитывать изменение температуры и излучательной способности пламени по его длине. Все это говорит о том, что расчет излучения светящегося пламени — это сложная теплофизическая задача, окончательное решение которой требует еще больших усилий.

3. Условия смешения топлива с воздухом

Важнейшим фактором, определяющим характеристики пламени, является качество смешения топлива с окислителями, обычно с воздухом. Влияя на температуру горения, качество смешения оказывает существенное влияние на распределение температуры и изменение радиационных характеристик вдоль пламени. В наибольшей степени это относится к случаю гомогенного горения газообразного топлива. Однако и при факельном сжигании жидкого топлива (наиболее часто встречающийся в пламенных печах случай гетерогенного горения) это влияние имеет место.

Как известно из теории гомогенного горения, процесс сгорания складывается из физического процесса обеспечения контакта между молекулами топлива и окислителя (процесс смешения) и химического процесса взаимодействия топлива и окислителя. Процесс смешения, связанный с молярной и молекулярной диффузией, гораздо более продолжителен, чем процесс собственно горения. Поэтому, изменяя условия смешения, можно либо ускорить, либо затянуть сжигание топлива и тем самым придать пламени (факелу) желаемые характеристики. Следует отметить, что изменение условий смешения является по существу тем единственным средством, с помощью которого можно изменять характер распределения температуры и радиационные характеристики по длине пламени.

Как уже упоминалось, при кинетическом методе сжигания смешение топлива с окислителем осуществляется предварительно до попадания в зону горения, в которой происходит лишь практически мгновенно химическое взаимодействие молекул топлива с окислителем. В силу этого на очень небольшой длине пламени происходит концентрированное выделение тепловой энергии и до-

стигается высокая температура (рис. 4-5), развивается высокая теплоотдача от факела, в результате чего температура довольно быстро убывает по длине пламени. Такой метод сжигания топлива применяют в тех случаях, когда в небольшом печном объеме необходимо создание высокой температуры с целью обеспечения интенсивной теплоотдачи пламени на обрабатываемый материал для достижения высокой (именно в этой зоне) интенсивности его нагрева.

В противоположность кинетическому при диффузионном методе сжигания газообразного топлива смешение переносится

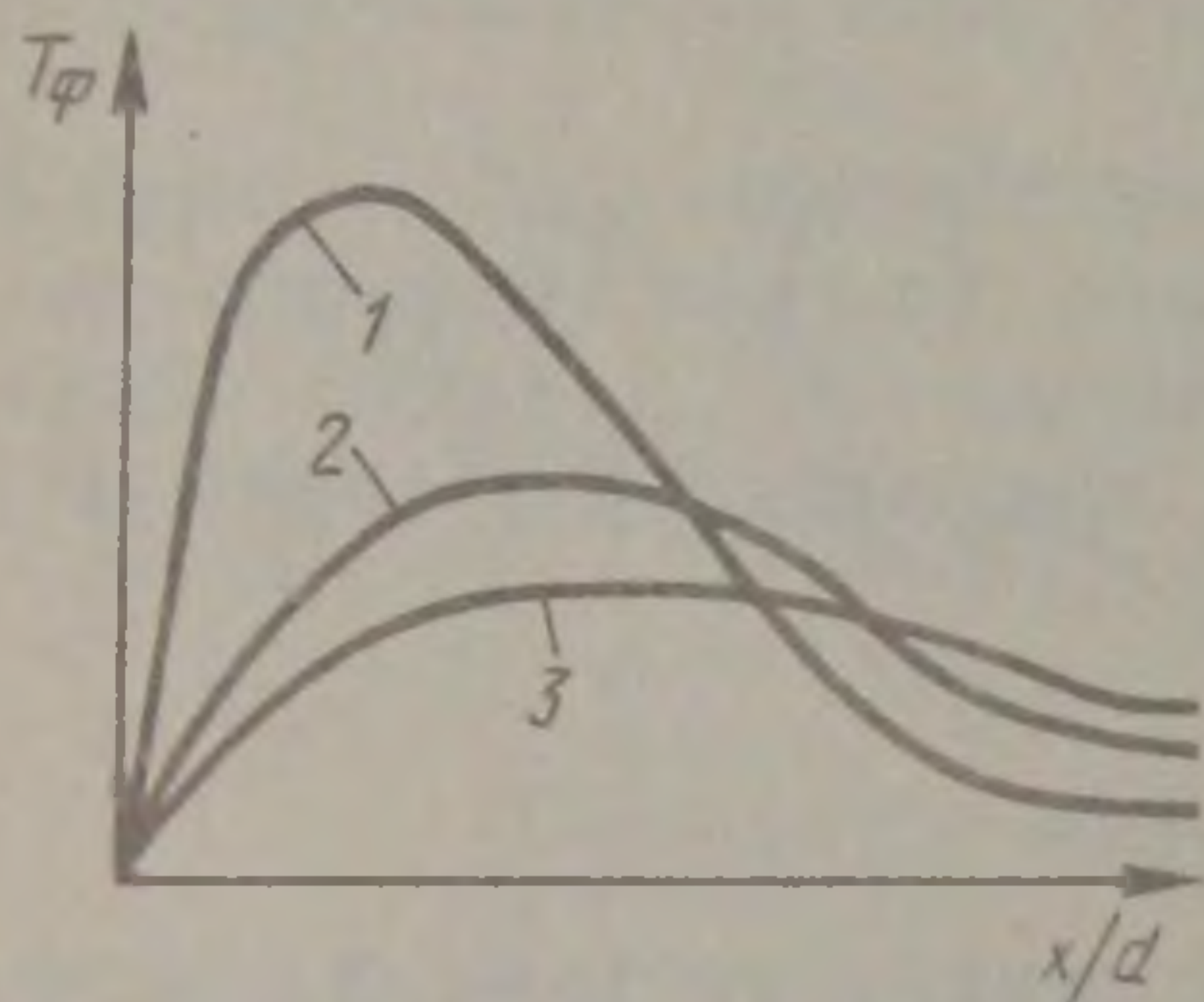


Рис. 4-5. Зависимость температуры факела по его длине от метода смешения газообразного топлива и воздуха (качественная зависимость): 1 — предварительное смешение; 2 — закрученный диффузионный факел; 3 — коаксиальный диффузионный факел

в топочный объем печи. Условия смешения при этом могут быть весьма разнообразными и зависят от требуемых характеристик пламени. Чем медленнее осуществляется смешение (см. рис. 4-5, кривые 2 и 3), тем медленнее происходит выгорание горючих составляющих топлива, тем выше значение химической длины факела, тем менее концентрированно происходит выделение тепловой энергии. Это в свою очередь приводит к более монотонному изменению температуры по длине факела, а следовательно, и теплоотдачи от него.

Оптимальная конструкция горелочного устройства должна прежде всего обеспечить целесообразные условия смешения топлива с воздухом, целесообразные с точки зрения создания факела с необходимыми для данной конструкции печи аэродинамическими и теплообменными характеристиками. Учитывая, что изменение условий смешения важнейшее средство влияния на характеристики факела, необходимо прежде всего рассмотреть вопрос о том, какие факторы оказывают влияние на процесс смешения. Следует отметить, что теория в ряде случаев не дает ответа на вопросы о характере развития процессов смешения, поэтому бывает необходим эксперимент.

Наиболее распространенным является диффузионное сжигание газообразного топлива при подаче газа и воздуха спутными или пересекающимися потоками. Конструкции печей и их назначение очень разнообразны, поэтому на практике бывают необходимы факелы, различные по длине, температуре, тепломассообменным характеристикам. Для создания таких факелов применяются различные способы смешения газообразного топлива с воздухом. Наиболее распространенные способы смешения могут быть подразделены на три большие группы:

смешение при спутном (чаще всего коаксиальном) способе подачи топлива и воздуха;

смешение при подаче струй топлива и воздуха под углом друг к другу при помощи различных приспособлений;
смешение при придании одному (обычно воздуху) из потоков вращательного движения.

Применяются также такие приемы смешения, как дробление струй смешивающихся газов на несколько мелких струй или установка перед выходом газа и воздуха в рабочее пространство печи турбулизирующих устройств (лопатки под углом к направлению движения, специальные вставки, разбивающие поток и др.).

Несколько обособленное значение имеет применение так называемого разомкнутого факела, который используется в плоско-пламенных и керамических горелках, предназначенных для обеспечения высокой теплоотдачи от обогреваемой ими керамической поверхности свода печи, горелочного камня или корпуса в случае керамических горелок.

Рассмотрим кратко результаты, достигаемые при применении отмеченных выше способов смешения газообразного топлива с воздухом.

Изучению смешения при спутном (чаще всего коаксиальном) движении газообразного топлива и воздуха посвящены многочисленные исследования. В реальном факеле подобного типа происходит смешение трех компонентов: газа, идущего по внутреннему соплу; воздуха, идущего по наружной трубке кольцевого сечения, и окружающей среды, т. е. продуктов сгорания. Уже первые исследования подобных течений подтвердили автономность течения по отношению к абсолютным значениям скоростей, т. е. независимость аэродинамической картины от абсолютных значений скоростей потоков при том же их соотношении. Таким образом, в коаксиальных спутных струях смешение зависит от следующих факторов: соотношения скоростей истечения внутреннего и облегающего потоков и относительных размеров центрального и облегающего потока.

Проведенные расчеты, подкрепленные экспериментом, показали, что увеличение относительной скорости облегающего потока значительно интенсифицирует процесс смешения газа с воздухом. Вместе с тем при этом интенсифицируется процесс подмешивания в струю продуктов сгорания из окружающей среды. Изменение относительных размеров истекающих потоков оказывает на процесс смешения также значительное влияние. Так, увеличение толщины облегающего потока (при одном и том же соотношении скоростей) приводит к некоторому улучшению смешения газа с воздухом, но значительно уменьшает проникновение продуктов сгорания в струю газа и воздуха.

При сжигании любого газа обычно поддерживается вполне определенная величина расхода воздуха, поэтому соотношение расходов воздуха и газа также является величиной вполне определенной. Таким образом, для изменения скорости истечения облегающей воздушной струи при неизменном расходе воздуха

необходимо изменять размер воздушного сопла, что приводит, естественно, к влиянию на смещение одновременно двух факторов: скорости истечения и толщины облегающего потока.

Выяснение одновременного влияния на процесс смешения изменения соотношения начальных скоростей истечения и диаметров сопел показало, что увеличение начальной скорости облегающей струи (при неизменной скорости центрального потока) оказывает более сильное влияние на процесс смешения, чем уменьшение размера облегающего потока. Таким образом наиболее эффективным средством интенсификации процесса смешения в коаксиальных струях при сохранении постоянной величины соотношения воздух/газ является увеличение относительной скорости истечения газовых потоков, чем обычно и пользуются на практике.

Перемешиванию струй, направленных под углом друг к другу, были посвящены специальные эксперименты, которые показали, что наибольшая степень перемешивания достигается при углах встречи $\varphi = 90^\circ$, наименьшая — при углах встречи менее 45° . Для определения глубины проникновения одной струи в другую Ю. В. Ивановым было получено следующее выражение:

$$\frac{h}{d} = K_c \frac{\omega_2}{\omega_1} \sqrt{\rho_2/\rho_1}, \quad (4-6)$$

где h — глубина проникновения, м; d — диаметр струй в выходном сечении, м; $\omega_1, \omega_2, \rho_1, \rho_2$ — скорость струй на выходе из сопла и плотность истекающих газов соответственно, м/с и кг/м³; K_c — опытный коэффициент, зависящий от угла встречи: при $\varphi = 90^\circ$ величина $K_c = 2,2$.

При смешении многоструйного потока одного газа с общим потоком другого лучшие результаты достигаются также при $\varphi = 90^\circ$. Выражение (4-6) справедливо и для расчета глубины проникновения мелких струй в газовый поток. В этом случае на величину h/d влияет относительный шаг s/d между мелкими струями, что учитывается тем же опытным коэффициентом K_c :

s/d	16	18
K_c	1,9	1,7

Как уже указывалось, при конструировании и эксплуатации горелок для ускорения смешения газа с воздухом используют различные приемы, турбулизирующие поток воздуха, а иногда и газа. Чаще всего применяют закручивание воздушного потока до его выхода в зону смешения с газом с помощью воздушного патрубка, имеющего улиткообразную форму. Закрученные течения имеют ряд особенностей, отличающих их от прямоструйных течений, главными из которых являются следующие: больший угол расширения, меньшая дальнобойность, повышенная эжекционная способность, в результате которой осуществляется подсос газов из окружающей среды.

В закрученных факелах процесс смешения протекает гораздо интенсивнее, чем в прямотруйных. При этом дальнобойность факела снижается, процесс сжигания топлива ускоряется. Это в свою очередь приводит к приближению зоны максимальных температур к соплу горелки.

Подобное интенсивное смешение, которое достигается в закрученных струях, целесообразно использовать на практике в тех случаях, когда в небольшом топочном объеме необходимо сжигать достаточно большие количества топлива.

Глава 5

ВЫБОР ТОПЛИВА И МЕТОДОВ ЕГО СЖИГАНИЯ

1. Выбор топлива

В пламенных печах факел является единственным теплогенерирующим компонентом, от характеристик которого зависят следующие важнейшие показатели работы печи: общий температурный уровень; распределение температуры по объему рабочего пространства (чаще всего по длине) печи; общая интенсивность и степень развития теплообменных процессов как в печи в целом, так и в отдельных зонах рабочего пространства; характер движения газов в печи; развитие массообменных процессов; стойкость футеровки.

Следовательно, выбор топлива с определенной теплотой сгорания, а также метода отопления является очень ответственной задачей, решать которую необходимо с учетом технологического назначения печи и условий ее эксплуатации, а также технико-экономических соображений, из которых главным является возможность выделения того или иного топлива на печь в соответствии с топливным балансом завода и цеха.

В понятие «метод отопления печи» входит не только вид используемого топлива и конструкции горелок (форсунок), но и методы утилизации тепла отходящих дымовых газов с обеспечением предварительного подогрева газа и воздуха, идущего на горение, а также использование дутья, обогащенного кислородом.

Все эти составляющие метода отопления оказывают влияние на величину калориметрической температуры горения топлива, от которой в значительной степени зависит достигаемый в печи температурный уровень. Практикой установлено, что для печей определенного назначения необходима (для обеспечения нормального уровня тепловой работы) вполне определенная калориметрическая температура, независимо от вида топлива и способа его сжигания. Так, например, для мартеновских печей T_k должна быть не ниже 2300—2400 °С, в нагревательных колодцах 2000—2100 °С, в методических печах 1900—2000 °С. Калориметрическая

температура может быть определена из следующего выражения:

$$T_{\kappa} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}} + Q_{\text{ф}}}{v_{\text{пр. сг}} c_{\text{пр. сг}}}, \quad (5-1)$$

где $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ — низшая теплота сгорания топлива, кДж/м³; кДж/кг; $Q_{\text{ф}}$ — количество тепла, вносимое подогретым газом и воздухом в расчете на единицу топлива, кДж/м³; кДж/кг; $v_{\text{пр. сг}}$ — объем продуктов сгорания в расчете на единицу топлива, м³/м³; м³/кг; $c_{\text{пр. сг}}$ — теплоемкость продуктов сгорания, кДж/(м³·К).

При различных способах сжигания топлива величина $v_{\text{пр. сг}}$ зависит от коэффициента расхода воздуха и условий смешения топлива с окислителем.

В большинстве случаев в печах должна обеспечиваться максимально возможная полнота сгорания топлива в пределах рабочего пространства печи. Обычно та или иная полнота сгорания достигается комбинированным действием двух факторов — качества смешения и величины коэффициента расхода воздуха. Если качество смешения достаточно высокое, то необходимой полноты сгорания можно достичь при сжигании топлива с низким коэффициентом расхода воздуха, и наоборот. Таким образом, величина $v_{\text{пр. сг}}$ в формуле (5-1), зависящая от величины коэффициента расхода воздуха, зависит следовательно и от конструкции устройства, применяемого для сжигания топлива. Анализ выражения (5-1) показывает, что в нем отражено влияние на T_{κ} всех важнейших при горении факторов: вида топлива, степени подогрева газа и воздуха (что связано с методами утилизации тепла отходящих дымовых газов), коэффициента расхода воздуха и конструкции устройства для сжигания топлива.

При высокой теплоте сгорания топлива (как, например, у природного газа) достаточно высокие значения калориметрической температуры могут быть получены и без подогрева воздуха и газа ($Q_{\text{ф}} = 0$). Однако и в подобных случаях целесообразно использовать предварительно подогретый воздух (газ), так как это обеспечивает снижение расхода топлива в результате частичной утилизации тепла, отходящих продуктов сгорания.

При низкой теплоте сгорания топлива применение подогретого воздуха, а иногда и воздуха и газа чаще всего совершенно необходимо. С помощью выражения (5-1) можно определить влияние величин $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$, $Q_{\text{ф}}$ и $v_{\text{пр. сг}}$ на калориметрическую температуру горения.

В справочной литературе приведены номограммы, отражающие влияние указанных величин на T_{κ} . В качестве примера ниже приведены условия обеспечения величины калориметрической температуры горения, равной 2000 °С:

Теплота сгорания газообразного топлива, кДж/м ³	6700	8400	10 000	11 750
Температура подогрева воздуха, °С	600	400 (600)	200	0
Температура подогрева газа, °С	800	600 (1000)	0	0
Коэффициент расхода воздуха	1,0	1,0 (1,2)	1,0	1,0

Используемые в промышленности керамические (для воздуха) и металлические рекуператоры (для воздуха и газа) обычно обеспечивают вполне определенную максимальную температуру подогрева воздуха (газа). Так, в промышленности обычно используют керамические рекуператоры двух конструкций, одни из которых (из шамотных блоков) обеспечивают подогрев воздуха до 500—550 °С, другие (из карбошамотных трубок) позволяют подогревать воздух до 750—800 °С. Металлические трубчатые сварные рекуператоры обычно обеспечивают подогрев воздуха или газа до 250—350 °С.

При выборе топлива приходится руководствоваться не только возможностями топливного баланса завода, экономическими соображениями и необходимостью обеспечить нужную температуру в печи, но также требованиями к радиационным характеристикам факела. Если нужен светящийся факел, то необходимо выбрать топливо, содержащее углеводороды.

Необходимо отметить, что только на металлургических комбинатах с полным циклом имеется возможность выбора топлива, так как на них обычно имеются доменный, коксовый и природный газы, смешивая которые можно получить газообразное топливо с различной теплотой сгорания.

На металлургических заводах с неполным циклом, на заводах цветной металлургии, машиностроительных обычно используют природный газ или мазут. На таких предприятиях решающим является вопрос рационального использования топлива, выбор таких методов сжигания, которые обеспечивают его минимальный расход.

2. Выбор метода сжигания топлива

На выбор метода отопления существенное влияние оказывает характер работы печей: постоянного и периодического действия, камерные и методические, с муфелированием пламени или садки.

Как уже отмечалось выше, горелки обычно работают при переменной тепловой нагрузке, которая может изменяться в различных пределах. В печах постоянного действия возможно небольшое изменение тепловой нагрузки, вызванное необходимостью некоторой перенастройки печи или случайными причинами. В печах периодического действия может иметь место очень значительное (в несколько раз) изменение тепловой нагрузки в процессе нагрева садки металла. Однако любая горелка лишь при определенных расходах топлива и воздуха обеспечивает оптимальные условия смешения и наилучшее развитие факела. Например, инжекционные горелки имеют узкие пределы регулирования по тепловой нагрузке и теплоте сгорания топлива, поскольку изменение скорости истечения струи топлива из сопла горелки вызывает непропорциональный подсос воздуха для горения. В горелках пламенного типа, где газообразное топливо и воздух подаются отдельными

потоками и самостоятельно регулируются, возможные пределы изменения тепловых нагрузок значительно шире. Однако эти горелки, пригодные для работы на печах постоянного действия, далеко не полностью удовлетворяют требованиям работы печей периодического действия.

Необходимый режим работы в методических и камерных печах обеспечивается соответствующим размещением горелок (форсунок) и дымоотводящих каналов. Режим нагрева в методических печах характеризуется изменением температуры по длине печи. Для обеспечения этого режима необходимо топливо подавать с одной (по длине) стороны печи, а дымовые газы отбирать с противоположной стороны. При этом раскаленные газы, продвигаясь навстречу нагреваемому металлу, обеспечивают его постепенный нагрев.

В камерных печах необходимо обеспечить максимально возможную постоянную температуру в пределах рабочего пространства. С этой целью необходимо осуществить равномерный (допустим, по длине печи) подвод топлива и максимально возможный равномерный отвод дымовых газов. При этом горелки целесообразно размещать таким образом, чтобы осуществлялось энергичное движение газов, что весьма благоприятно влияет на выравнивание температуры в пределах рабочего пространства печи.

Как уже отмечалось, участие кладки в общем теплообмене в печи чрезвычайно важно, так как кладка имеет сплошной спектр излучения при весьма значительных величинах ϵ_λ , тогда как газообразные продукты сгорания имеют линейчатый спектр излучения, который в значительно меньшей степени соответствует поглощательным характеристикам металла, имеющего так же как и кладка сплошной спектр поглощения. Подобные требования наилучшим образом могут быть выполнены при сводовом отоплении печей с использованием так называемых плоско-пламенных горелок.

При светлой термической обработке металлов отопление печей необходимо осуществлять таким образом, чтобы металл не соприкасался с продуктами сгорания. В таких случаях применяют муфельирование садки с помощью специального внутреннего муфеля или муфельирование пламени, сжигая топливо в радиационных трубах. Иногда бывает необходимо производить нагрев металла при столь низких температурах, при которых невозможно устойчивое горение топлива. В таких случаях приходится отделять топку от рабочего пространства печи, осуществляя сжигание топлива в подподовых или выносных топках.

Выбор метода сжигания топлива должен выполняться с учетом аэродинамического режима рабочего пространства с тем, чтобы распределение давления в печи было таким, при котором подсос холодного воздуха в печь и выбивание дымовых газов были бы минимальными. Распределение давления в топливных печах теснейшим образом связано с типом используемых горелок и их расположением.

Автоматическое регулирование теплового режима печей строится на принципе поддержания определенной, необходимой температуры в печи или в ее зоне путем соответствующего изменения расхода топлива и воздуха на его горение. Изменение общего расхода топлива может производиться как изменением расхода топлива на всех горелках, так и отключением и включением части из них. При выборе метода сжигания топлива необходимо учитывать возможность и удобство последующего автоматического регулирования теплового режима печи.

Таким образом, выбор топлива и метода его сжигания теснейшим образом связан с назначением печи, ее конструкцией и особенностями работы и являются весьма ответственными, если не решающими этапами в создании печи.

Глава 6

СЖИГАНИЕ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

Как следует из вышеизложенного, основным признаком, по которому классифицируют горелки, является принцип смешения газа с воздухом. По этому признаку горелки делят на две большие группы: с предварительным смешением и с внешним смешением.

К первой группе относятся такие горелки, которые обеспечивают полное смешение топлива и воздуха еще до выхода в печь. В печь, в зону горения, подают заранее подготовленную горючую смесь; процесс горения носит кинетический характер. Такие горелки часто называют беспламенными, так как заранее подготовленная топливно-воздушная смесь, сгорая, почти не дает видимого пламени.

В горелках с внешним смешением смесеобразование происходит в одном объеме с горением, которое носит диффузионный характер. В результате при сжигании топлив, содержащих углеводороды, может образоваться видимое пламя. Поэтому эти горелки часто называют пламенными.

И те и другие горелки внутри каждой группы могут быть разделены по конструктивным признакам, которые обусловлены способами осуществления смешения газа с воздухом. В наибольшей степени это относится к пламенным горелкам. Они очень многообразны. По существу головки мартеновских печей представляют собой тоже пламенные горелки очень крупных размеров. Способ смешения газа с воздухом в пламенных горелках выбирается в зависимости от их назначения. Наиболее часто применяются двухпроводные, турбулентные и плоско-пламенные горелки. В последнее время все большее распространение приобретают горелки с регулируемой длиной пламени, используемые на печах с переменной во времени тепловой нагрузкой. Как отмечалось выше, начинает распространяться новый метод скоростного

ударного (конвективного) нагрева, при котором используются совершенно особенные горелки, сжигание топлива в них осуществляется внутри корпуса.

Существует большое число различных конструкций горелок, поэтому ниже рассмотрим только наиболее распространенные и типичные.

1. Горелки с предварительным смешением

Общие характеристики факела

При предварительном смешении газа с воздухом образуется однородная смесь топлива и окислителя, которая при выходе в рабочее пространство печи сгорает очень быстро, обеспечивая наивысшее

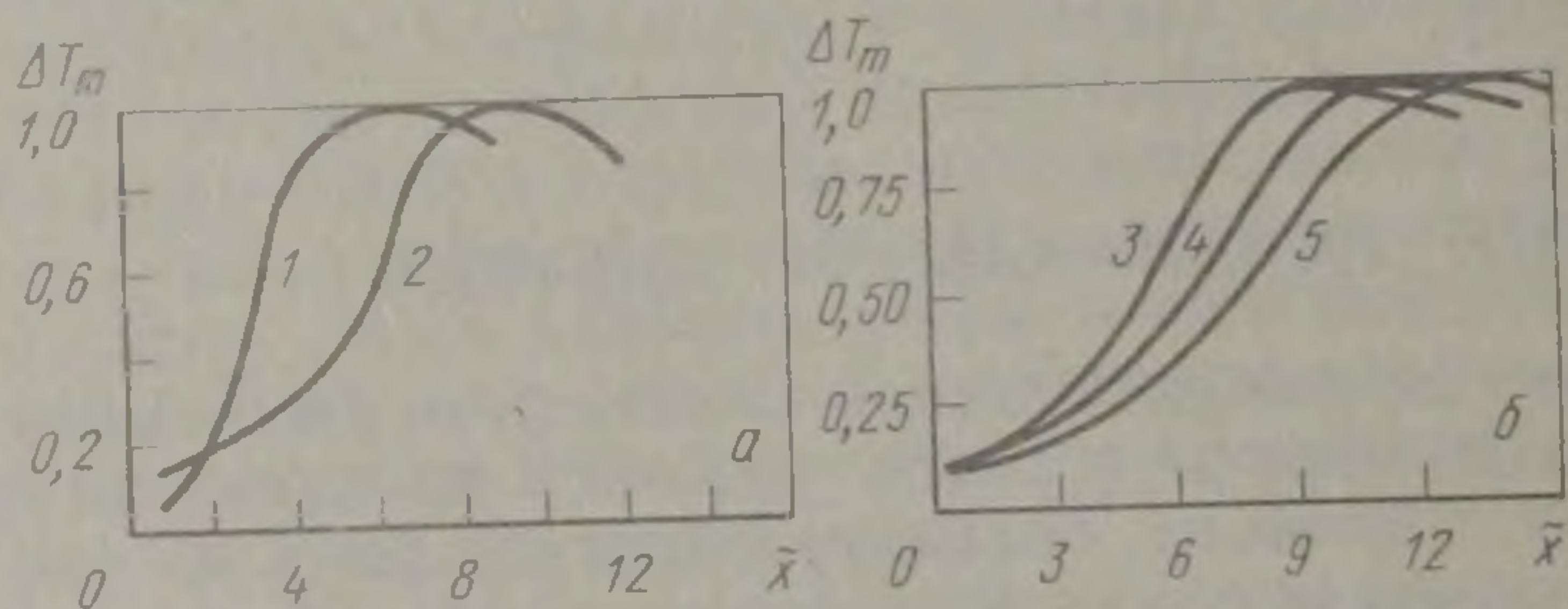


Рис. 6-1. Зависимость изменения температуры на оси по длине факела при предварительном смешении газа с воздухом от коэффициента расхода воздуха (а) и скорости истечения (б):

$$\left(\Delta T_m = \frac{T_{\text{действ}} - T_{\text{окр}}}{T_{\text{max}} - T_{\text{окр}}}; \bar{x} = x/d_0 \right)$$

1 — $n = 1,25$; 2 — $n = 0,91$; 3 — $Re = 2,3 \cdot 10^4$; 4 — $Re = 3,7 \times 10^4$; 5 — $Re = 4,3 \cdot 10^4$

тепловыделение в непосредственной близости от среза горелки. Поэтому горелки с предварительным смешением применяют обычно в тех случаях, когда необходимо обеспечить сжигание большого количества топлива в небольшом топочном объеме¹.

Наибольшее влияние на распределение температуры в начальной части факела предварительно подготовленной смеси оказывают величина коэффициента расхода воздуха и скорость истечения смеси из сопла горелки (рис. 6-1).

Обычно сжигание предварительно приготовленной смеси осуществляется при коэффициенте расхода воздуха, близким к единице (1,02—1,05). Из рис. 6-1, а видно, что при этих значениях коэффициента расхода воздуха максимум температур достигается на расстоянии от среза сопла горелки, равном 7—8 калибрам ($x = l_{\phi}/d_0$).

¹ На практике иногда бывает необходимо обеспечить равномерный нагрев садки путем установки большого числа горелок небольшой мощности (например, в колпаковых печах). В этом случае чаще всего применяют мелкие инжекционные горелки, так как они обеспечивают короткофакельное сжигание и не требуют трубопроводов и вентиляторов для подачи воздуха.

Горелки с предварительным смешением обычно оборудуют керамическими тоннелями, длина которых составляет 6—8 диаметров носика горелки. В таких горелках тепловыделение и подъем температуры продуктов сгорания завершаются практически в пределах тоннеля и продукты сгорания выходят в рабочее пространство печи, имея наивысшую температуру, так как сгорание топлива в тоннеле протекает в условиях, близких к адиабатическим. После выхода в рабочее пространство печи высокотемпературные продукты сгорания начинают интенсивно излучать тепло и дальнейшее распределение температуры по длине факела будет зависеть от конкретных условий. Излучательная способность такого факела определяется селективным излучением CO_2 и H_2O , т. е. имеет сравнительно малую величину. Поэтому для интенсивного теплообмена температура факела должна быть на высоком (конечно, допустимом) уровне, что и достигается, так как сжигание происходит при низких значениях коэффициента расхода воздуха.

Наряду с коэффициентом расхода воздуха значительное влияние на распределение температуры в начальной части факела оказывает скорость истечения смеси из носика горелки. На рис. 6-1, б видно, что при увеличении скорости истечения уменьшается тепловыделение и удаляется от среза сопла горелки точка достижения максимальной температуры на оси факела.

Необходимо отметить, что при горении предварительно подготовленной смеси наблюдается весьма заметное увеличение давления в зоне горения и связанное с этим повышение скорости движения газа в 1,5 и более раза. Это говорит о том, что на факел горения предварительно подготовленной смеси не может распространяться положение о том, что по длине факела статическое давление остается постоянным, справедливое для свободных струй.

В турбулентном факеле однородной смеси, так же как и в свободных струях, расход увеличивается по длине факела. Длина такого факела зависит как от величины коэффициента расхода воздуха, так и от скорости истечения (рис. 6-2). Иногда целесообразно применение инжекционных горелок, работающих на подогретых средах. Поэтому несомненный интерес представляет влияние температуры смеси на воспламенение и длину факела. При использовании предварительно подогретой смеси ее воспламенение ускоряется, поскольку в подогретой смеси температура воспламенения достигается быстрее, чем в холодной. Опытным путем установлено, что с повышением температуры смеси длина факела несколько уменьшается.

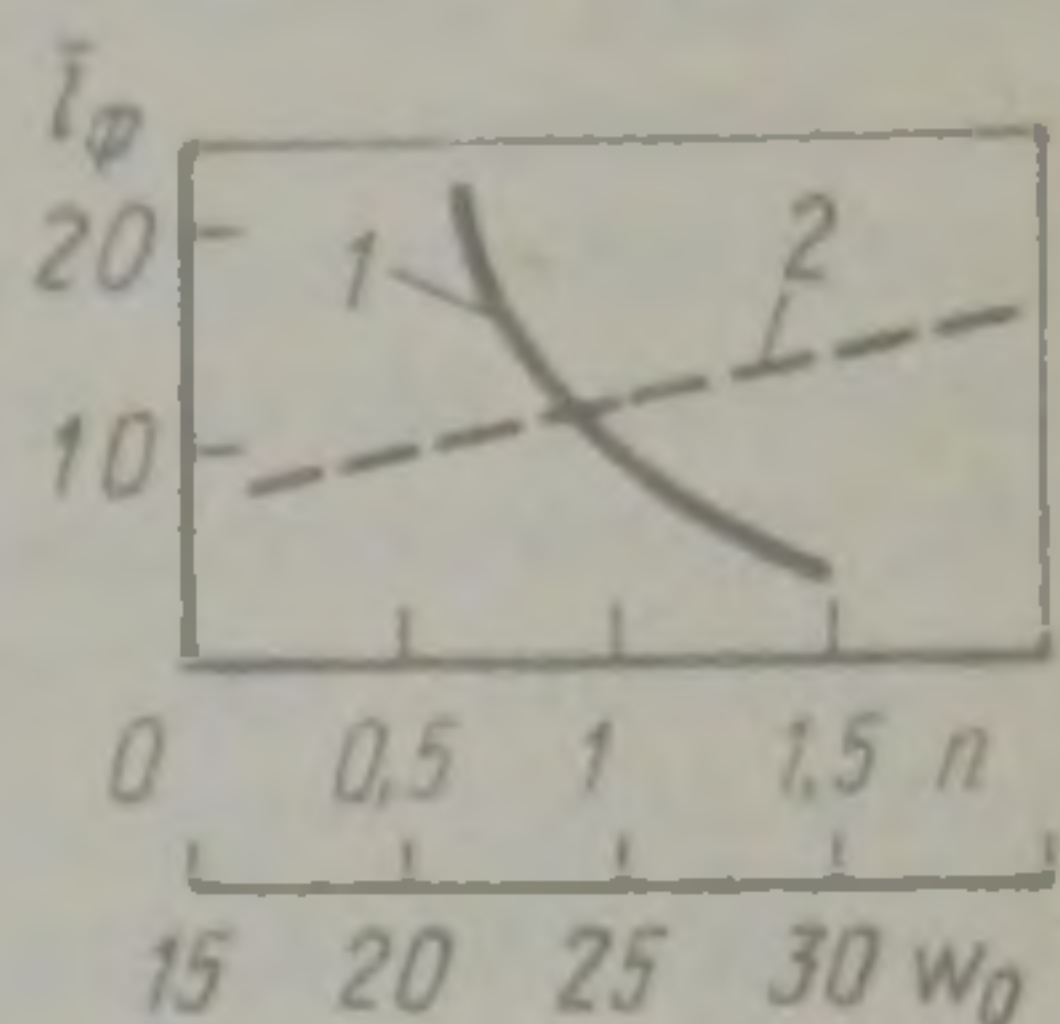


Рис. 6-2. Зависимость относительной длины факела ($\bar{l}_\Phi = l_\Phi/d_0$, d_0 — диаметр сопла) от коэффициента расхода кислорода μ (1) и скорости истечения w_0 (2)

Конструкция и работа горелок

Наиболее распространенными горелками с предварительным смешением являются инжекционные горелки. Они обеспечивают предварительное смешение топлива с воздухом, необходимая полнота сгорания достигается при наименьшем по сравнению с горелками других типов коэффициенте расхода воздуха. Поэтому горелки с предварительным смешением при аналогичном топливе обеспечивают наивысшую температуру горения.

Учитывая указанные особенности горелки подобного типа применяют при сжигании газа с низкой теплотой сгорания и в тех случаях, когда необходимо нагревать металл с большой скоростью. Их целесообразно использовать также при сжигании топлива, не дающего светящегося пламени (доменного газа). Горелки такого типа обеспечивают концентрированное выделение тепла в сравнительно небольшом объеме, дают короткий факел и создают зону достаточно высоких температур вблизи горелки. Факел, образуемый такими горелками, характеризуется относительно низкой излучательной способностью. Поэтому передача тепла к металлу определяется в основном температурой. В отдельных случаях инжекционные горелки используют наряду с получением факела также для интенсификации теплоотдачи от кладки. При этом пламя горелок направляют на свод печи.

Инжекционные горелки целесообразно применять при необходимости равномерного нагрева и рассредоточенного подвода топлива при помощи многочисленных мелких горелок. В этом случае отпадает необходимость в установке вентиляторов, воздухопроводов и устройств для регулирования подачи воздуха.

Предварительное смешение газа и воздуха требует специальных устройств—смесителей, которые могут быть выполнены или заодно с горелкой, или отдельно от нее. Наибольшее распространение получили смесители инжекционного типа. На рис. 6-3, 6-4 представлены инжекционные смесители конструкции Стальпроекта.

На рис. 6-3 показан инжекционный смеситель, выполненный отдельно от горелки и подающий газо-воздушную смесь одновременно в несколько горелок. На рис. 6-4 изображен смеситель, представляющий собой единое целое с горелкой. В зависимости от производительности горелки используют смеситель той или другой конструкции. При диаметре носика горелки $d_{н.г} < 75$ мм применяют смеситель, изображенный на рис. 6-3, при $d_{н.г} > 75$ мм — изображенный на рис. 6-4.

Смеситель работает следующим образом. Газообразное топливо под определенным давлением поступает в смеситель через входной патрубок 1 (см. рис. 6-4) и, выходя с большой скоростью через сопло 3, инжектирует необходимый для горения воздух. Воздух подсасывается из окружающей атмосферы через кольцевую щель между воздушной шайбой 2 и смешивающей трубой 4. Газ смешивается с воздухом уже во время подсасывания воздуха, однако

для полного перемешивания нужен еще дополнительный участок, роль которого и выполняет смешивающая труба 4, длина которой должна быть не меньше семи ее диаметров. В инжекционном смесителе подобной конструкции при изменениях расхода одного и того же топлива может поддерживаться заданная величина коэффициента расхода воздуха, так как изменение расхода газа влечет за собой изменение количества инжектируемого воздуха.

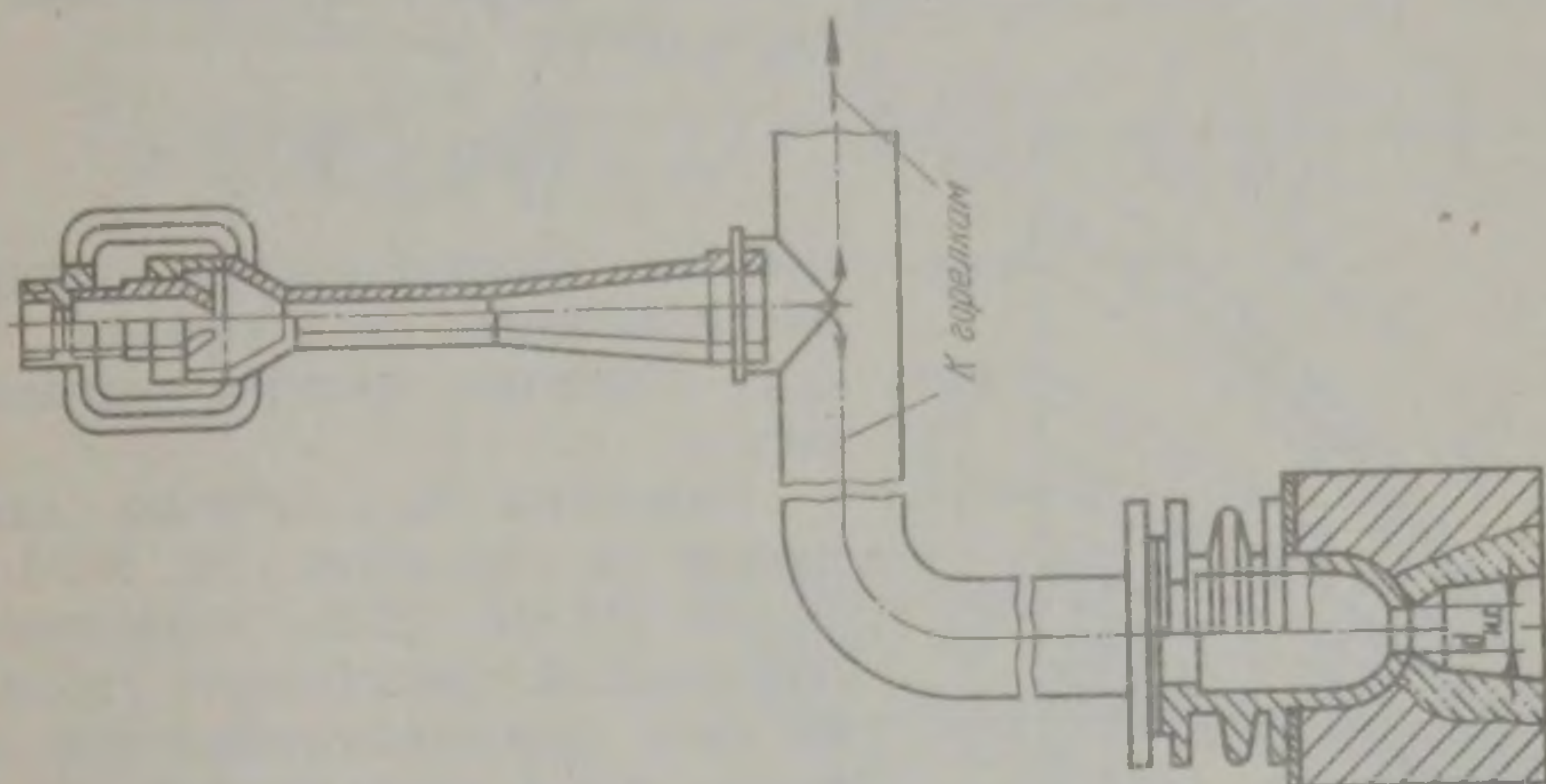


Рис. 6-3. Инжекционный смеситель для нескольких горелок

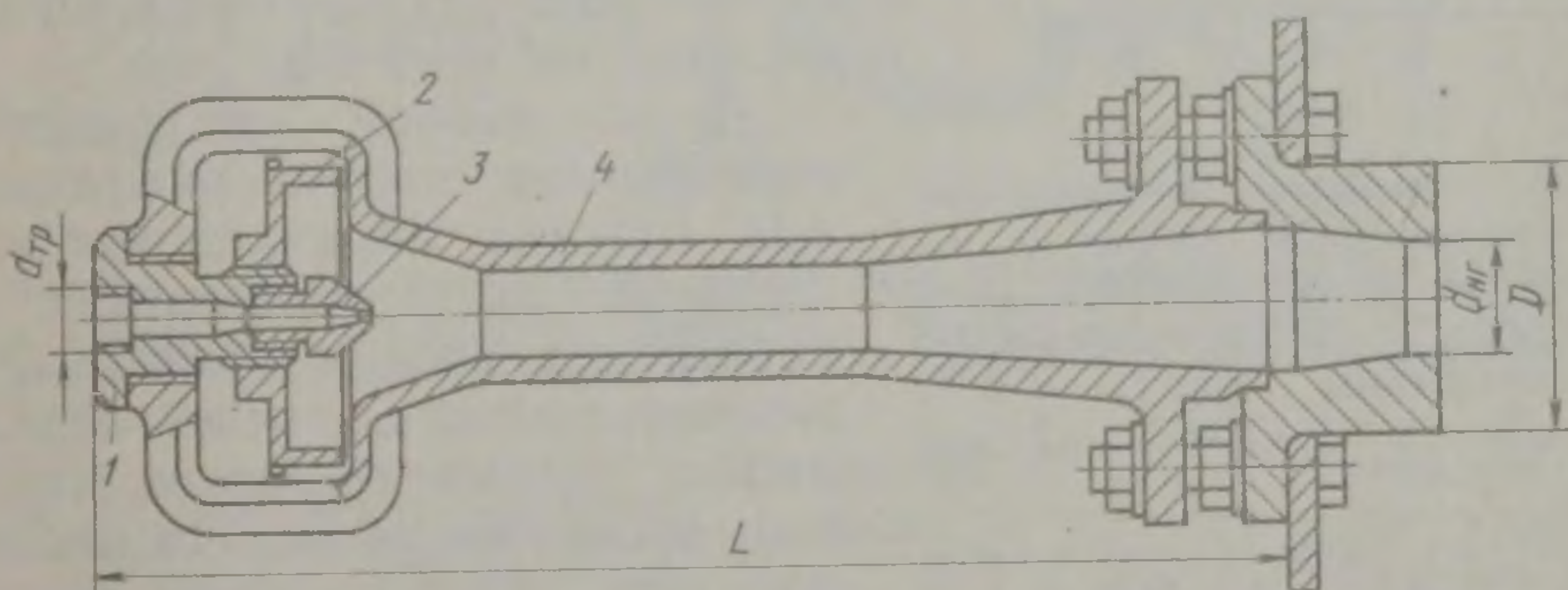


Рис. 6-4. Инжекционная горелка работающая на холодных воздухе и газе

Применение инжекционных смесителей при работе на холодном воздухе позволяет отказаться от воздухопроводов и вентиляторов, что является преимуществом горелок этого типа.

Производительность и устойчивость работы инжекционных горелок в значительной степени зависят от давления, под которым поступает газообразное топливо. Если давление таково, что скорость выхода смеси из носика горелки окажется меньше скорости горения для данного топлива, то пламя будет проскакивать внутрь смешивающей трубы и горелка может выйти из строя. Возможен и такой случай, когда при чрезмерном давлении скорость выхода смеси из носика горелки значительно превысит скорость горения и пламя будет отрываться от носика горелки, что снизит эффективность ее работы. Нормальная скорость $\omega_{н.г}$ выхода смеси из но-

сика горелки должна лежать в пределах 20—50 м/с. Минимальное давление газа, необходимое для того, чтобы избежать проскока пламени в горелку, для доменного газа 490 Па, для генераторного газа 881 Па и для смеси коксового и доменного газов ($Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 8350 \text{ кДж/м}^3$) составляет 196 Па.

Определенной скорости выхода смеси будет соответствовать тепловое напряжение носика горелки, Вт/см², определяемое по выражению

$$h_{\text{н.г}} = 0,278 B Q_{\text{н}}^{\text{р}} / f_{\text{н.г}}$$

где B — часовой расход топлива, поступающего к горелке, м³; $f_{\text{н.г}}$ — сечение носика горелки, см².

Величина $h_{\text{н.г}}$ обычно изменяется в пределах от 8160 до 11 650 Вт/см². Для определения пропускной способности горелки по газу (производительности горелки $Q_{\text{г}}$) и необходимого давления газа $p_{\text{г}}$ можно воспользоваться данными Стальпроекта, приведенными на рис. 6-5.

Кроме работы на холодном атмосферном воздухе инжекционные горелки определенных конструкций могут работать и на подогретых газе и воздухе, что особенно важно для печей, отапливаемых бедным топливом, например, доменным газом. На рис. 6-6 показана инжекционная горелка подобного назначения конструкции Стальпроекта. Характеристики ее приведены на рис. 6-7.

Рис. 6-5. Зависимость производительности инжекционной горелки $Q_{\text{г}}$ от давления газа перед горелкой $p_{\text{г}}$ ($n = 1,05$; $d_{\text{н.г}} = 100 \text{ мм}$; сплошные линии — температура газа $T_{\text{г}} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, штриховые — $T_{\text{г}} = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$) при $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ кДж/м³:

1 — 3750; 2 — 4100; 3 — 3750; 4 — 4100; 5, 6 — 5050; 7, 8 — 5450; 9, 10 — 5850; 11 — 6250; 12 — 6650; 13 — 7100; 14 — 7550; 15 — 7950; 16 — 8400; 17 — 8800; 18 — 9200

Важно правильно выбрать допустимую температуру подогрева газа и воздуха, чтобы исключить возможность воспламенения в смесителе. Опыты показали, что предельная температура нагрева смеси составляет 400 °С. Эти горелки применяют обычно на крупных нагревательных печах. Печи, оборудованные такими горелками и керамическими рекуператорами из шамотных блоков, могут работать без принудительной подачи воздуха.

На рис. 6-5 и 6-7 показаны зависимости производительности горелки от давления газа для горелки с диаметром носика $d_{\text{н.г}} = 100 \text{ мм}$. При другом диаметре носика пропускную способность горелки по газу вычисляют, умножая величины, полученные по рис. 6-5 и 6-7 на поправочный коэффициент K . Определив

полный расход топлива на данную печь и установив нужное число горелок, определяют производительность одной горелки, а затем и все ее основные размеры.

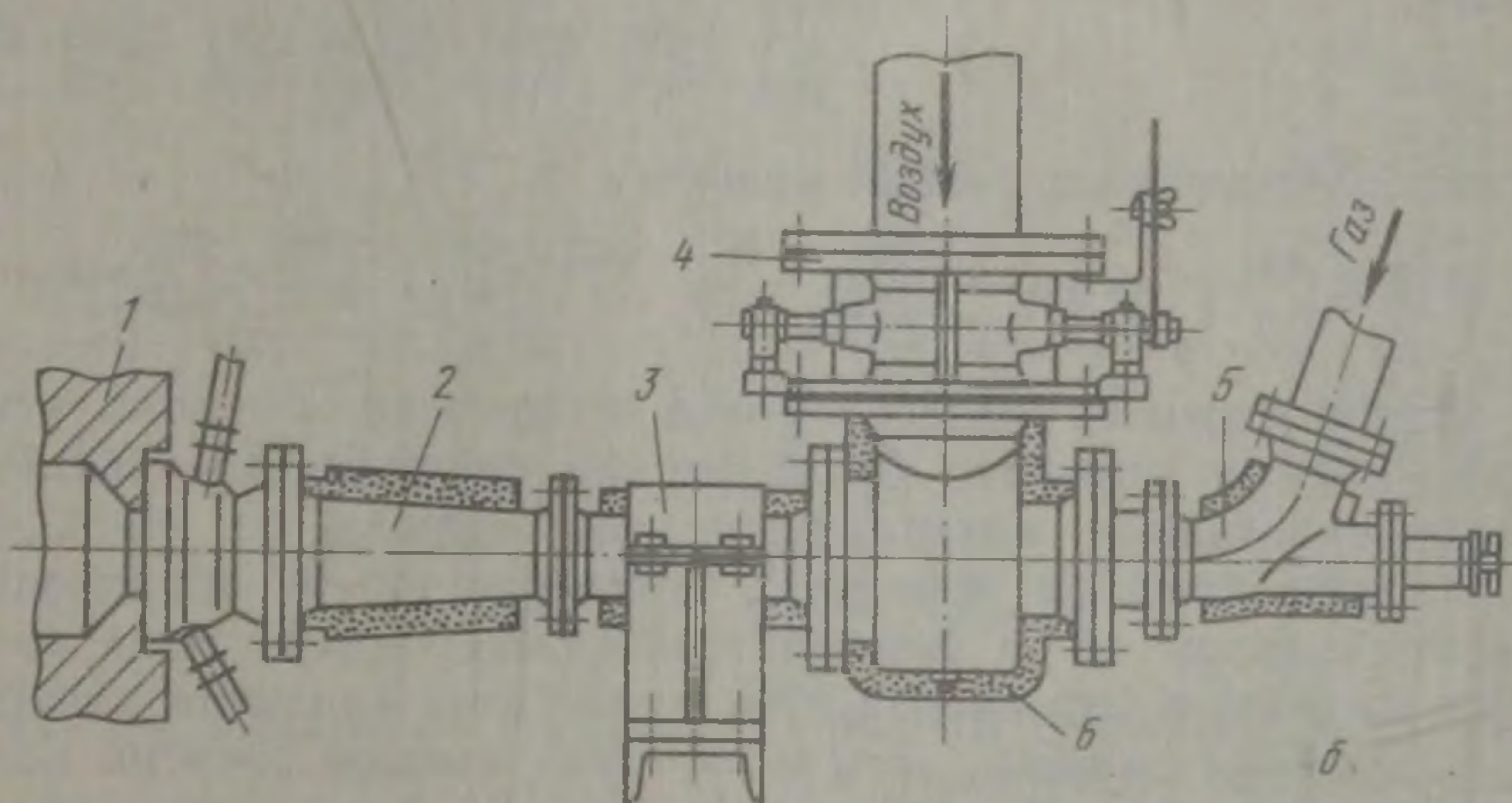
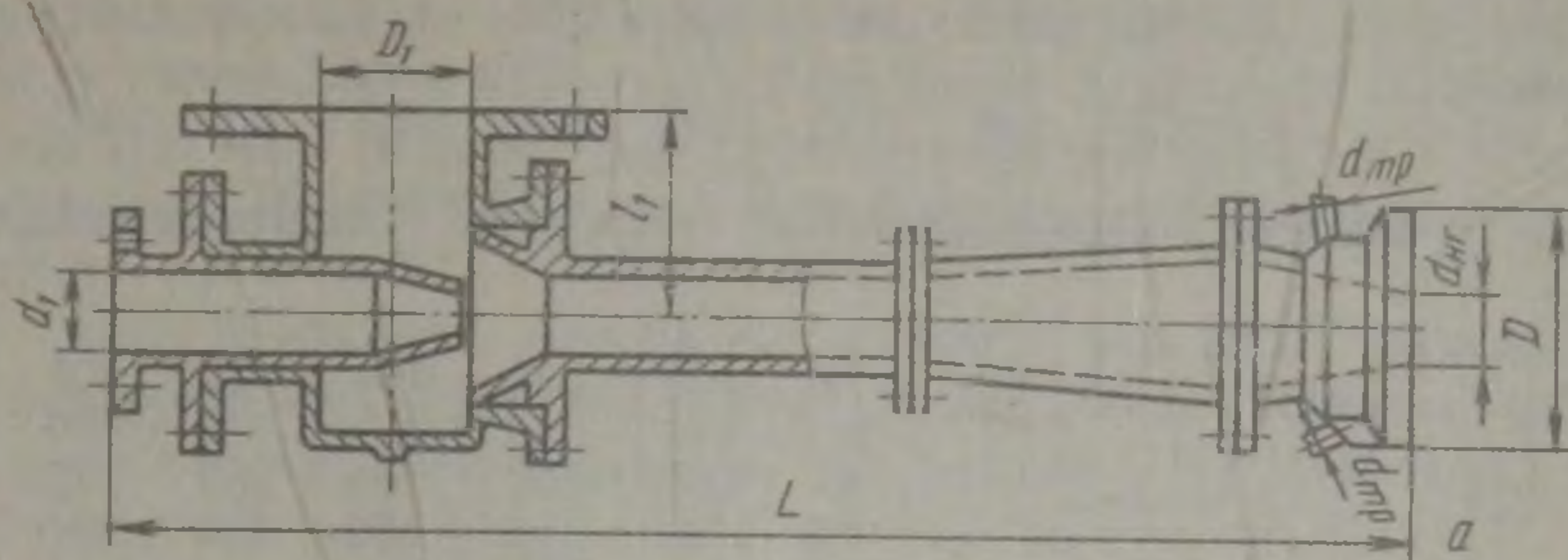
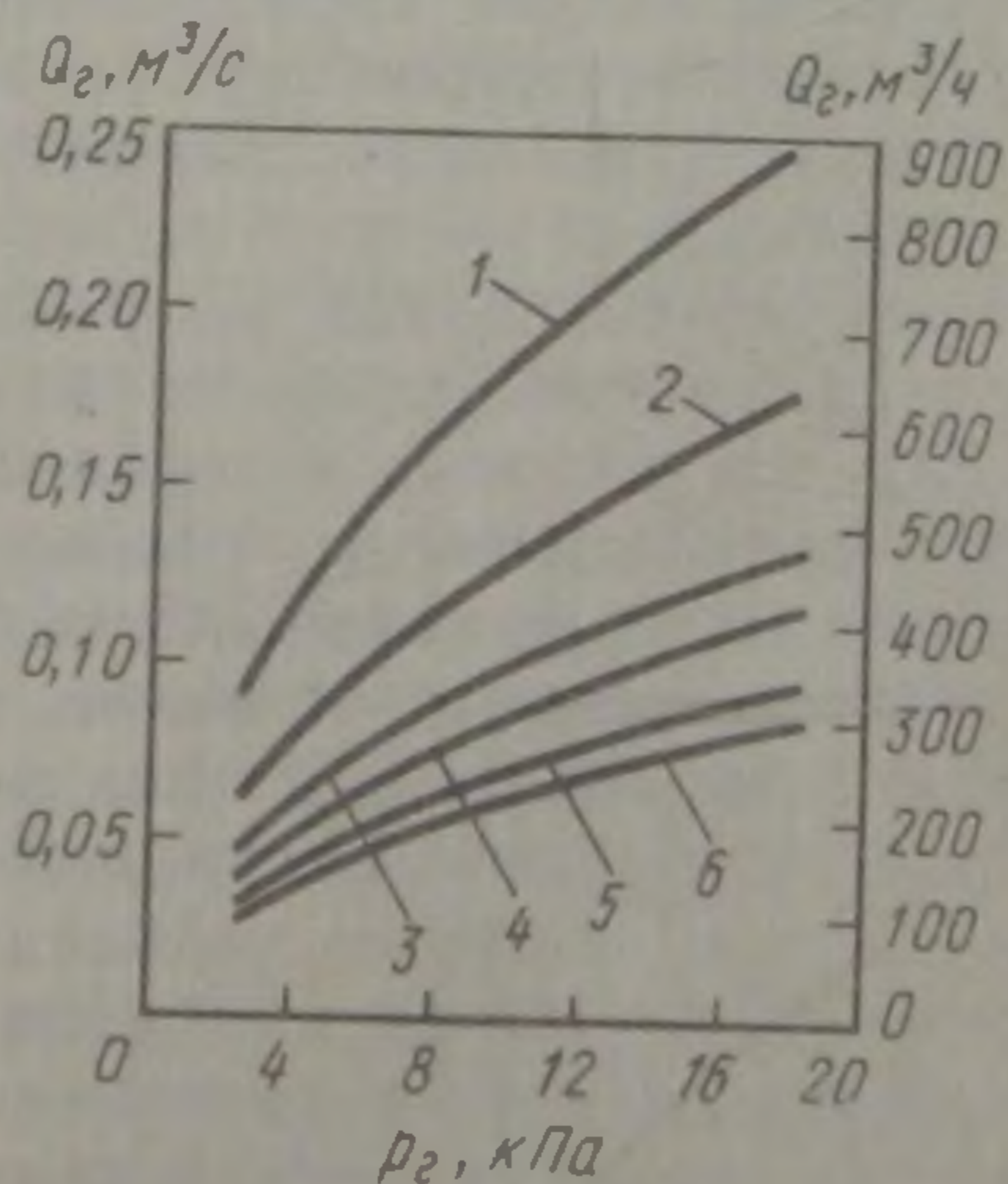


Рис. 6-6. Инжекционная горелка, работающая на подогретых воздухе и газе: а — горелка; б — установка горелки; 1 — туннель; 2 — горелка; 3 — опорная стойка; 4 — дроссельный клапан; 5 — колено; 6 — тепловая изоляция

Рис. 6-7. Зависимость производительности инжекционной горелки Q_r (см. рис. 6-6) от давления газа перед горелкой p_r ($n = 1$; $d_{н.г} = 100$ мм):

Номер кривой	Q_r^n , кДж/м ³	Температура, °С	
		газ	воздух
1	4100	300	600
2	5850	200	500
3	5850	20	500
4	6650	20	500
5	7950	20	500
6	8400	20	500



Ниже приведены основные размеры инжекционных горелок и значения поправочного коэффициента K .

Основные размеры инжекционных горелок, изображенных на рис. 6-4

$d_{н.г.}$, мм	75	86	100	116	134	154	178	205	235
D , мм	140	220	260	200	350	410	470	490	510
$d_{тр.}$, дюймы	$\frac{3}{4}$	1	1	$1\frac{1}{4}$	$1\frac{1}{4}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	2	2
L , мм	700	185	255	290	380	435	550	640	805

Основные размеры инжекционных горелок, изображенных на рис. 6-6

$d_{н.г.}$, мм	75	100	134	154	178	205	270
D , мм	190	260	350	410	470	490	510
D_1 , мм	125	200	300	300	350	350	450
d_1 , мм	75	100	150	150	200	250	300
$d_{тр.}$, дюймы	$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$	1	1	1
L , мм	1145	1530	2000	2245	2285	2915	3695
b_1 , мм	200	230	280	280	350	350	460

Значение поправочного коэффициента

$d_{н.г.}$, мм	75	86	100	205	235	270
K	0,562	0,74	1	4,2	5,52	7,29

В работе инжекционных горелок существенную роль играет туннель, стенки которого футеруют по специальным шаблонам высокоогнеупорными материалами, состоящими из 45 % хромистого железняка (в порошке), примерно 45 % обожженного магнезита и около 10 % огнеупорной глины. Кроме того, применяют специальные фасонные блоки из каолина и шамота класса А. Сечение туннеля должно быть в 7—8 раз больше сечения носика горелки, длина туннеля должна составить 6—7 диаметров носика. Туннель выполняет роль устройства, поджигающего смесь. В процессе горения газа стенки туннеля раскаляются, что обеспечивает поджигание новых порций газо-воздушной смеси и тем самым способствует устойчивому горению. Есть доказательства того, что стенки туннеля оказывают каталитическое влияние на процесс горения.

Недостаток горелок с туннелем заключается в очень малой возможности использования излучения раскаленных поверхностей туннеля для нагрева материалов в печи.

При всех отмеченных преимуществах инжекционным горелкам свойственны следующие недостатки: малые пределы регулирования, невозможность изменять теплоту сгорания топлива при данном диаметре сопла, большие размеры горелок значительной производительности. Беспламенные горелки не следует применять в том случае, когда по условиям работы печи необходим хорошо светящийся и достаточно длинный факел.

Кроме инжекционных горелок предварительное смешение газа и воздуха осуществляется в керамических (рис. 6-8) и туннельных горелках (рис. 6-9).

Роль пламени керамической горелки сводится к тому, чтобы раскалить поверхность керамики до высокой температуры и обес-

печить трансформацию селективного излучения газов в сплошное по спектру излучение огнеупорного материала. Такие горелки обеспечивают сгорание газа на керамической поверхности с максимальным приближением к поверхности огнеупора зоны высоких температур пламени. Чем выше температура поверхности керамики, тем больше ее теплоотдающий эффект. В качестве теплоотдающей используется поверхность керамического корпуса горелки.

В керамических горелках корпус горелки выполняют из высококачественного, чаще всего высокоглиноземистого огнеупорного материала (алунда, муллита). Внутренний диаметр

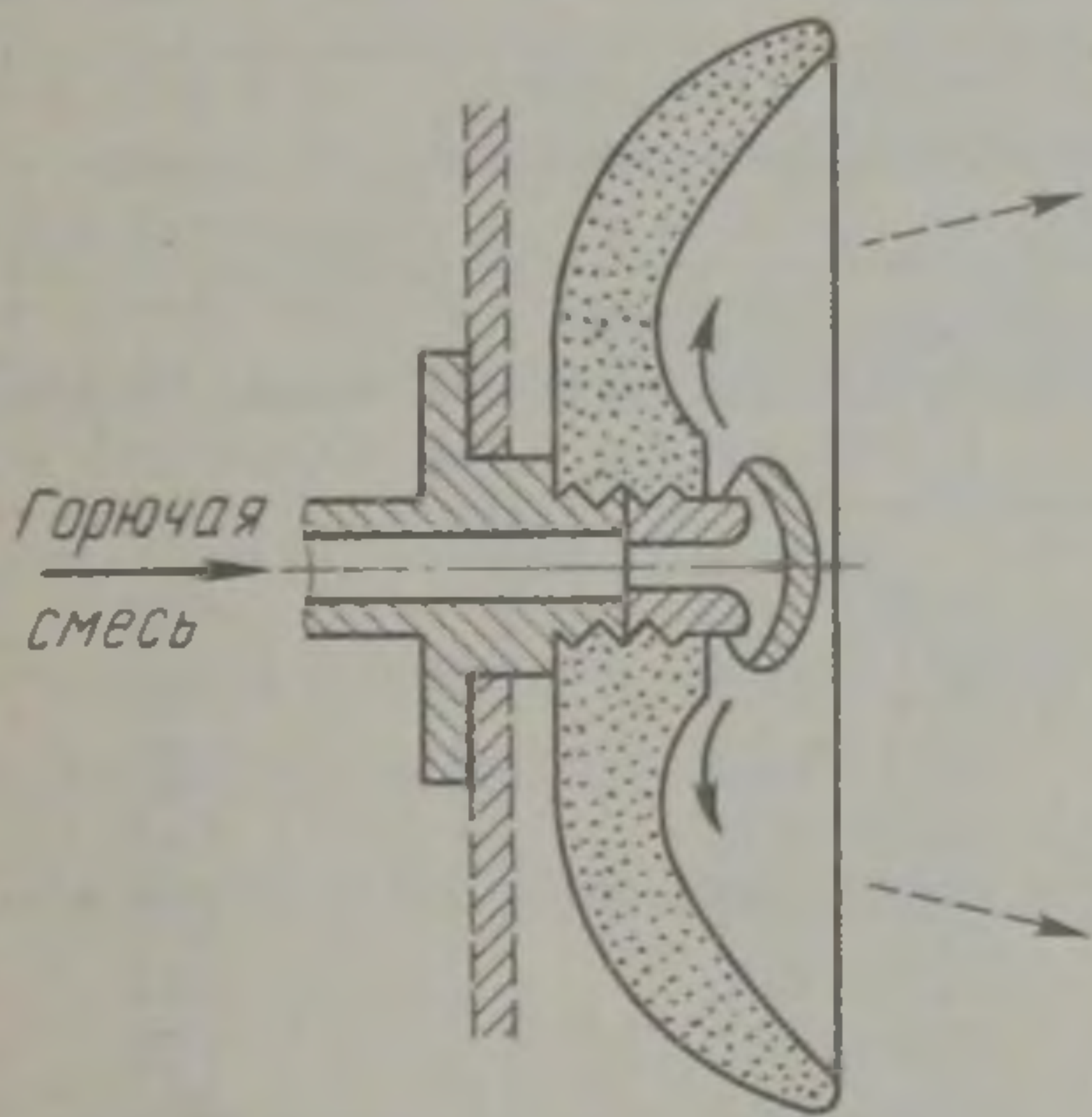


Рис. 6-8. Керамическая горелка

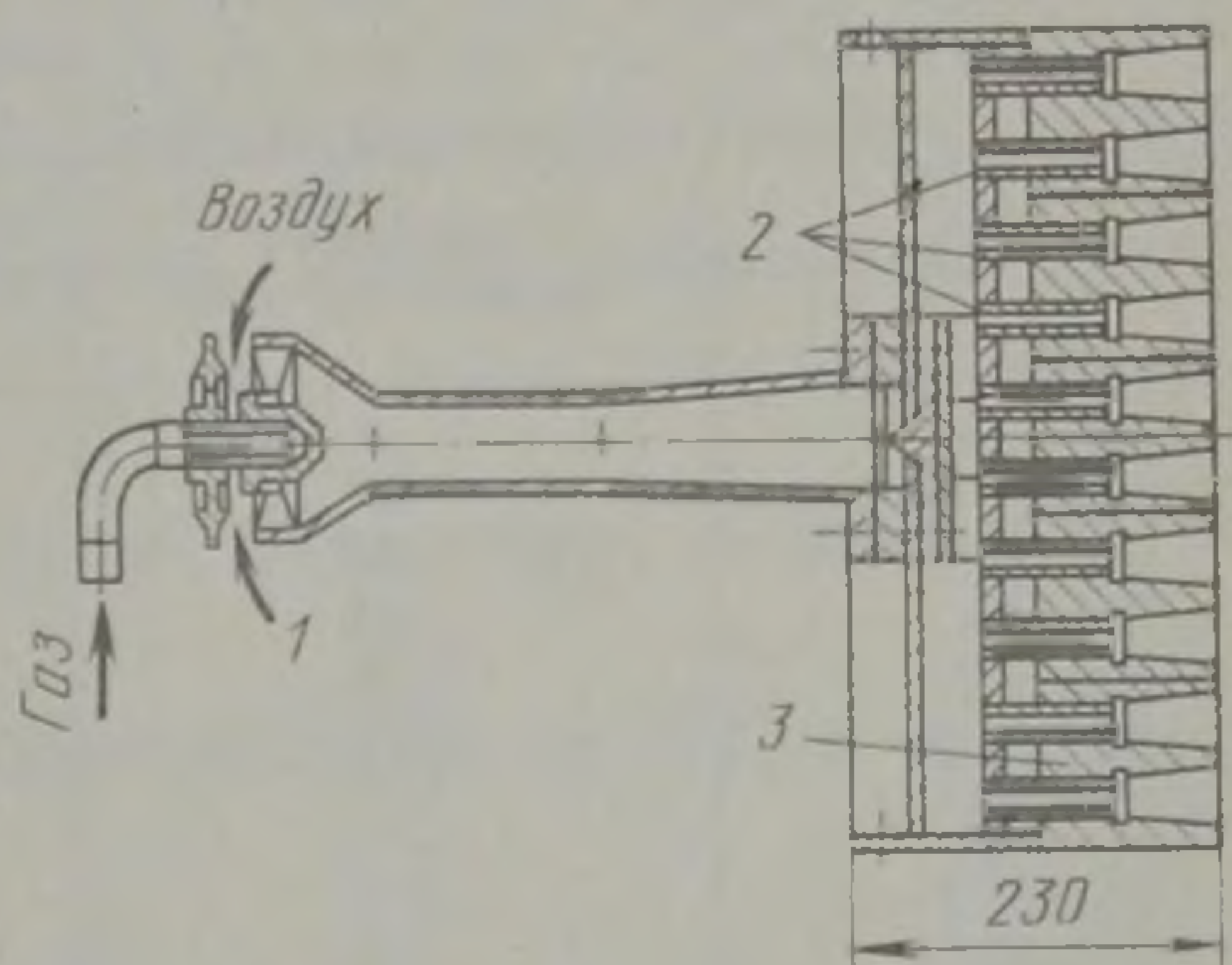


Рис. 6-9. Многогуннельная горелка:
1 — смеситель; 2 — распределительная коробка; 3 — керамические призмы

выходной части излучающей чаши обычно лежит в пределах 50—170 мм. В центре чаши ввинчена керамическая пробка, имеющая 20—40 узких пазов шириной около 0,5 мм каждый. По этим пазам заранее приготовленная горючая смесь поступает в зону горения. Выходные отверстия в пробке выполнены таким образом, что горючая смесь растекается вдоль вогнутой поверхности чаши и, сгорая в непосредственной близости, раскаляет ее до высокой температуры. Давление горючей смеси обычно около 19,6 кПа. Доля излучения при теплоте сгорания топлива 37 700 кДж/м³ составляет ~80 %, с уменьшением теплоты сгорания доля излучения падает. Оптимальное теплонапряжение излучающей поверхности чаши находится в пределах 580—1280 кВт/м². Минимально допустимое теплонапряжение поверхности составляет 270 кВт/м².

Из керамических горелок набирают панели, располагаемые навстречу друг другу. Во время работы между панелями, составленными из раскаленных чаш, перемещается нагреваемый металл. Поскольку температура поверхности чаш очень велика, осуществляется скоростной нагрев металла. Обычно такие горелки применяют в агрегатах скоростного нагрева при нагреве металла под

ковку и термообработку (высокоскоростная термообработка ленты). Распространение керамических горелок ограничено из-за необходимости дополнительного оборудования для компрессии газа и очень высоких требований, предъявляемых к очистке газа и воздуха для того, чтобы не забивались пазы в пробках.

Существует несколько конструкций многотуннельных горелок. Одна из них — горелка ГБП (горелка беспламенная панельная) представлена на рис. 6-9. В табл. 6-1 приведены некоторые основные характеристики этих горелок.

Т а б л и ц а 6-1. Характеристики многотуннельных горелок

Тип горелки	Характеристика горелки		
	тепловая мощность, кВт	габаритные излучающей стены В×В, мм	число трубок
ГБП-35	41	500×500	100
ГБП-55	64	605×605	144
ГБП-85	99	500×500	100
ГБП-120	139	605×605	144
ГБП-140	162	500×500	100
ГБП-200	232	605×605	144
ГБП-280	325	500×500	196
ГБП-400	465	605×605	289
ГБП-530	615	500×500	365

Керамические призмы горелок выполнены из шамота. Горелки можно применять при температуре нагрева не более 900 °С, что обусловлено стойкостью металлических труб. Для многотуннельных горелок характерны следующие два недостатка, связанные между собой:

1) в результате большого сопротивления горелки требуется весьма высокое давление, которое при сжигании природного газа составляет 2500 кПа;

2) горелки, практически, не могут работать при противодавлении в печи, поэтому их можно устанавливать только на стенах и поду печи.

Работа керамических горелок изучена недостаточно и поэтому точный их расчет затруднен. Их выбирают, исходя из опытных данных.

В горелках с излучающей чашей установлено несколько чаш определенных размеров. Чтобы определить размеры панелей, излучающих количество тепла Q , полученное из теплового баланса установки, необходимо предварительно конструктивно выбирать диаметр d излучающей чаши. Используя величину среднего значения оптимального теплонапряжения поверхности го-

релки $H_r \approx 930 \text{ кВт/м}^2$, можно определить тепловое излучение одной горелки $q_r = H_r \pi d^2 / 4$,

а затем найти число горелок $n = Q/q_r$.

Конструктивное оформление горелок с излучающей чашей таково, что габаритный размер (сторона квадрата, занимаемого одной горелкой) горелки $S = d + 25 \text{ мм}$. Зная эту величину, по известному числу горелок можно определить габаритные размеры панелей, составленных из радиационных горелок.

Многотуннельные горелки выбирают из нормалей Гипронефтемаша (см. табл. 6-1) по схеме, ясной из последующего примера.

Пример. Необходимо выбрать многотуннельную горелку для проходной печи с монолитным подом. Длина печи 10 м, высота стен печи 1,5 м. Общая тепловая мощность печи $Q = 11,5 \text{ мВт}$. Горелки размещают на двух продольных стенах печи общей площадью $2 \cdot 10 \cdot 1,5 = 30 \text{ м}^2$.

Размер излучающей поверхности одной горелки выбираем $500 \times 500 \text{ мм}$. В этом случае в печи разместится

$$n = 30/0,25 = 120 \text{ горелок.}$$

Тепловая мощность одной горелки при этом должна составлять

$$q_r = Q/120 = 96 \text{ 000 Вт.}$$

Подобную тепловую мощность обеспечивает горелка ГБП-85 (см. табл. 6-1).

2. Пламенные двухпроводные горелки

В пламенных двухпроводных горелках подача газа и воздуха осуществляется коаксиальными струями — по внутренней трубке подается газ, по внешней (кольцевой) — воздух. Такие горелки обычно называют двухпроводными или горелками труба в трубе.

Общие характеристики коаксиального факела

Пламя, образованное коаксиальными струями топлива и воздуха, обеспечивает диффузионный характер сжигания газообразного топлива в спутном потоке воздуха. Схема коаксиального факела представлена на рис. 6-10. Как отмечалось выше и видно из рис. 6-10, переменными в подобном факеле являются такие величины как скорость истечения газа и окружающего его воздуха (соответственно ω_1 и ω_2), диаметр трубок — газовой d_1 , и воздушной d_2 и плотности газа ρ_1 и воздуха ρ_2 . Возможно одновременное изменение скоростей и плотностей истекающих газов, связанное с изменением вида используемого топлива и температур подогрева газа и воздуха. Поэтому в общем случае фактором, определяющим процесс смешения и развитие факела в целом, будет величина m , представляющая собой отношение импульса воздушного потока к импульсу газового, т. е.

$$m = \rho_2 \omega_2^2 / (\rho_1 \omega_1^2).$$

Кроме того изменение величины m вовсе не исключает одновременного изменения отношения диаметров сопел d_2/d_1 . Вместе с тем развитие факела сопровождается горением и теплообменом,

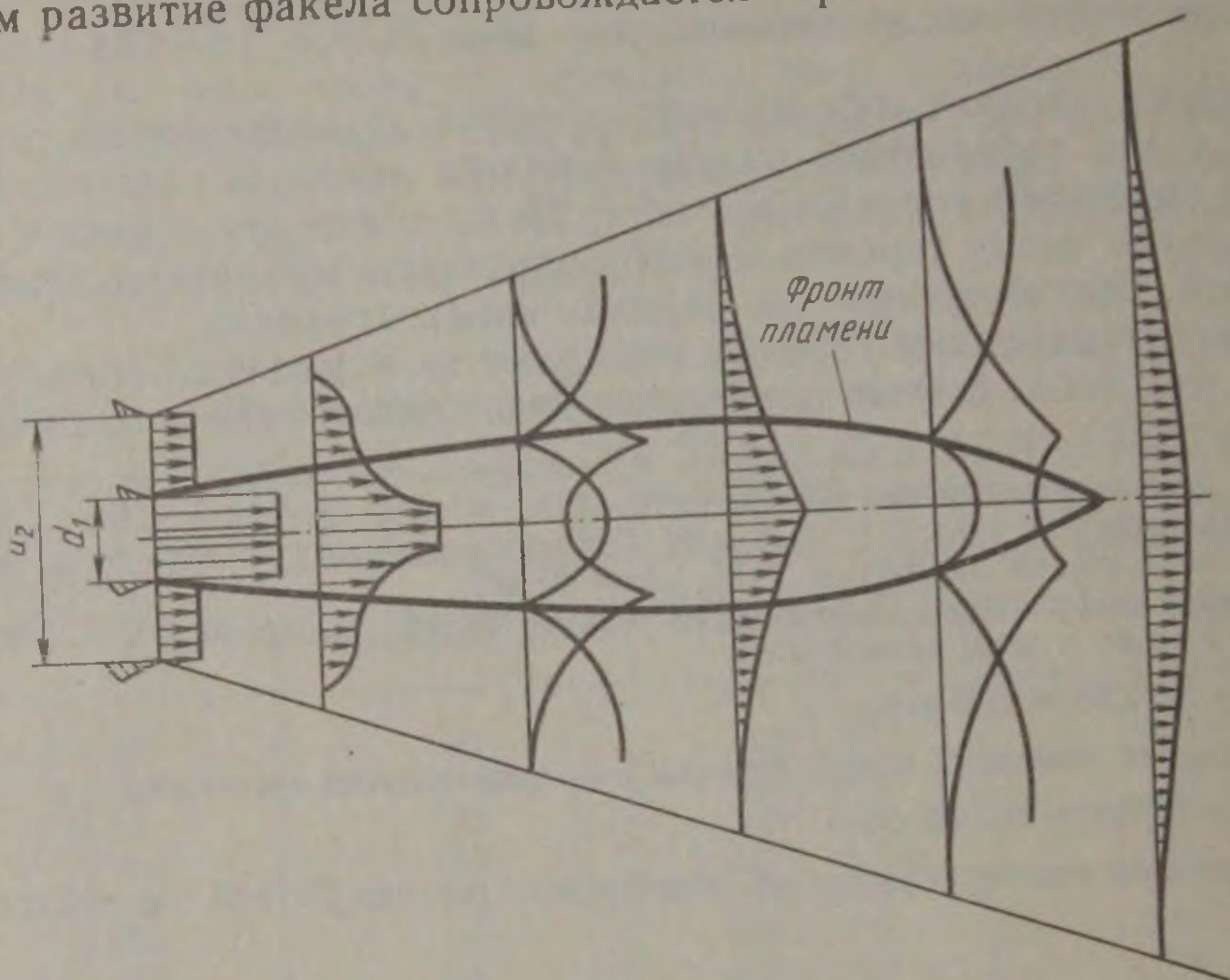


Рис. 6-10. Схема коаксиального факела

как внутри факела, так и за его пределами. Все это предопределяет большую сложность того явления природы, которое называется диффузионным факелом.

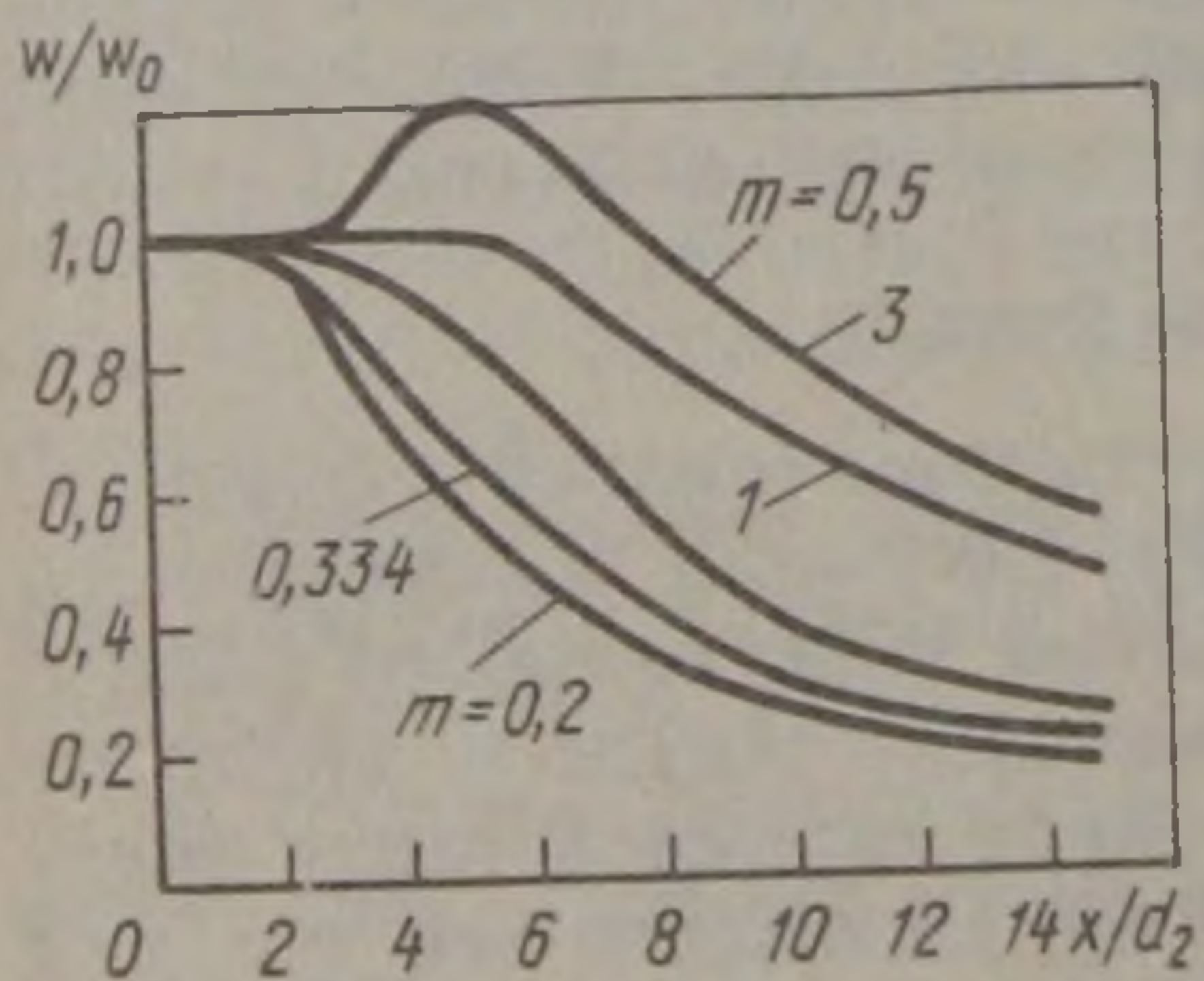


Рис. 6-11. Изменение относительной скорости по оси коаксиальной струи при разных значениях параметра m ($d_2/d_1 = 3$):

w — скорость по оси струи; w_0 — начальная скорость по оси струи; x — расстояние от среза сопла горелки, d_2 — диаметр наружной трубки

по оси коаксиальной струи от отношения импульсов внешнего и внутреннего потоков. Из кривых хорошо видно, что при $m > 1$ скорость оси струи возрастает очень существенно, что указывает

Факел исследуют многие десятилетия, но до сих пор он таит в себе много загадок, над разрешением которых и по сей день работают многие коллективы и ученые. Однако уже получены данные, позволяющие составить представление об основных закономерностях развития коаксиального факела. Многие результаты получены при исследовании коаксиальных струй, образованных газовыми потоками, имеющими различные скорости истечения и начальные температуры, но не усложненные процессами горения и теплообмена.

На рис. 6-11 представлена зависимость относительной скорости

на интенсификацию процессов смешения и вызывает соответствующий характер тепловыделения. Распределение температуры в коаксиальных струях характеризуется кривыми, приведенными на рис. 6-12, которые подтверждают отмеченный выше факт интен-

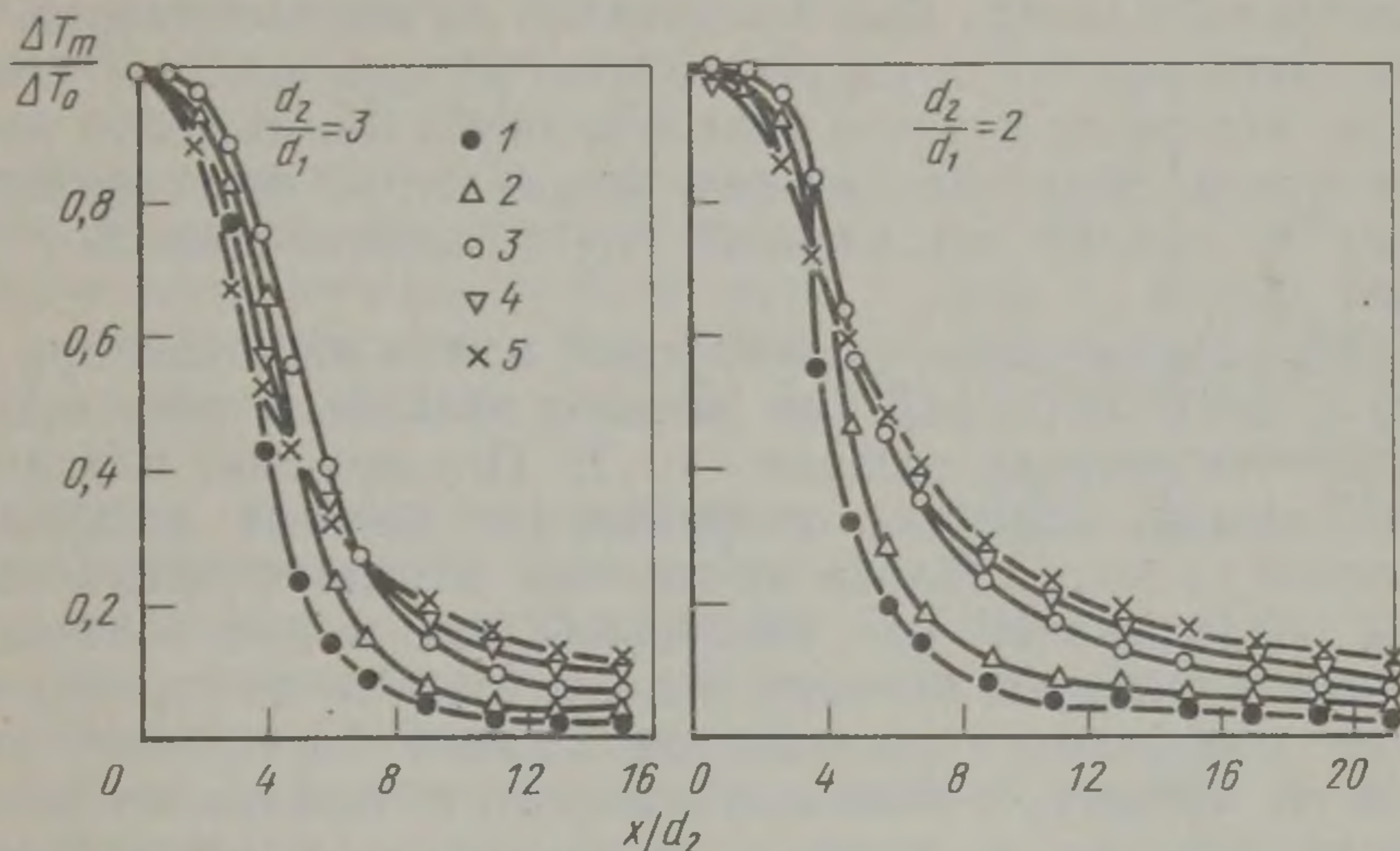


Рис. 6-12. Изменение относительной температуры $\Delta T_m/\Delta T_0$ по оси коаксиальной струи при температуре внутреннего потока T_1 , втрое превышающей температуру наружного T_2 и при различных значениях m :
1 — 5; 2 — 3; 3 — 1; 4 — 0,334; 5 — 0,2

сификации перемешивания потоков по мере увеличения величины m сверх единицы.

Приведенные выше данные по коаксиальным струям подкрепляются результатами экспериментов, проведенных на горящем коаксиальном турбулентном факеле. Зависимость длины коаксиального факела от величин m и d_2/d_1 представлена на рис. 6-13, из которого видно, что при любом соотношении d_2/d_1 кривые имеют максимум при $m = 1$. Этому можно дать физическое объяснение, если вспомнить, что коаксиальные струи истекают обычно в покоящуюся среду (или в среду со слабым движением), перемешиваясь между собой, одновременно вовлекают в процесс смешения окружающую среду. При малой скорости обтекающего (воздушного) потока смешение с окружающей средой невелико и поэтому дальность струи больше. При значении $m > 1$ основную роль в процессе смешения и с внутренней струей и с окружающей средой начинает играть обтекающая струя, кото-

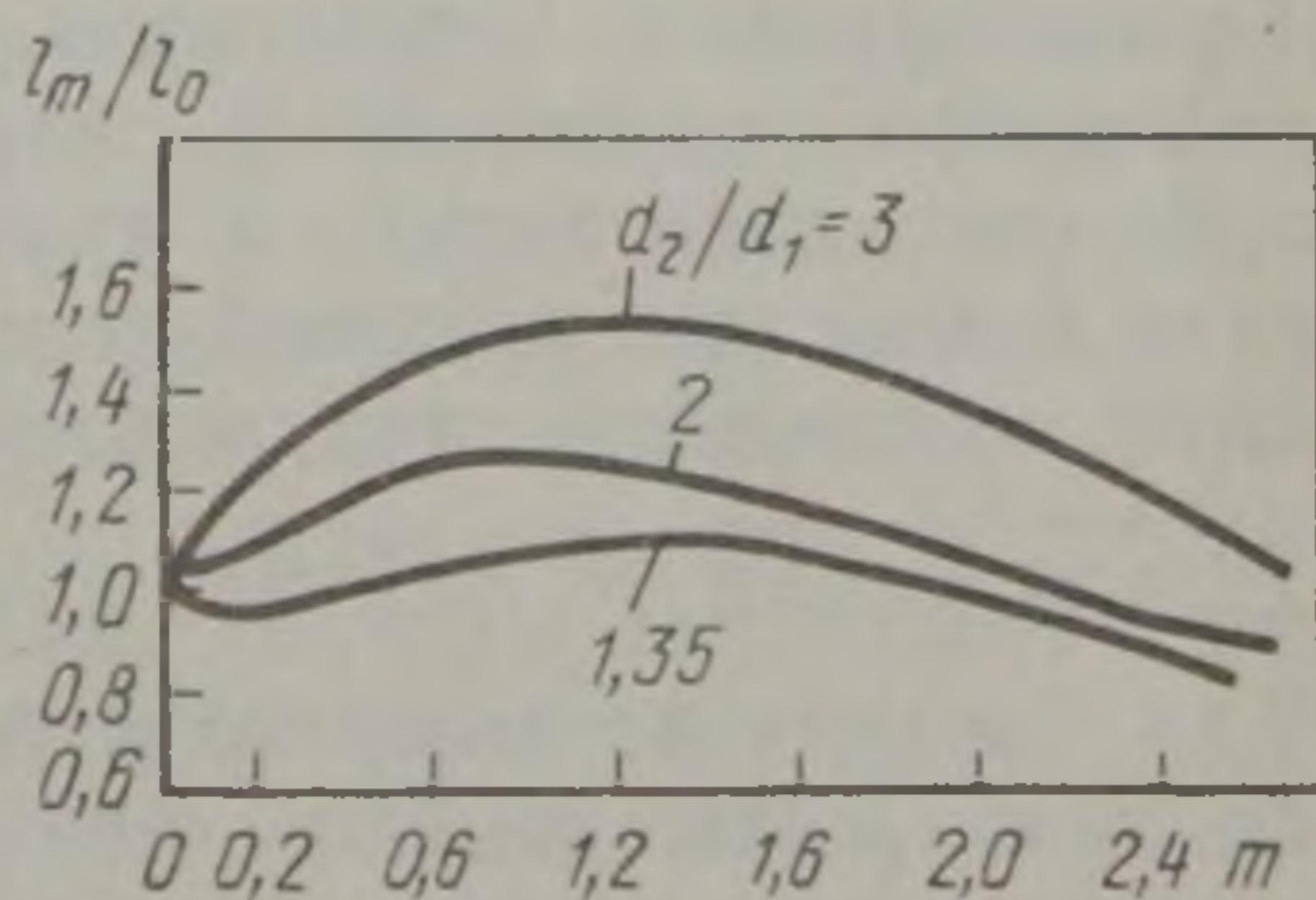


Рис. 6-13. Зависимость длины турбулентного коаксиального факела от параметра m при различных отношениях d_2/d_1 :

l_0 — длина факела при $m = 0$; l_m — то же, при $m \neq 0$

рая в результате двухстороннего перемешивания начинает интенсивно терять запас энергии и быстро затухает. Немалую роль в этом сложном процессе двустороннего смешения играет величина d_2/d_1 , которая вообще-то характеризует собой толщину облегающего потока ($d_2 - d_1$). При увеличении ее перемешивание, естественно, затягивается и струя становится дальнобойнее. Следует заметить, что после полного перемешивания между собой коаксиальных струй, образованная ими общая струя продолжает разливаться по закону затопленной струи, перемешиваясь с окружающей средой.

Двухпроводные пламенные горелки всегда работают при определенной, целесообразной для данного топлива и печи величине коэффициента расхода воздуха ($\sim 1,1$). Поддержание или изменение выбранной величины коэффициента расхода воздуха при неизменном расходе топлива на горелку всегда связано с определенным поддержанием или изменением начального соотношения импульсов и размеров потоков. Расход топлива на горелку и выбранный коэффициент расхода однозначно определяют расход воздуха на горелку, с помощью которого и определяют скорость истечения воздуха и диаметр облегающего потока. Выбирая скорость истечения воздуха, тем самым задаются сечением воздушной кольцевой трубки.

В промышленных условиях коаксиальные пламенные горелки чаще всего применяют для сжигания природного газа (иногда коксового). При этом воздух бывает или холодный или подогрет в рекуператорах до температуры $200-500^\circ\text{C}$, т. е. соотношение плотностей входящих в параметр m изменяется для природного газа в пределах $0,75-0,9$, для коксового в пределах $1,25-1,5$. Таким образом, в основном, смешение определяется отношением квадратов скоростей. В результате этого расчет горелок подобного типа опирается на правильный выбор скоростей истечения газа и воздуха, который осуществляется на основании теоретических положений, изложенных выше.

Конструкция и работа горелок

Как следует из вышесказанного, двухпроводные горелки относятся к группе горелок с внешним смешением и поэтому их целесообразно применять при сжигании топлива с высокой теплотой сгорания, когда при достаточно высоком коэффициенте расхода кислорода ($1,1-1,15$), можно обеспечить необходимый нагрев металла. Такие горелки чаще всего используют при необходимости концентрированного подвода топлива небольшим числом горелок. При применении горелок с внешним смешением наиболее просто осуществляется переход с одного вида топлива на другой.

К недостаткам этих горелок надо отнести следующее:

- 1) высокое значение коэффициента расхода воздуха, что вызывает излишний расход топлива;
- 2) необходимость наличия вентилятора для подачи воздуха;

3) потребность в специальных устройствах для регулирования количества воздуха по изменению количества газа.

Двухпроводные горелки могут работать на самых различных видах топлива при небольшом давлении и допускают широкие пределы регулирования. Скорость входа смеси в устье горелки $w_{см} = 10 \div 70$ м/с при давлении газа и воздуха 98—4900 Па. Необходимое давление газа и воздуха следует брать на 35—40 % больше динамического напора газа и воздуха соответственно в сечении f_r и в кольцевом сечении f_v (рис. 6-14).

Следует правильно выбирать соотношение скоростей газа и воздуха в указанных сечениях. Ниже приведены рекомендуемые значения отношения площади воздушного кольца f_v к площади сечения газовой трубки f_r для различных топлив:

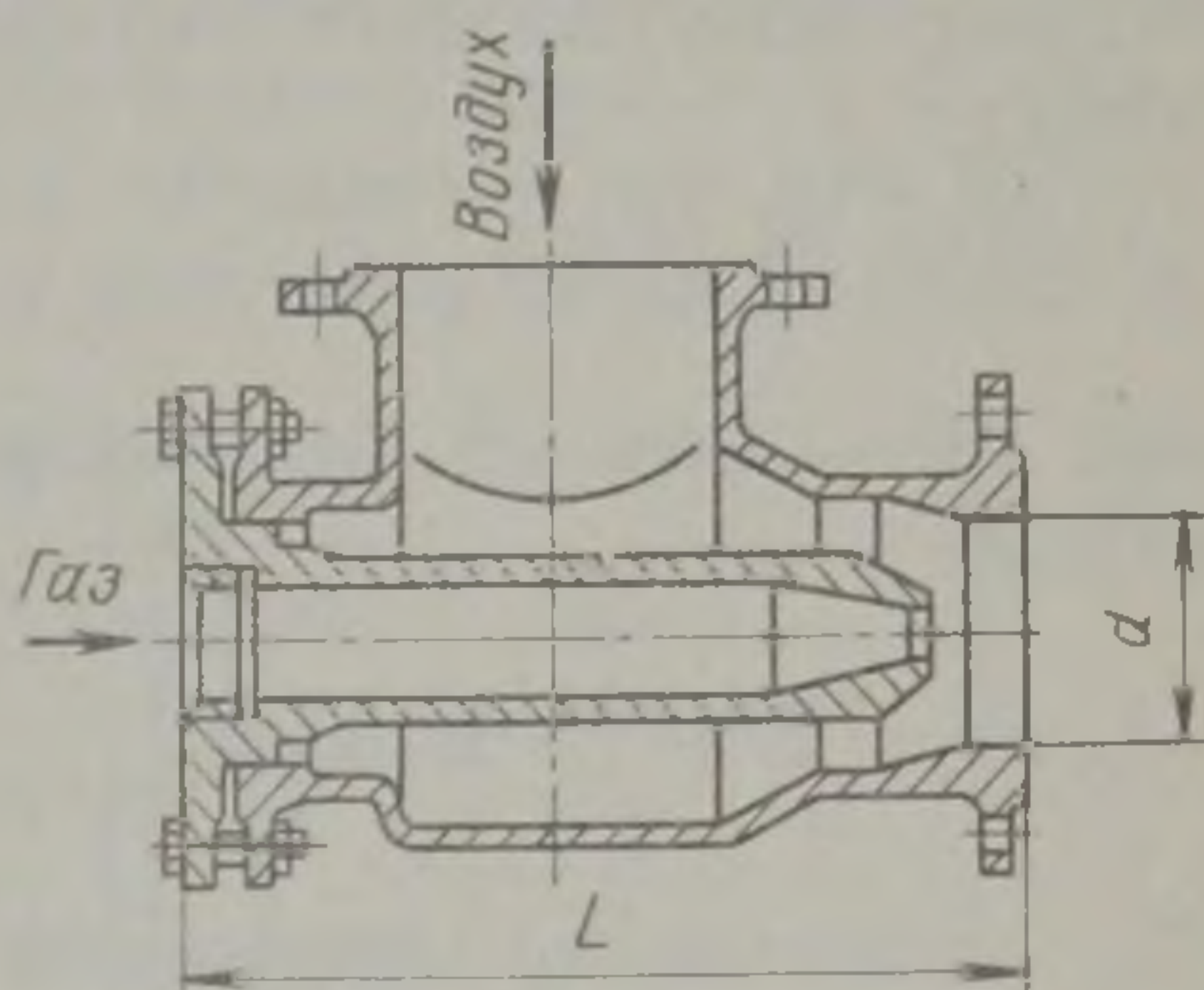


Рис. 6-14. Двухпроводная горелка

Смешанный газ при Q_H^p , кДж/м ³ :	f_v/f_r
3771—5866	1,1
5866—8380	1,9
Коксовый газ	7
Природный газ	14

Габариты горелки невелики, причем отношение длины горелки к диаметру d составляет 5—7. Горелки этого типа применяют при подогретых газе и воздухе, работа их не зависит от давления в печи. Смещение топлива с воздухом в двухпроводных горелках плохое, что вызывает образование длинного факела, поэтому их целесообразно применять в тех случаях, когда тепловыделение от пламени должно быть растянуто по длине рабочего пространства. Применение горелок данного типа обусловлено также относительной простотой их конструкции и малой стоимостью.

Расчет горелки типа «труба в трубе» проводят следующим образом:

1) зная теплоту сгорания топлива, расход газа и воздуха, задаются скоростью движения газа в сечении f_r (до 40 м/с) и определяют сечение, а затем и диаметр внутренней газовой трубки;

2) взяв соответствующее теплоте сгорания топлива отношение f_v/f_r и определив f_r , находят f_v , а затем и наружный диаметр воздушного кольца. Этот диаметр соответствует диаметру устья горелки;

3) по динамическому напору газа и воздуха вычисляют необходимое давление.

3. Пламенные турбулентные горелки

Общая характеристика закрученного факела

Из теории закрученных струй известно, что наиболее часто в качестве интегральной характеристики крутки применяется величина

$$\Omega = M / \left(K \frac{d}{4} \right),$$

где M — момент количества движения струи, постоянный вдоль струи,

$$M = 2\pi\rho \int_0^R r^2 \omega_x \omega_\varphi dr;$$

K — количество движения струй,

$$K = 2\pi \int_0^R r (\rho \omega_x^2 + p) dr;$$

d — диаметр устья струи; ω_x, ω_φ — аксиальная и тангенциальная составляющие вектора скорости; p — статическое давление в точке, где замеряется скорость;

Таблица 6-2. Значения величины относительного расхода при различной степени закручивания струи

Характер струи	Отношение V/V_0 при x/d	
	5	20
Незакрученная	2,0	5,1
Слабозакрученная	4,0	7,0
Сильнозакрученная	5,1	9,8

r — текущее значение радиуса струи; R — радиус струи.

Качество смешения в закрученных факелах зависит от интенсивности крутки. При постепенном увеличении интенсивности крутки наступает такой момент, когда возникает резкое снижение осевой скорости, которое при дальнейшем увеличении крутки приводит к обратному осевому току, вызывая эжекцию по центру струи

в направлении к устью горелки. Все это способствует интенсификации смешения топлива с воздухом, ускоряет процесс выгорания топлива, снижает дальность факела, обеспечивает интенсивное движение газов в печи. Величина Ω зависит от способа образования закрученной струи воздуха, т. е. от конструкции горелки, которая тем самым оказывает решающее влияние на такие важные характеристики факела как эжекционная способность и дальность закрученных струй. Количество подсосанной среды может характеризоваться относительной величиной V/V_0 , где V — полный расход в исследуемой точке струи, а V_0 — расход на выходе из сопла.

В табл. 6-2, заимствованной из работы Д. Н. Ляховского, приведен относительный расход V/V_0 через сечение различных струй.

Дальнобойность закрученной струи также существенно зависит от интенсивности крутки, что хорошо иллюстрируется данными, приведенными на рис. 6-15.

Быстрое смешение топлива с воздухом в закрученных факелах приводит к интенсивному тепловыделению вблизи от горелки (рис. 6-16), обуславливающему соответствующее изменение температуры в факеле по его длине. Сравнительно короткий факел, интенсивное тепловыделение в большом объеме — все это определяет область применения горелок, в которых осуществляется

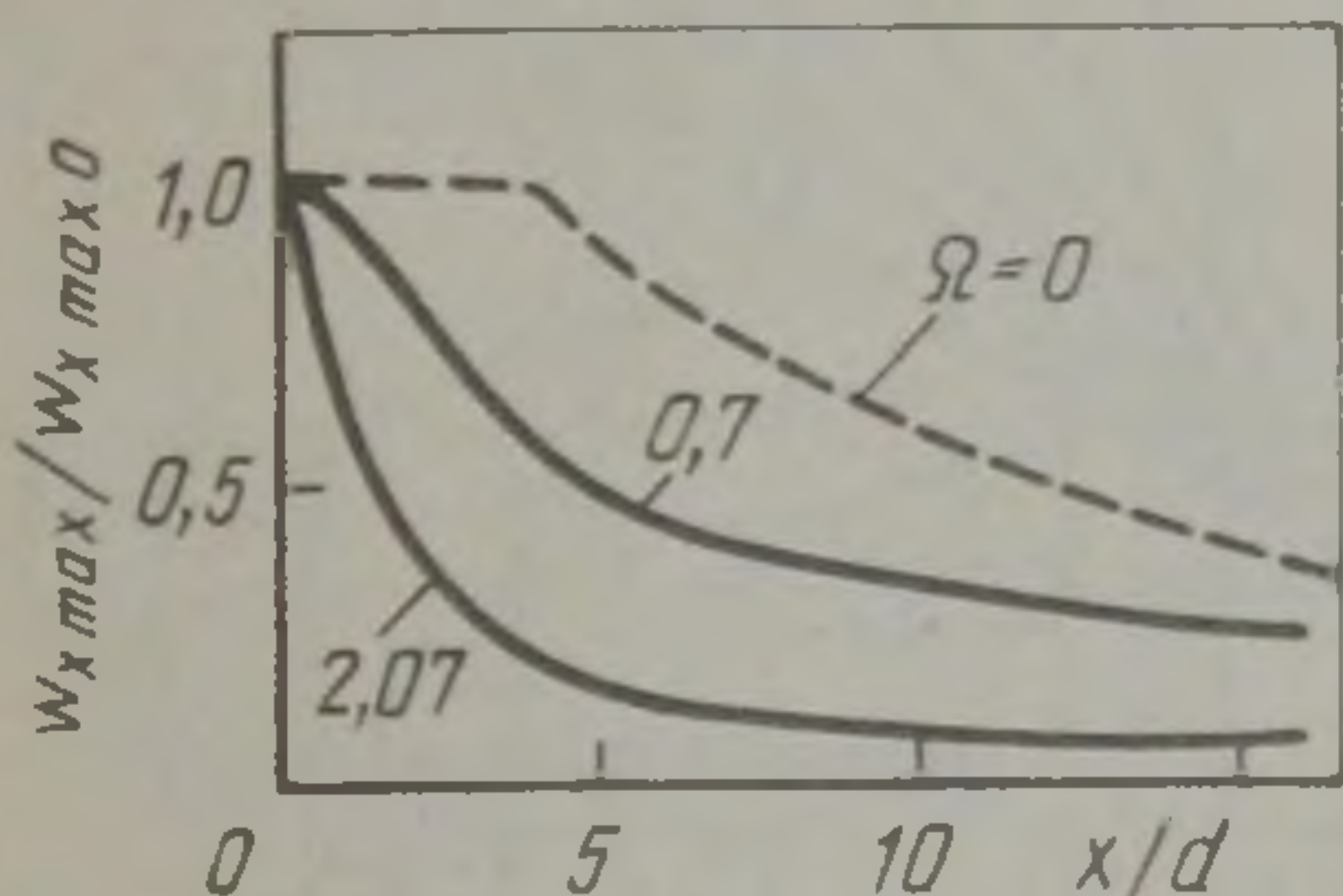


Рис. 6-15. Зависимость сравнительной дальнобойности струй в осевом направлении от величины характеристики крутки:

$w_{x \max}$ — наибольшая аксиальная скорость в данном сечении струи;
 $w_{x \max 0}$ — то же, на срезе сопла

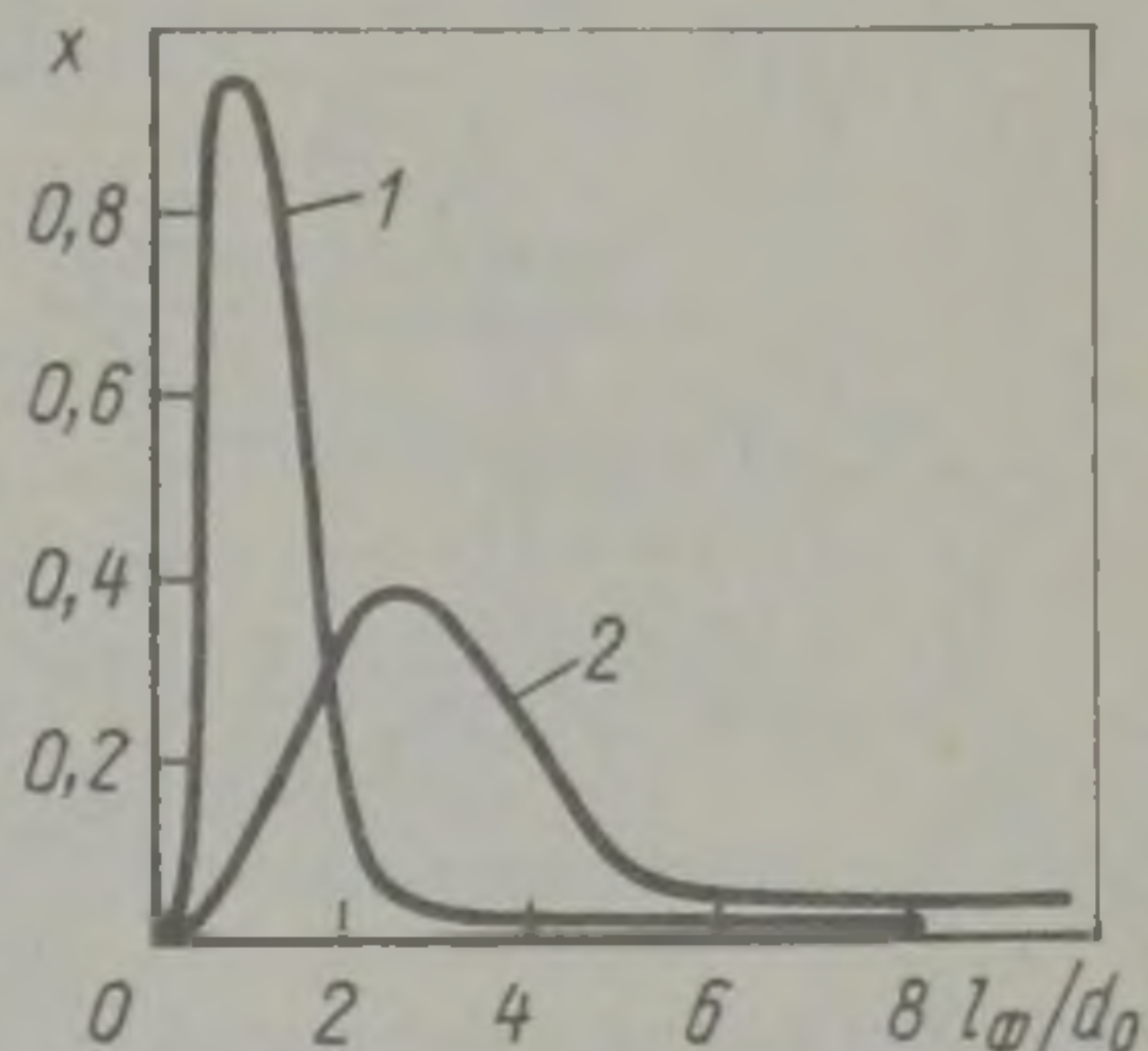


Рис. 6-16. Интенсивность процесса выгорания по длине закрученного 1 ($\Omega = 1,86$) и прямого 2 факелов: x — степень выгорания в долях единицы; l_{ϕ} — длина факела; d_0 — диаметр воздушного сопла

закручивание, чаще всего, воздушного потока. Наиболее распространенными горелками подобного типа являются, так называемые, турбулентные горелки.

Конструкции и работа горелок

Турбулентные горелки по своим конструктивным формам очень многообразны. Общим для наиболее распространенных горелок является то, что в них воздушная струя поступает тангенциально по отношению к газовой. Благодаря этому воздух приобретает вращательное движение, что способствует улучшению перемешивания и общей турбулизации факела.

Одной из наиболее распространенных является турбулентная горелка конструкции Стальпроекта (рис. 6-17), рассчитанная на топливо с теплотой сгорания $3770-8280$ кДж/м³. В этой горелке воздух получает вращательное движение благодаря улиткообразной форме воздушной части корпуса. Газ поступает в устье горелки со значительной скоростью, которая обеспечивается постоянным сужением газового сопла и пережимающим действием внутренней трубки. Вращающийся вокруг газовой струи воздух разбивает ее, обеспечивая сравнительно хорошее перемешивание их друг с другом. Горелка работает при коэффициенте расхода

воздуха, равном 1,1, и создает факел, длина которого в 7—10 раз больше диаметра устья горелки.

Для турбулентных горелок данной конструкции скорость газовой смеси в устье горелки принимают в пределах 15—40 м/с, причем при скорости смеси 40 м/с давление газа и воздуха должно составлять 4,9—6,9 кПа.

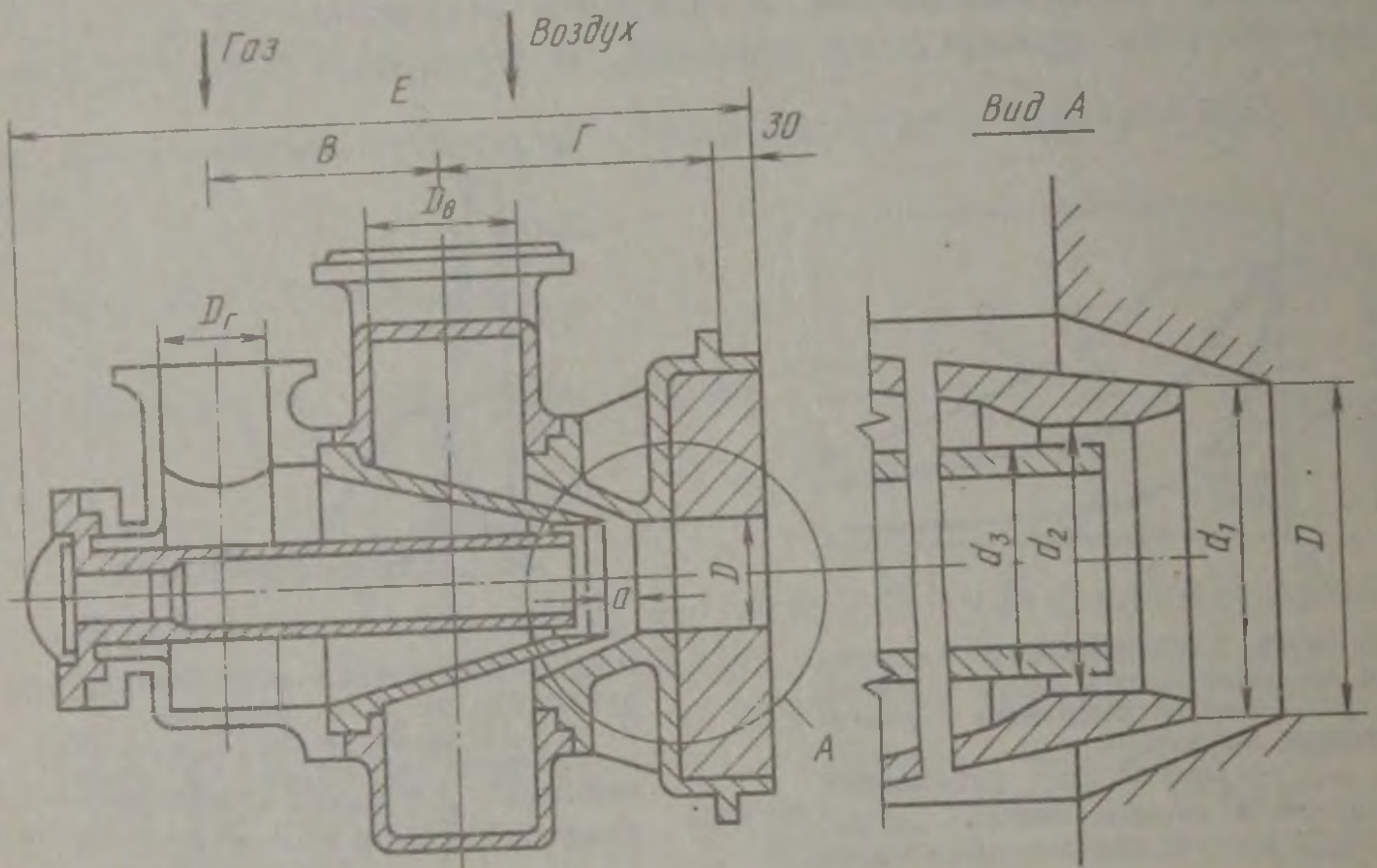


Рис. 6-17. Турбулентная горелка конструкции института «Стальпроект»

Достоинства турбулентных горелок:

- 1) сравнительно низкое давление газа в воздуха;
- 2) обеспечивают при низком давлении и довольно простой конструкции достаточно хорошее смешение топлива с воздухом;

3) могут работать на подогретых газе и воздухе.

Благодаря этим достоинствам турбулентные горелки широко применяют на различных нагревательных и термических печах. Ниже приведены размеры турбулентных горелок конструкции «Стальпроект», мм:

D	D_r	D_b	B	Γ	E	d_1	d_2	d_3	a
Для $Q_H^p = 3770 \div 5870$ кДж/м ³									
50	65	65	115	120,5	375	50	40	34	13
60	75	75	125	132,5	405	60	48	40	15
75	100	100	155	155	490	75	60	50	19
100	125	125	185	183,5	570	100	80	68	25
125	150	150	210	213	645	125	100	85	31
150	200	200	260	255	770	150	120	100	38
200	250	250	310	312	910	200	160	135	50

Для $Q_{\text{в}}^{\text{р}} = 5870 \div 9200$ кДж/м³

50	50	65	110,5	120,5	365	48	40	35	13
60	65	75	120	132,5	395	57	48	42	15
75	75	100	140,5	155	450	71	60	53	19
100	100	125	170,5	183,5	540	95	80	70	25
125	125	150	200,5	213	615	119	100	88	31
150	150	200	235	255	715	142	120	105	38
200	200	250	285	312	855	190	160	140	50

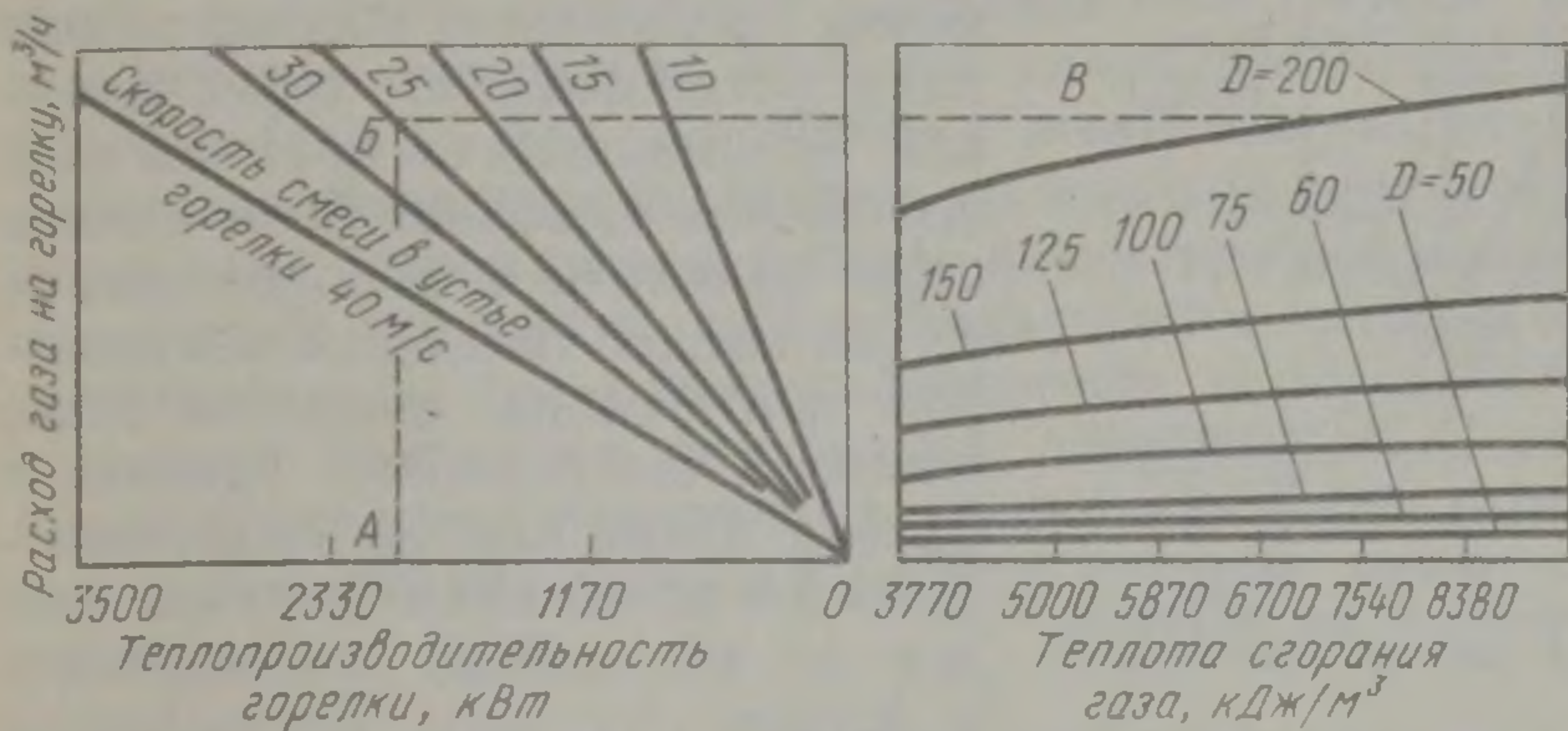


Рис. 6-18. Номограмма для выбора турбулентных горелок

Гурбулентные горелки можно выбирать, пользуясь номограммой, представленной на рис. 6-18. Горелку выбирают следующим образом:

1) зная теплоту сгорания $Q_{\text{в}}^{\text{р}}$ и часовой расход топлива V на горелку, определяют теплопроизводительность горелки $Q = VQ_{\text{в}}^{\text{р}}$;

2) задаваясь скоростью выхода топлива из горелки (20—30 м/с) по полученной теплопроизводительности и номограмме выбирают горелку (определяют ее диаметр D). Выбор ведут по пунктиру ABV ;

3) определив диаметр D , по приведенным выше данным находят все необходимые размеры горелки;

4) необходимое давление газа и воздуха определяют по формулам:

$$p_{\text{г}} = \xi_{\text{г}} h_{\text{г}};$$

$$p_{\text{в}} = \xi_{\text{в}} h_{\text{в}};$$

где $h_{\text{г}}$ и $h_{\text{в}}$ — скоростные напоры газа и воздуха; $\xi_{\text{г}}$ и $\xi_{\text{в}}$ — коэффициенты потерь, $\xi_{\text{г}} = 0,7 \div 0,8$; $\xi_{\text{в}} = 2,5 \div 3$.

4. Горелки с регулируемой длиной пламени

В некоторых печах, как например в нагревательных колодцах, расход топлива изменяется во времени. При этом в соответствии с изменением тепловой нагрузки будет изменяться скорость исте-

чения газа и воздуха у горелки, и длина факела, что может привести к нежелательному изменению температуры по длине рабочего объема печи. Во избежание этого применяют горелки с регулируемой длиной пламени.

На рис. 6-19 представлена горелка с регулируемой длиной пламени, предназначенная для нагревательного колодца с одной верхней горелкой. Длина факела регулируется при помощи изменения положения газового клапана, установленного перед горелкой.

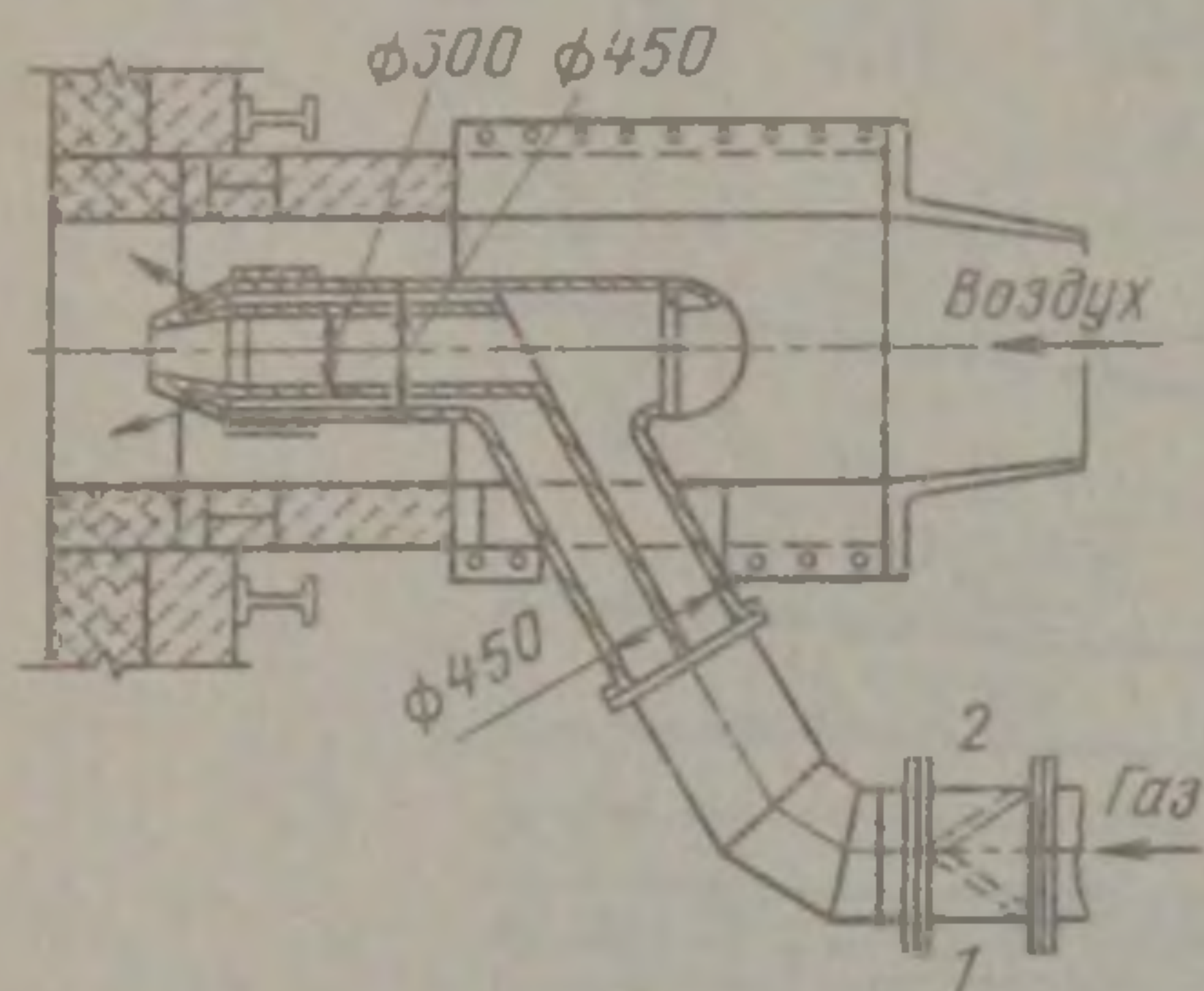


Рис. 6-19. Горелка с регулируемой длиной пламени для нагревательных колодцев

Длина факела регулируется при помощи изменения положения газового клапана, установленного перед горелкой. Возможны два крайних 1, 2 положения клапана. Если клапан будет находиться в положении 1, то газ пойдет только по центральной трубе сопла, смешение будет плохим, что вызовет удлинение факела. Если клапан будет находиться в положении 2, то газ пойдет по кольцевому пространству и выйдет из него веерообразно

шестью струями (на рис. 6-19 обозначено стрелками). Это обеспечит лучшее смешение и более короткий факел. Поскольку клапан может находиться также в каком-то промежу-

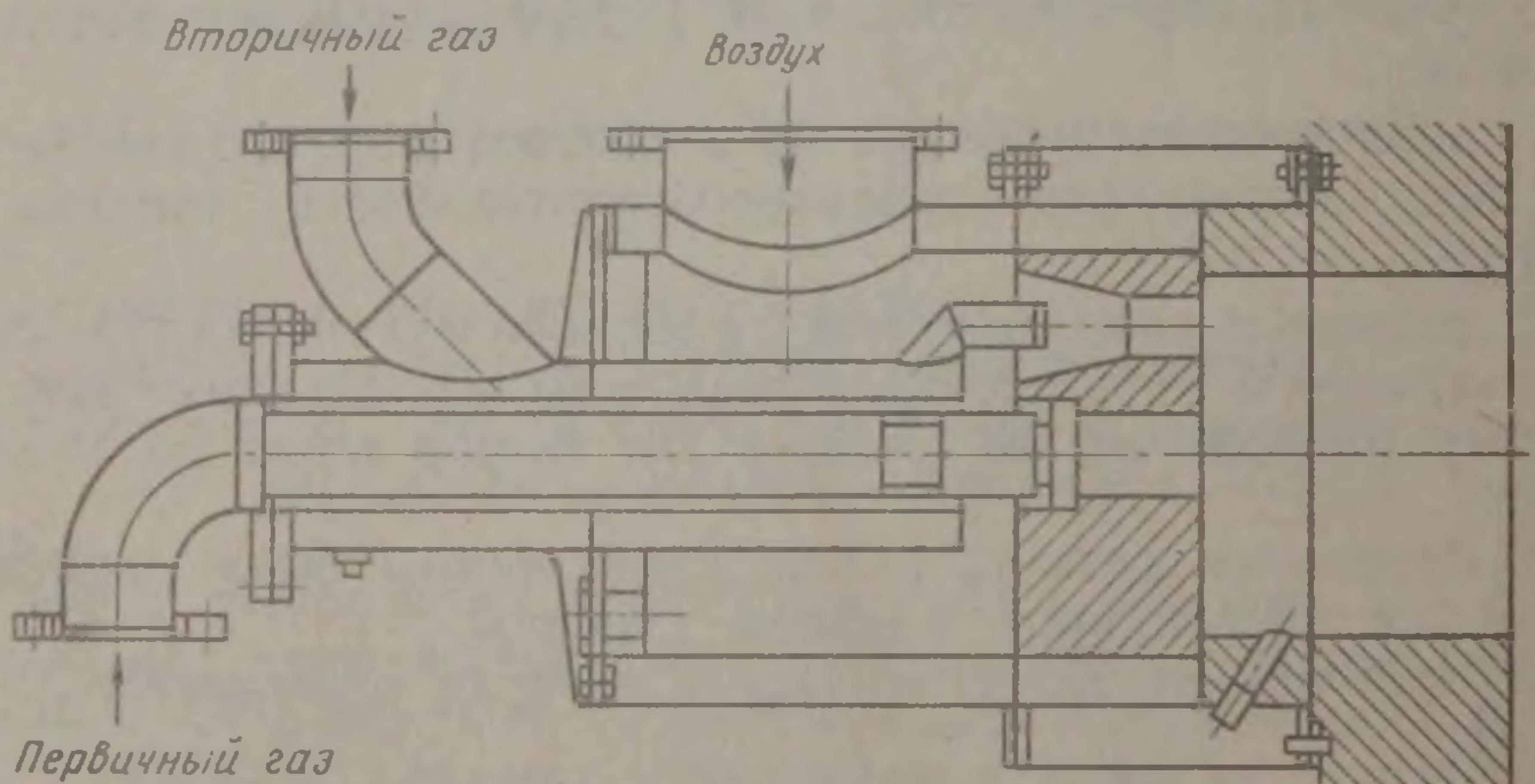


Рис. 6-20. Горелка с регулируемой длиной пламени конструкции японской фирмы

точном положении, представляется возможным обеспечить необходимую регулировку длины пламени.

На рис. 6-20 представлена горелка с регулируемой длиной пламени, разработанная одной из японских фирм. К горелке осуществляется подвод первичного и вторичного газов. Первичный газ поступает через центральное сопло, а вторичный — через шесть сопел, оси которых совпадают с отверстиями для прохода воздуха. Если в горелку подается только первичный газ, то из-за

слабого смещения образуется растянутый факел. При подаче только вторичного газа смещение будет лучше, а факел будет короткий. Комбинируя соотношением первичного и вторичного газов, можно поддерживать факел необходимой длины.

5. Плоскопламенные горелки

Как отмечалось выше, в настоящее время все больше распространение получает косвенный радиационный режим теплообмена, при котором решающее значение имеет излучение кладки печи (обычно свода). Для обеспечения этого излучения кладку надо как можно равномернее нагреть до высокой температуры. Естественно, что такой метод работы печей требует соответствующих горелочных устройств, при использовании которых пламя будет растекаться по поверхности футеровки и обеспечивать соответствующий нагрев ее внутренней поверхности. Для этой цели используются так называемые плоскопламенные горелки различных конструкций, в основе работы которых лежит создание разомкнутого факела.

Общая характеристика разомкнутого факела

Под разомкнутым пламенем принято понимать факел с углом раскрытия 180° , растекающийся тонким слоем и прилегающий к поверхности свода, в который вмонтирована горелка (рис. 6-21).

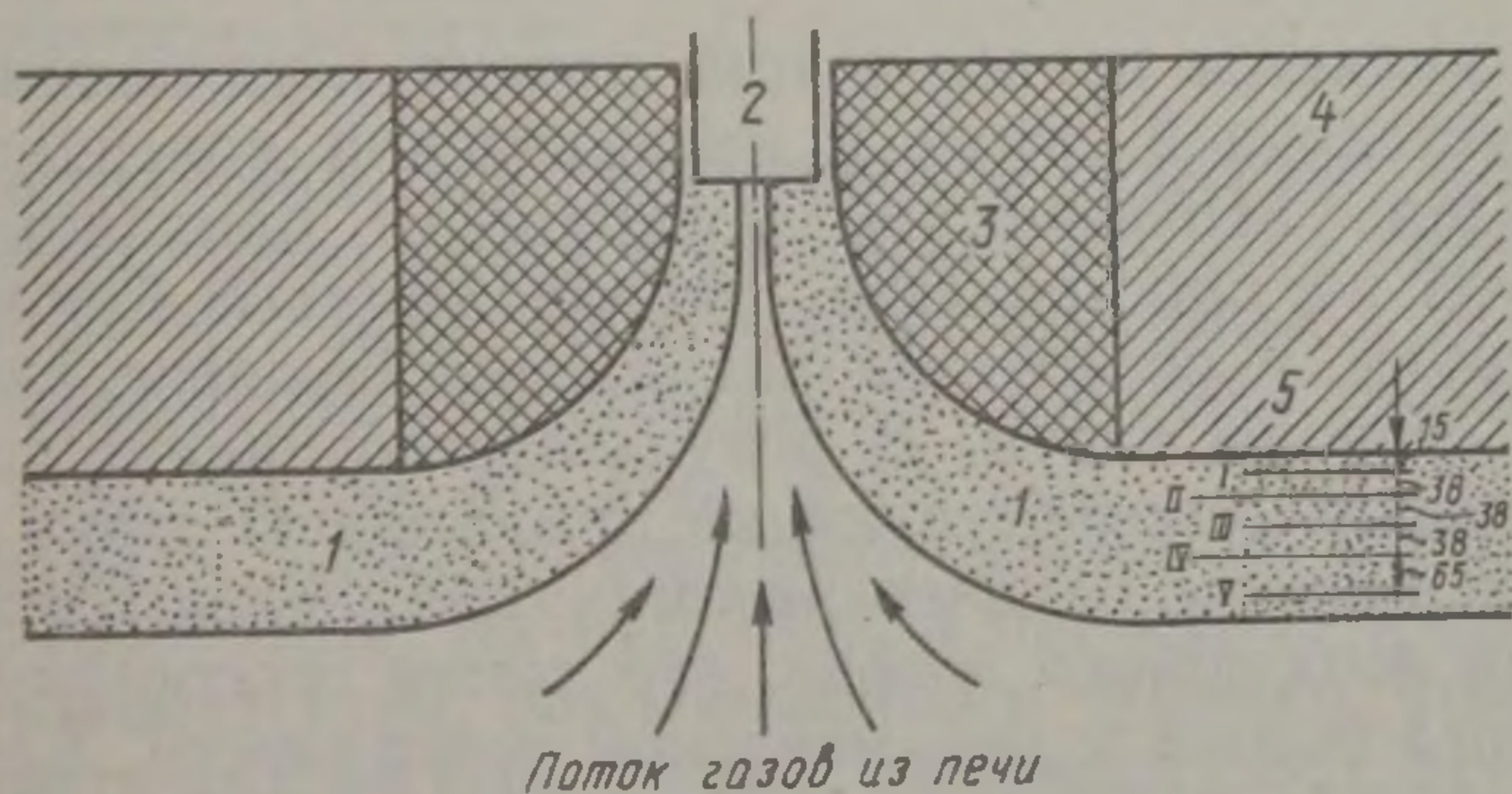


Рис. 6-21. Схема разомкнутого факела:

1 — разомкнутый факел; 2 — сопло горелки; 3 — горелочный камень; 4 — наружная поверхность свода; 5 — внутренняя поверхность свода

Механизм теплофизических процессов, протекающих в разомкнутом факеле, еще не вполне ясен, однако некоторые общие положения можно считать установленными. Как и в любом другом, в разомкнутом факеле первостепенную роль играет процесс тепловыделения. Можно считать, что протяженность зоны дожигания топлива составляет приблизительно одну пятую часть общей длины факела. Во многих работах подчеркивается возможное каталитическое влияние керамической поверхности на процесс

горения в разомкнутом факеле. Образующиеся раскаленные газы, двигаясь около поверхности керамической кладки, обеспечивают интенсивную передачу тепла главным образом конвекцией (толщина слоя газов невелика, поэтому излучение играет подчиненную роль). Кладка раскаляется и обеспечивает интенсивное излучение на нагреваемый материал. Тем самым селективное излучение газов трансформируется в сплошное по спектру излучение керамической поверхности.

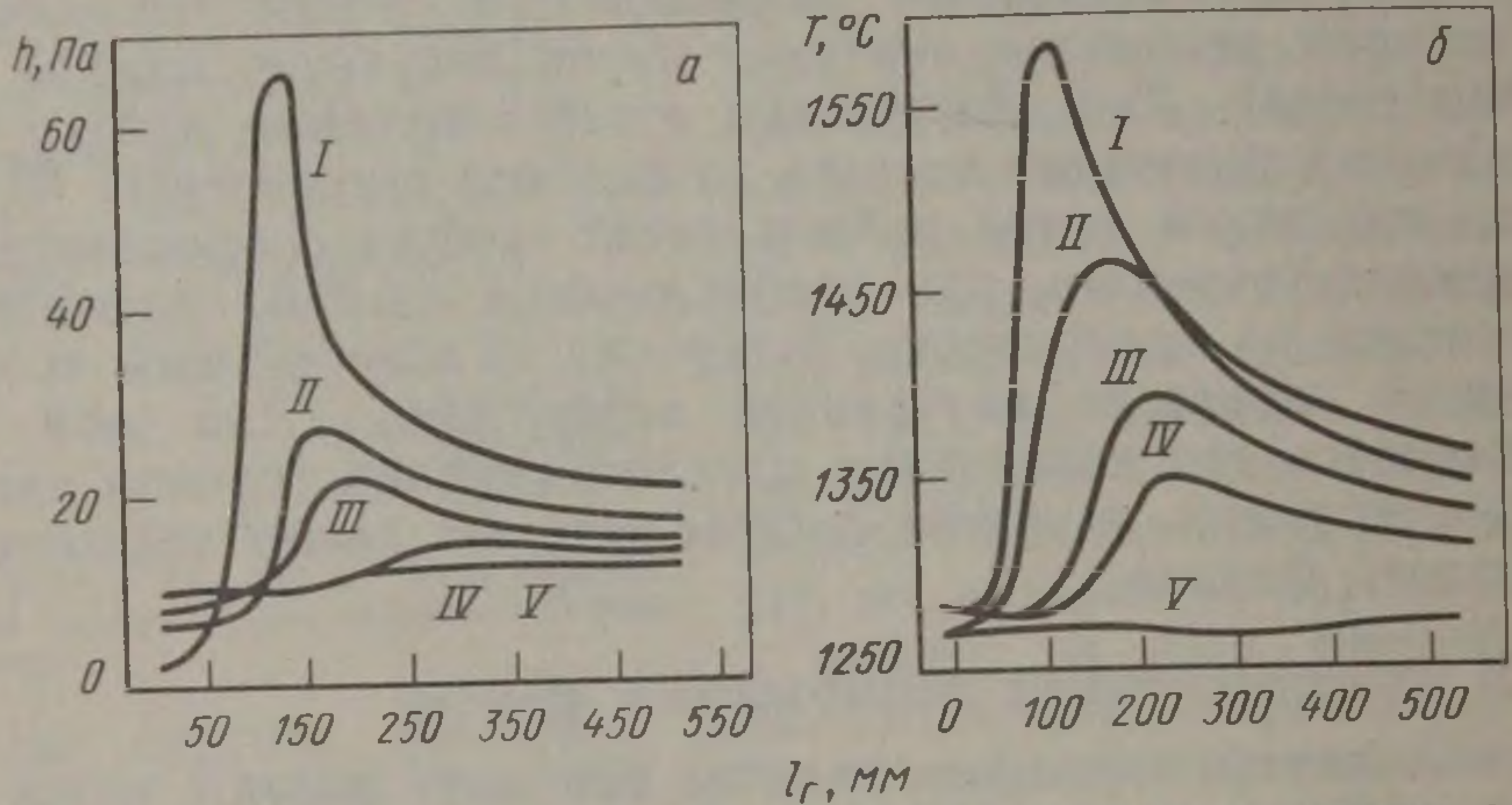


Рис. 6-22. Зависимость изменения полного напора h (а) и температуры T (б) на разном расстоянии от оси горелки l_r от степени удаления от керамической поверхности (горелка ГПП):
I—V — сечения, см. рис. 6-21

Важным является вопрос о том, почему осуществляется прилипание пристеночной струи к керамической поверхности. При движении вдоль керамической поверхности происходит подсос в струю газов из пространства, расположенного между поверхностью и струей, и образуется разряжение большее, чем с противоположной стороны струи. В результате возникает поперечный градиент давлений, способствующий прилипанию струи к поверхности. В большинстве случаев разомкнутый факел создается при закручивании воздушного потока, что также способствует прилипанию газового потока к керамической поверхности. Есть данные о том, что одной из причин прилипания разомкнутого факела к поверхности является процесс горения, который увеличивает турбулентность потока, повышает его эжектирующую способность, что и способствует прилипанию газового потока к керамической поверхности.

Большой интерес представляют исследования, проведенные в лаборатории института газа АН УССР и на Криворожском металлургическом комбинате, показывающие, что важнейшие процессы в разомкнутом факеле протекают в тонком газовом слое, прилегающем к керамической поверхности.

На рис. 6-22 представлены результаты, полученные при исследовании полного напора и температуры газов на различном уда-

лении от керамической поверхности. На рис. 6-23 показано изменение температуры факела на разном расстоянии от свода. Приведенные данные указывают на интенсивное протекание гидродинамических и тепловых процессов в пределах 120—150 мм толщины разомкнутого факела. Плоскопламенные горелки весьма перспективны, поэтому исследования разомкнутого факела должны быть продолжены. Необходимо, в частности, провести исследования изменения температуры керамической поверхности в зависимости от условий сжигания топлива.

Конструкция и работа горелок

Для создания разомкнутого пламени, стелющегося по поверхности свода, в плоскопламенных горелках применяют горелочные камни специальной формы и рассекатели. Кроме того, воздушному

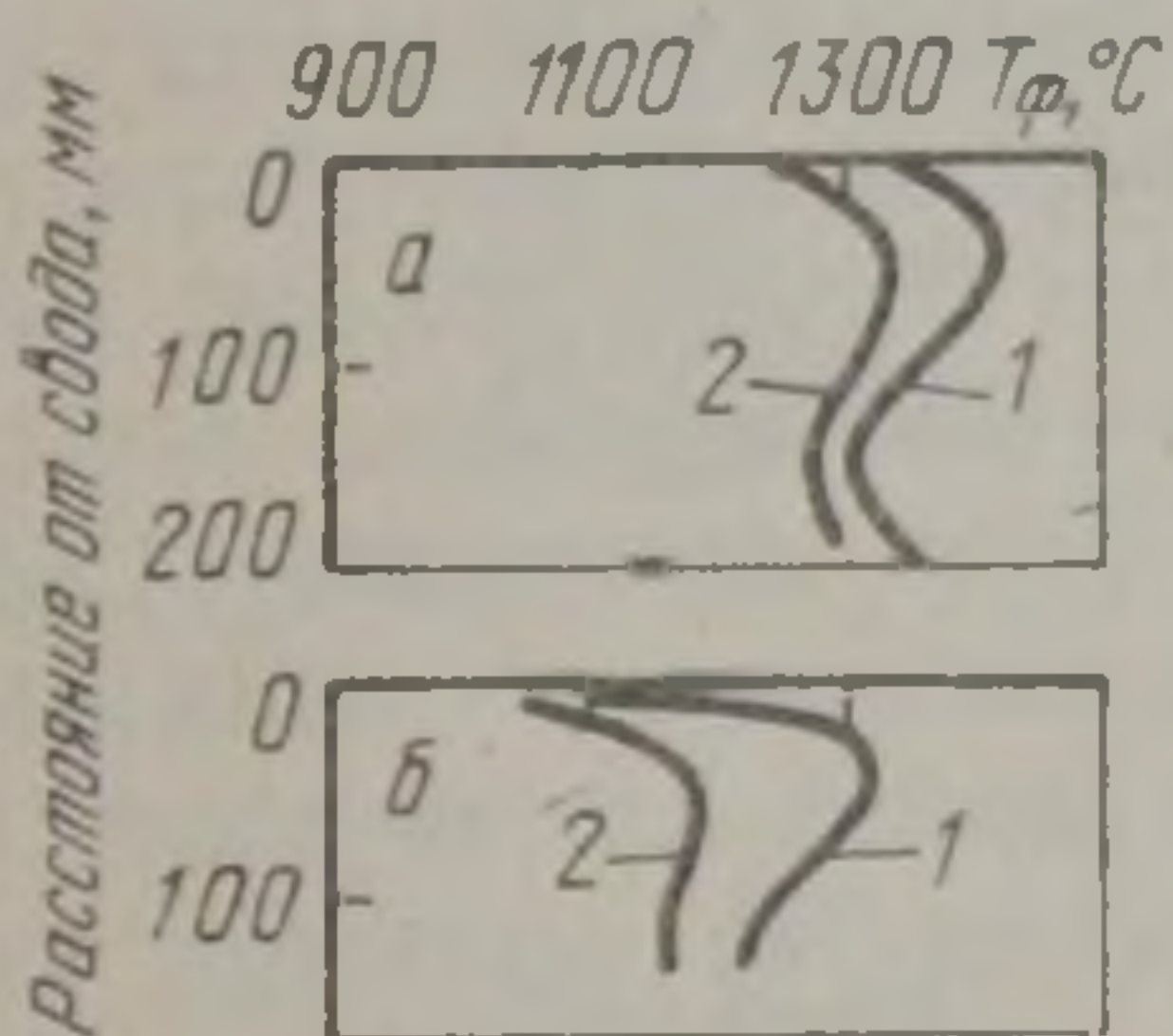


Рис. 6-23. Изменение температуры факела плоскопламенной горелки на разном расстоянии от свода: а — природный газ; б — коксовый газ; 1, 2 — расстояние от оси горелки соответственно 210 и 600 мм

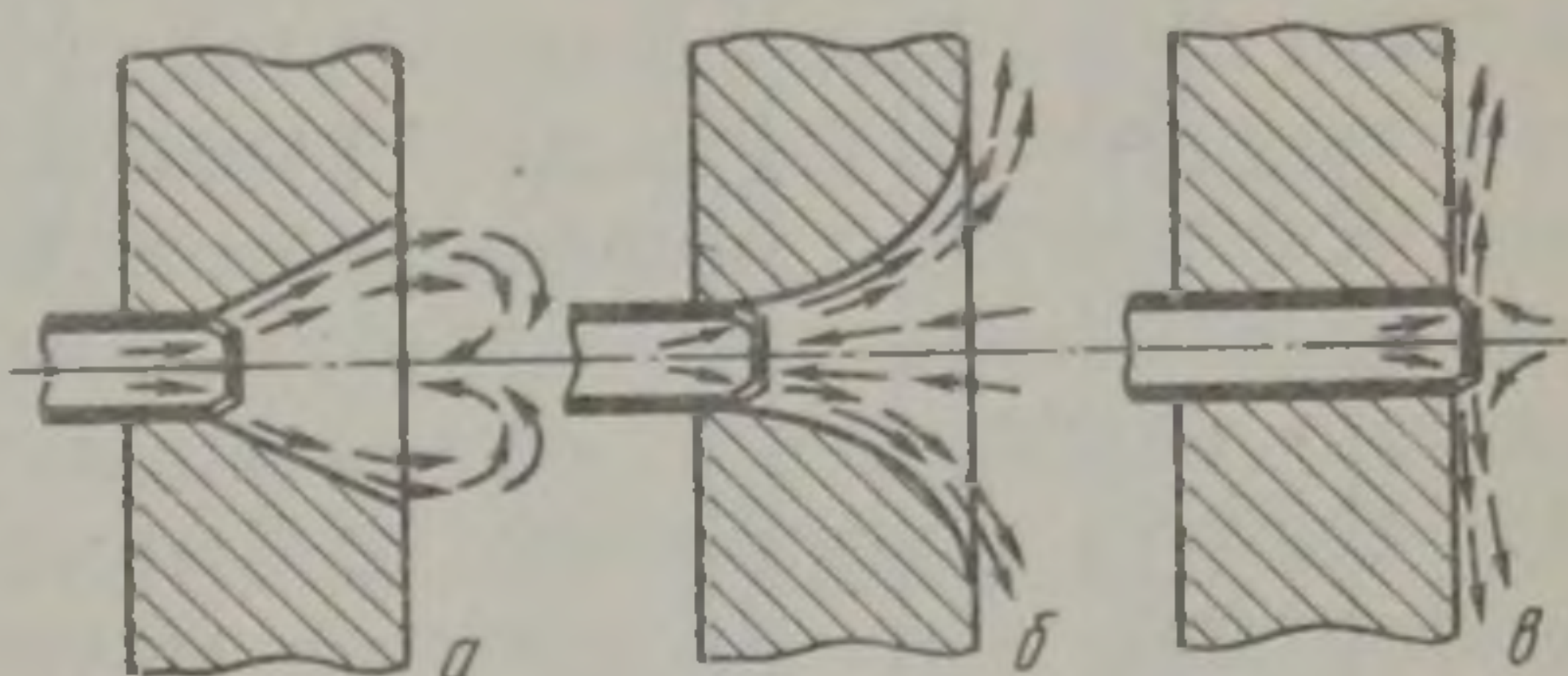


Рис. 6-24. Конфигурация туннелей плоскопламенных горелок

потоку обычно придается вращательное движение. Конфигурация туннеля горелочного камня существенно влияет на форму пламени (рис. 6-24, а—в). Чаще всего плоскопламенные горелки выполняют или вообще без туннеля (рис. 6-24, в), или с таким туннелем, который представлен на рис. 6-24, б.

Конструкции плоскопламенных горелок в настоящее время весьма многообразны. На рис. 6-25, а приведена горелка с металлическим рассекателем, без горелочного туннеля, которую можно устанавливать как на своде, так и на стенах печи. На рис. 6-25, б дана горелка с горелочным туннелем подобным тому, который изображен на рис. 6-24, б. Вращательное движение воздуха в этой горелке создается завихрителями, установленными в воздушной трубе. Применяются плоскопламенные горелки двух типов (рис. 6-25, в и г), причем горелка ГПП предназначена для сжигания природного газа, а горелку ГР используют для сжигания природного, коксового и смешанных газов.

В горелках ГПП разомкнутый факел создается закручиванием воздуха, для чего используют улиткообразной формы корпус горелки и направляющий винт с переменным шагом. Газ подается по центральной трубке и смешивается с воздухом, выходя из нее через небольшие отверстия (на рис. 6-25, в — обозначены *d*).

Разработан ряд типоразмеров горелок для низкого, среднего и высокого давления (от 3 до 70 кПа). В зависимости от расхода число отверстий для газа изменяется.

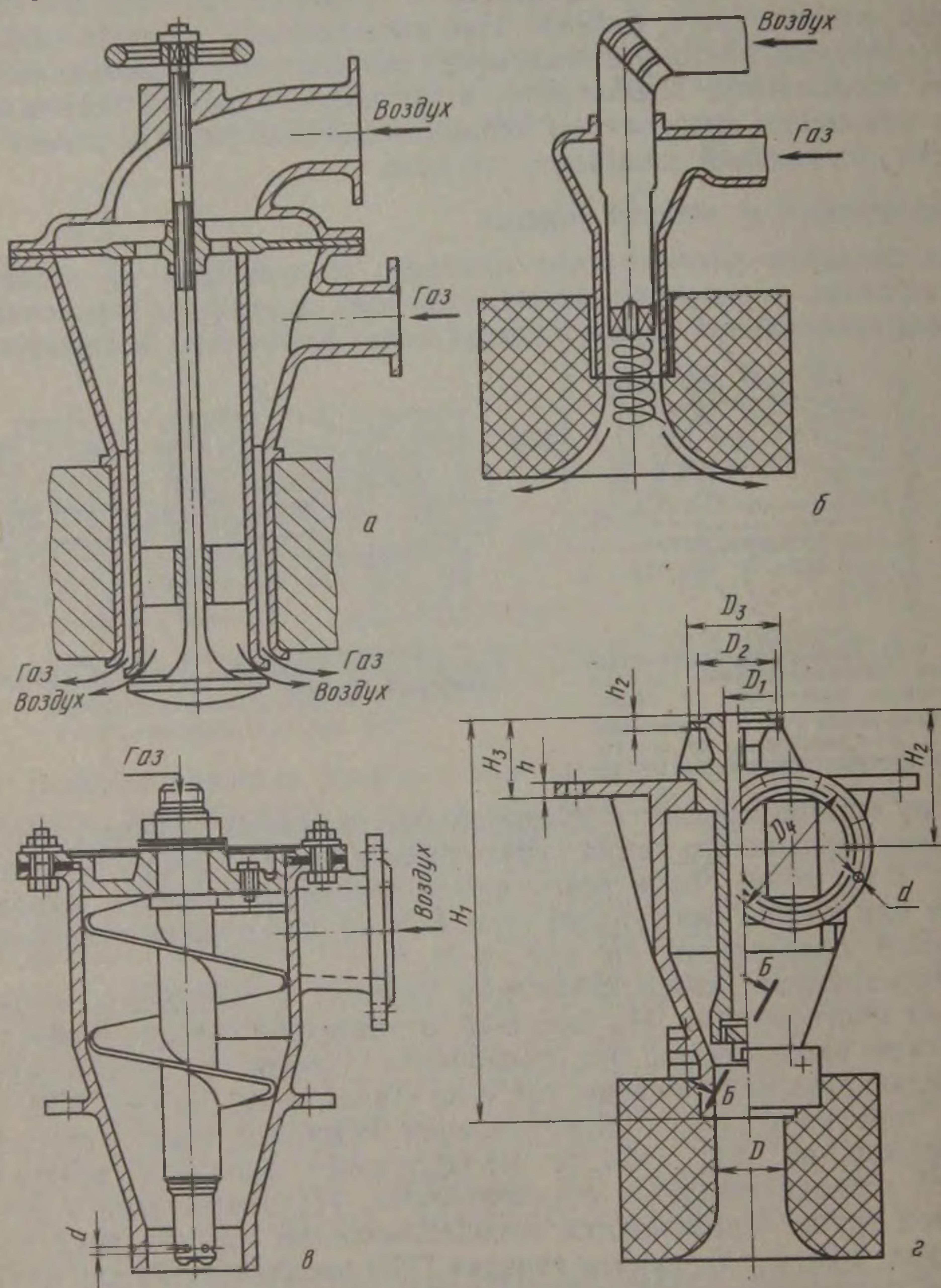


Рис. 6-25. Конструкции плоскопламенных горелок:
 а — с металлургическим рассекателем; б — с завихрителем; в — конструкции института газа АН УССР и института «Теплопроект» (горелка ГПП); г — конструкции ВНИИМТа и института «Стальпроект» (горелка ГР)

В горелках ГР закручивание воздуха происходит вследствие тангенциальной его подачи в корпус горелки. Кроме того производится закручивание газа, который выходит через сопло с ко-

сыми прорезями, число которых изменяется в зависимости от расхода газа. Воздух в рассматриваемых горелках может подогреться до 400 °С. Они могут работать при изменении величины коэффициента расхода воздуха от 0,8 до 2. Пределы регулирования с сохранением плоского пламени 1 : 4 от выбранного расхода газа.

6. Радиантные трубы

Как уже отмечалось выше, различные виды термической и термо-механической обработки требуют отделения продуктов сгорания от нагреваемого металла, одним из методов которого является муфельирование пламени. Для этого применяют радиантные трубы, в которых сжигается топливо. Радиантные трубы выполняют из жаростойких хромо-никелевых сталей (18—25 % Cr, 13—25 % Ni). Они могут достаточно надежно работать при температуре поверхности около 1000 °С и устанавливаются на печах с температурой нагрева металла 900—920 °С. Для обеспечения эффективной работы радиантных труб необходимо стремиться к достижению максимально возможного теплонапряжения поверхности трубы, т. е. количества тепла, отдаваемого 1 м² поверхности трубы в единицу времени. Радиантные трубы бывают одно- и многоветьевые.

Конструкции наиболее распространенных радиантных труб приведены на рис. 6-26. По конструктивным соображениям шаг между одноветьевыми трубами обычно составляет ~0,5 м, в то время как между двухветьевыми он равен 0,8 м. Поэтому поверхность многоветьевых труб, приходящаяся на единицу длины камеры нагрева, больше, чем у одноветьевых труб. Однако в одноветьевых трубах обеспечивается более форсированное горение, в результате чего теплонапряжение поверхности труб у них выше. В результате тепловая мощность, отнесенная к единице длины камеры нагрева при всех конструкциях примерно одинакова. Выбирая конструкции радиантных труб для печей, исходят из эксплуатационных и конструктивных соображений: срока службы, простоты изготовления и эксплуатации, удобства размещения на агрегате, обеспечения максимальной плотности рабочего пространства и др.

По совокупности этих соображений для большинства печей предпочтение отдается двух- и четырехветьевым трубам. В радиантных трубах чаще всего применяют горелки типа «труба в трубе», позволяющие регулировать длину пламени по длине радиантной трубы, благодаря чему обеспечивается равномерный нагрев поверхности трубы. В радиантных трубах применяют рекуператоры для подогрева воздуха, которые представляют собой ребристый радиатор из жароупорного чугуна. Внутри радиатора расположена стальная труба. Воздух поступает через центральную трубу, проходит по кольцевой щели между центральной трубкой и вну-

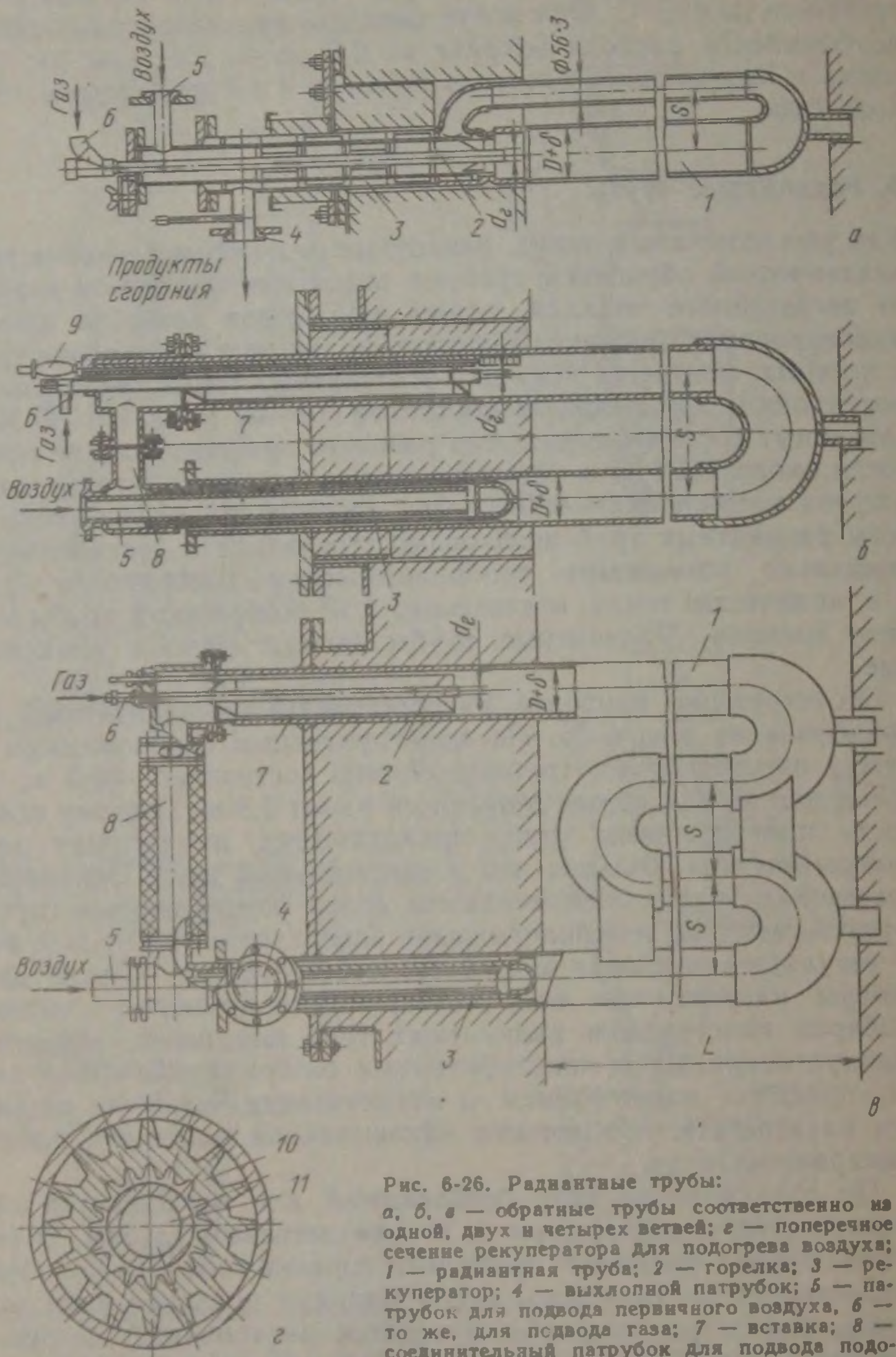


Рис. 6-26. Радиантные трубы:

а, б, в — обратные трубы соответственно из одной, двух и четырех ветвей; г — поперечное сечение рекуператора для подогрева воздуха; 1 — радиантная труба; 2 — горелка; 3 — рекуператор; 4 — выхлопной патрубок; 5 — патрубок для подвода первичного воздуха, 6 — то же, для подвода газа; 7 — вставка; 8 — соединительный патрубок для подвода подогретого воздуха из рекуператора к горелке; 9 — запальник, 10 — радиатор; 11 — центральная труба

тренней поверхностью радиатора и через соединительный патрубок направляется в горелку. Продукты сгорания омывают радиатор снаружи.

Все трубы, представленные на рис. 6-26, предназначены для работы на природном газе. Характеристика этих труб приведена в табл. 6-3.

Т а б л и ц а 6-3. Характеристика радиантных труб (см. рис. 6-26)

Параметры	Тип трубы		
	Р-образная	двухветьевая	четырёх-ветьевая
Размеры, мм:			
L	1500	2000	1500
D	140	168	168
d_r	6,0	6,0	9,5
δ	4,0	8,0	8,0
S	150	280	280
Рабочая поверхность трубы, m^2	0,87	2,1	3,2
Максимальная пропускная способность по газу, $m^3/ч$	6	10	20
Давление перед трубой при максимальной пропускной способности по газу, Па:			
газа	9470	6200	3800
воздуха	2900	3000	4500
Температура подогрева воздуха в рекуператоре, $^{\circ}C$	490	350	320

Расчет числа радиантных труб по методике, применяемой в Стальпроекте, осуществляют, исходя из того количества тепла, которое должно быть подано в ту или иную зону печи и которое находят с помощью теплового баланса. Определив величину теплонапряжения единицы поверхности радиантной трубы, находят (на всю зону) необходимую поверхность радиантных труб и затем их число.

Теплонапряжение поверхности радиантных труб, $Вт/м^2$, может быть определено из выражения

$$q = C_{пр} \left[\left(\frac{T_r}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right],$$

где T_r и T_m — соответственно температура поверхности трубы и средняя температура поверхности металла в камере нагрева, К. Температуру поверхности металла выбирают на 50—100 $^{\circ}C$ выше температуры нагрева.

Величину приведенного коэффициента излучения определяют в соответствии с применяемой схемой теплообмена. Очень часто

радиантные трубы используют при нагреве листа и ленты. Характеристика системы для этого случая приведена на рис. 6-27. Значение $C_{пр}$ [Вт/(м²·К⁴)] может быть определено по следующим выражениям:

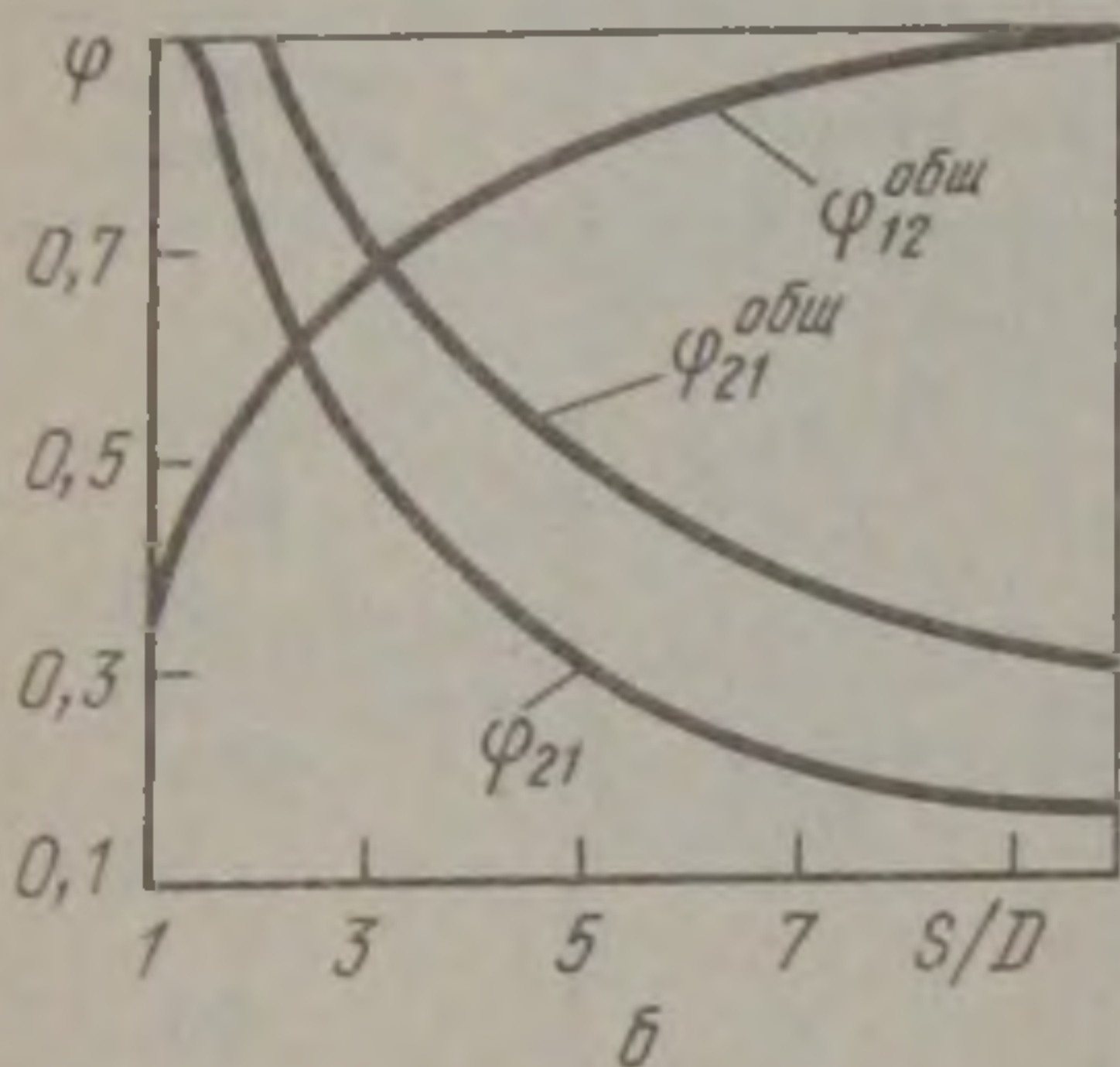
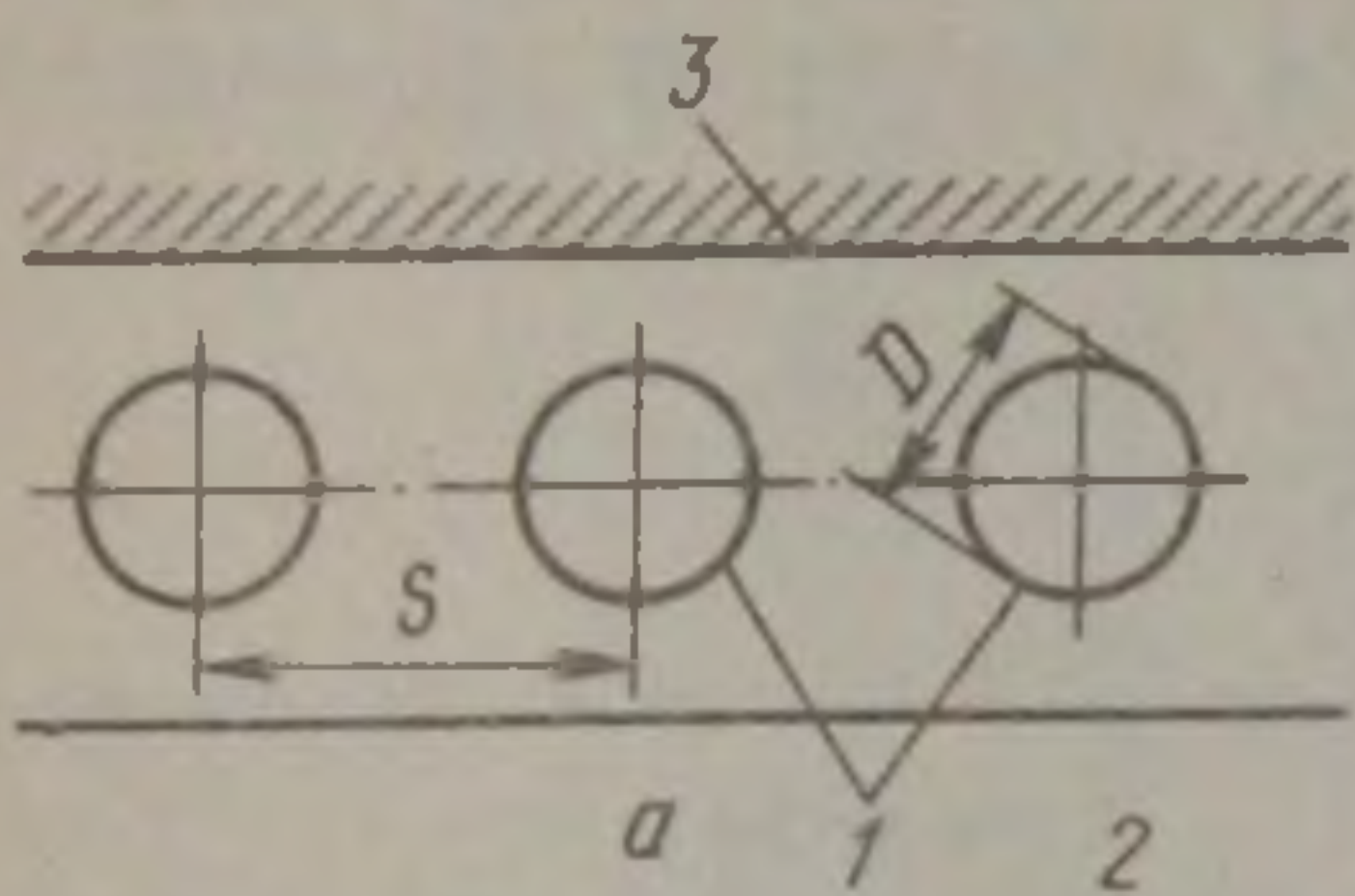


Рис. 6-27. Характеристика системы радиантные трубы — металл—кладка:

a — схема системы; *b* — зависимость угловых коэффициентов от относительного шага; 1 — радиантные трубы; 2 — металл (лист или лента); 3 — кладка

при одностороннем расположении радиантных труб

$$C_{пр} = \frac{C_0 \Phi_{12}^{общ}}{\Phi_{12}^{общ} \left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1 \right) + \Phi_{21}^{общ} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right) + 1};$$

при двустороннем расположении радиантных труб

$$C_{пр} = \frac{C_0 \epsilon_1 \Phi_{12}^{общ}}{\Phi_{21}^{общ} + \Phi_{21}^{общ} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)},$$

где C_0 — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела, Вт/(м²·К⁴); ϵ_1 и ϵ_2 — соответственно степень черноты поверхности радиантных труб и нагреваемого материала. При термообработке в защитной атмосфере приближенно принимают $\epsilon_1 = 0,75$ и $\epsilon_2 = 0,5$;

$$\Phi_{21}^{общ} = \Phi_{21} + \Phi_{21} (1 - \Phi_{21}) = \Phi_{21} (2 - \Phi_{21}) \text{ и } \Phi_{12}^{общ} = \Phi_{21}^{общ} \frac{S}{\pi D}$$

Φ_{12} и Φ_{21} — соответственно угловые коэффициенты излучения от металла на трубу и от трубы на металл с учетом отраженного излучения кладки (см. рис. 6-27); S — расстояния между осями труб (шаг труб), м; D — наружный диаметр трубы, м.

Глава 7

СЖИГАНИЕ ЖИДКОГО ТОПЛИВА

Как уже указывалось в первом томе данного учебника, жидким топливом, которое используют для отопления металлургических печей, является мазут. И несмотря на то, что доля (по теплу) используемого жидкого топлива сравнительно невелика, вопросы, относящиеся к теории и практике его сжигания, важны и актуальны, так как жидким топливом обычно отапливаются высокотемпературные плавильные и реже нагревательные печи, играющие важную роль в процессе производства металла.

1. Общая характеристика мазутного факела

Так же как и для факела газообразного топлива важнейшими характеристиками мазутного факела являются его длина, распределение температуры по длине, радиационные характеристики. Уже отмечалось, что сжигание жидкого топлива производится в распыленном состоянии. Причем основными процессами, определяющими формирование и развитие факела жидкого топлива, являются распыливание, смешение с окислителем, испарение топлива, сгорание топлива (паров, капли, углеродистого остатка). Важнейшими из них являются распыливание и смесеобразование, которые определяются выбранным способом сжигания топлива. Рассмотрим это подробнее.

В металлургических печах обычно используют распылители низкого и высокого давления. Распылителем низкого давления является вентиляционный воздух с давлением до 10 кПа, распылители высокого давления — компрессорный воздух с давлением от 300 до 900 кПа или водяной пар с давлением от 300 до 1500 кПа. Все эти распылители обеспечивают различный характер распыливания и смесеобразования. Размер капли распыленного топлива зависит от давления распылителя, что хорошо иллюстрируется данными, приведенными в табл. 7-1.

Т а б л и ц а 7-1. Размеры капель жидкого топлива

Параметры	Распылитель						
	вентиляторный воздух			компрессорный воздух			
Давление распылителя, кПа	0,1	0,4	0,8	300	500	700	900
Радиус капли топлива, мм	0,2	0,05	0,025	0,0042	0,0024	0,0016	0,0012

Параметры	Распылитель			
	пар			
Давление распылителя, кПа	300	500	1000	1500
Радиус капли топлива, мм	0,0046	0,0027	0,0014	0,0009

Очевидно, что мелкие капли быстрее прогреваются, испаряются и сгорают. Однако из этого нельзя сделать однозначный вывод о длине мазутного факела. В общем виде длина мазутного факела, м, может быть выражена следующим образом

$$l_{\text{ф}} \approx \omega \tau,$$

где ω — средняя осевая скорость факела, м/с; τ — продолжительность горения частиц топлива, с.

Продолжительность горения капли топлива зависит не только от ее размеров, но в значительной степени и от контакта поверхности капли с окислителем, т. е. от процесса смесеобразования. Чем быстрее и равномернее обеспечивается перемешивание распыленного топлива с окислителем (обычно воздухом), тем интенсивнее идет тепловыделение и тем быстрее повышается температура. При хорошем смешении распыленного топлива с воздухом

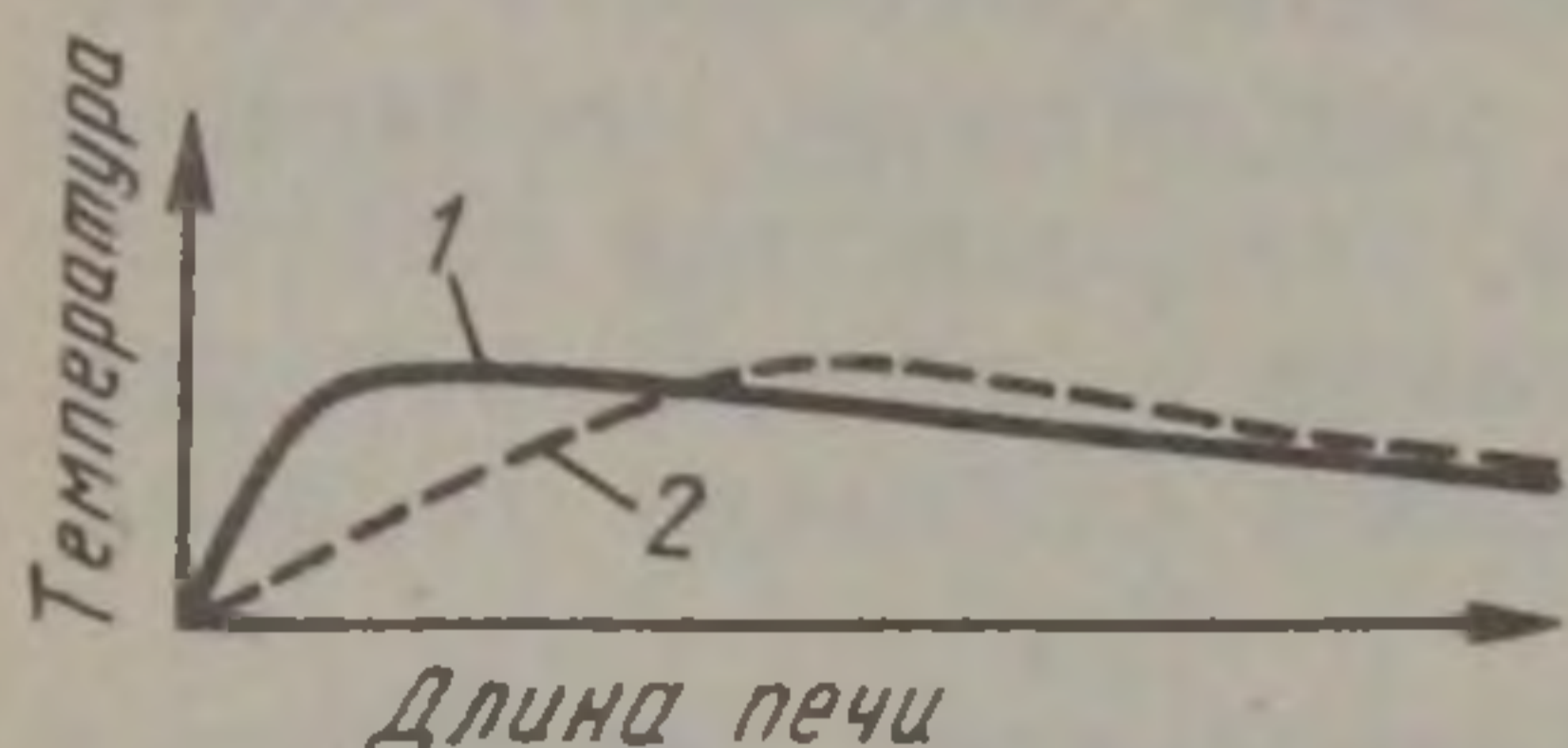


Рис. 7-1. Схема распределения температуры по длине печи при кратковременных 1 и длиннопламенных 2 форсунках

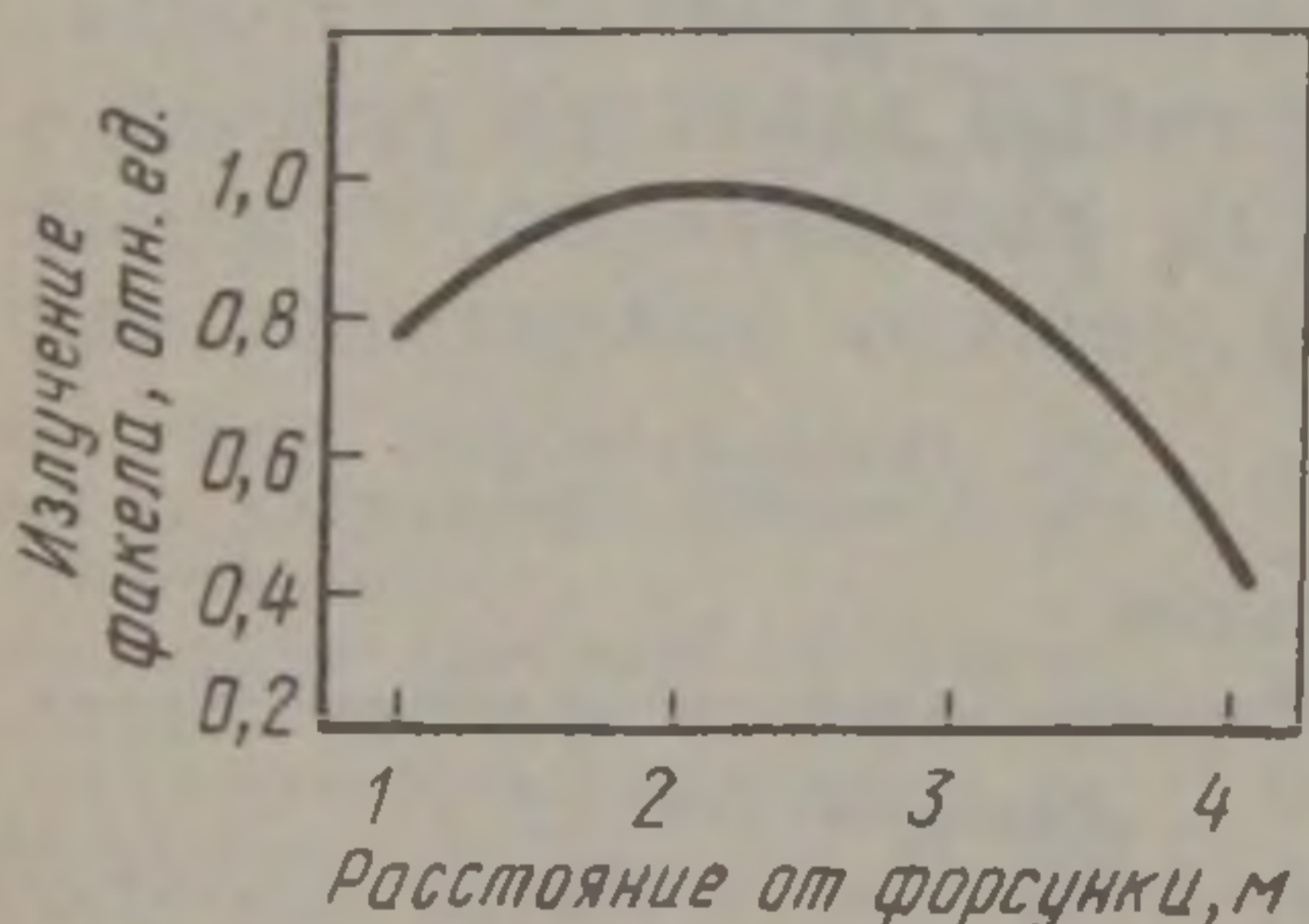


Рис. 7-2. Изменение излучения мазутного факела по его длине (стендовые испытания)

более крупные капли топлива могут сгореть быстрее, чем мелкие капли при плохом смешении.

При использовании в качестве распылителя вентиляторного воздуха весь необходимый для горения воздух подается через форсунку — устройство, предназначенное для распыливания и сжигания жидкого топлива. Таким образом, в этом случае вентиляторный воздух обеспечивает и распыливание и горение. Благодаря тому, что весь воздух необходимый для горения проходит через форсунку достигается его хорошее перемешивание с распыленным топливом, что обеспечивает его быстрое и достаточно полное сгорание при величине коэффициента расхода около 1,15. Хорошее смешение топлива с воздухом и малая величина коэффициента расхода воздуха обеспечивают интенсивное на-

растание температуры факела и относительно быстрое испарение и сгорание капель топлива.

При использовании в качестве распылителя компрессорного воздуха через форсунку подается только около 10 % воздуха, необходимого для горения, весь остальной воздух подается к корню факела в качестве вторичного воздуха под действием вентиляторов. При этом осуществляется медленное смешение вторичного воздуха с потоком распыленного топлива. В этих условиях для обеспечения необходимой полноты сгорания следует поддерживать величину коэффициента расхода воздуха около 1,25. Испарение и сгорание топлива при этом происходит относительно медленно с соответствующим изменением температуры и тепловыделения по длине факела. Это положение еще более усугубляется при использовании в качестве распылителя — пара, при котором весь необходимый для горения воздух подается в виде вторичного воздуха. Однако на длину мазутного факела оказывает влияние не только продолжительность горения частиц топлива, но и средняя осевая скорость движения потока,

которая зависит прежде всего от скорости истечения потока из сопла форсунки. При использовании вентиляторного воздуха скорость истечения составляет 60—100 м/с, при использовании распылителей с высоким давлением скорость истечения может достигать сверхкритической величины (иногда, в этих случаях критерий Маха бывает равен 3 и более).

В результате при использовании вентиляторного воздуха мазутный факел короче, чем при использовании компрессорного воздуха и пара. В короткопламенных форсунках (рис. 7-1) температура факела достигает своей максимальной величины быстрее (ближе к форсунке), чем в длиннопламенных.

Мазутный факел характеризуется высокой излучательной способностью ($\epsilon \approx 0,9$), вызванной значительной концентрацией и оптимальной дисперсностью сажистых частиц в объеме пламени. По мере выгорания топлива концентрация и размер сажистых частиц уменьшается, что и определяет вместе с падением температуры характер теплоотдачи излучением по длине мазутного факела (рис. 7-2).

2. Сравнительная характеристика форсунок

Для сжигания жидкого топлива используются форсунки разнообразных конструкций. В металлургических печах обычно применяют прямоструйные форсунки низкого и высокого давления.

К форсункам предъявляют следующие требования:

1) хорошее распыливание и перемешивание топлива с воздухом;

2) обеспечение устойчивого горения незатухающего факела нужной длины;

3) надежность в эксплуатации, простота и прочность конструкции, незасоряемость, удобство чистки.

В соответствии с используемым распылителем все форсунки делят на две большие группы: низкого и высокого давления (табл. 7-2). Выбор форсунки для конкретных печей производится как с учетом необходимых характеристик факела, так и с учетом того, что вторичный воздух, который не проходит через форсунку, а поступает к ней по специальным керамическим каналам, может подогреться до весьма высоких температур (1100—1200 °С). Поэтому форсунки высокого давления применяют на таких печах, где нужен достаточно длинный факел и где для достижения высоких температур в рабочем пространстве (например, мартеновских печах) необходимо воздух подогреть до высокой температуры.

В форсунках низкого давления вентиляторный воздух не может иметь температуру выше 300 °С, так как при превышении этой температуры корпус форсунки чрезмерно разогревается, что может привести к разложению, идущего через форсунку мазута и забиванию сопла форсунки. Поэтому форсунки низкого давле-

Т а б л и ц а 7-2. Сравнительная характеристика форсунок низкого и высокого давления

Параметры	Характеристика форсунок	
	низкого давления	высокого давления
Распылитель	Вентиляторный воздух	Компрессорный воздух; водяной пар
Давление распылителя, кПа	2,94—8,82	Компрессорный воздух 600—800; пар 600—1800
Доля распылителя (воздуха) от всего воздуха, расходуемого на горение, %	100	7—12
Доля вторичного воздуха от всего воздуха, необходимого для горения, %	0	88—93
Предельная температура подогрева воздуха, °С	300	Подогрев вторичного воздуха не ограничен
Удельный расход распылителя на 1 кг мазута	—	0,6; 0,8
Скорость выхода распылителя из форсунки, м/с	50—80	Обычно ≤ 330 . В отдельных случаях > 330
Степень распыливания (диаметр капли), мм	До 0,5	0,05

ния используют на различных нагревательных печах, где необходим сравнительно короткий факел и температура подогрева воздуха $\sim 300^\circ\text{C}$ является приемлемой.

Преимущество форсунок низкого давления состоит в том, что мазут в них сгорает полнее, что достигается благодаря участию большой массы воздуха в распыливании. В форсунках высокого давления подача основной массы воздуха помимо форсунки приводит к снижению качества смешения и является причиной несколько повышенного расхода воздуха.

3. Форсунки низкого давления

Форсунки низкого давления весьма многообразны. Типичной форсункой этого типа является широко распространенная форсунка конструкции Стальпроекта (рис. 7-3). Давление мазута перед форсункой составляет 49,0—98,0 кПа; распылителем служит вентиляторный воздух, который можно подогревать до 300°C .

Обычно в форсунках низкого давления весьма невелики возможные пределы регулирования расхода мазута. Это объясняется тем, что с уменьшением расхода мазута снижается расход воздуха, в результате чего уменьшается скорость выхода воздуха и

ухудшается его распыляющее действие. В форсунке конструкции Стальпроекта можно изменять расход мазута до 40—50 % максимальной ее производительности без заметного ухудшения распыливания. Это обеспечивается возможностью перемещения мазутного сопла при помощи специального рычага, в результате чего изменяется сечение для выхода распылителя и скорость его остается на должном уровне.

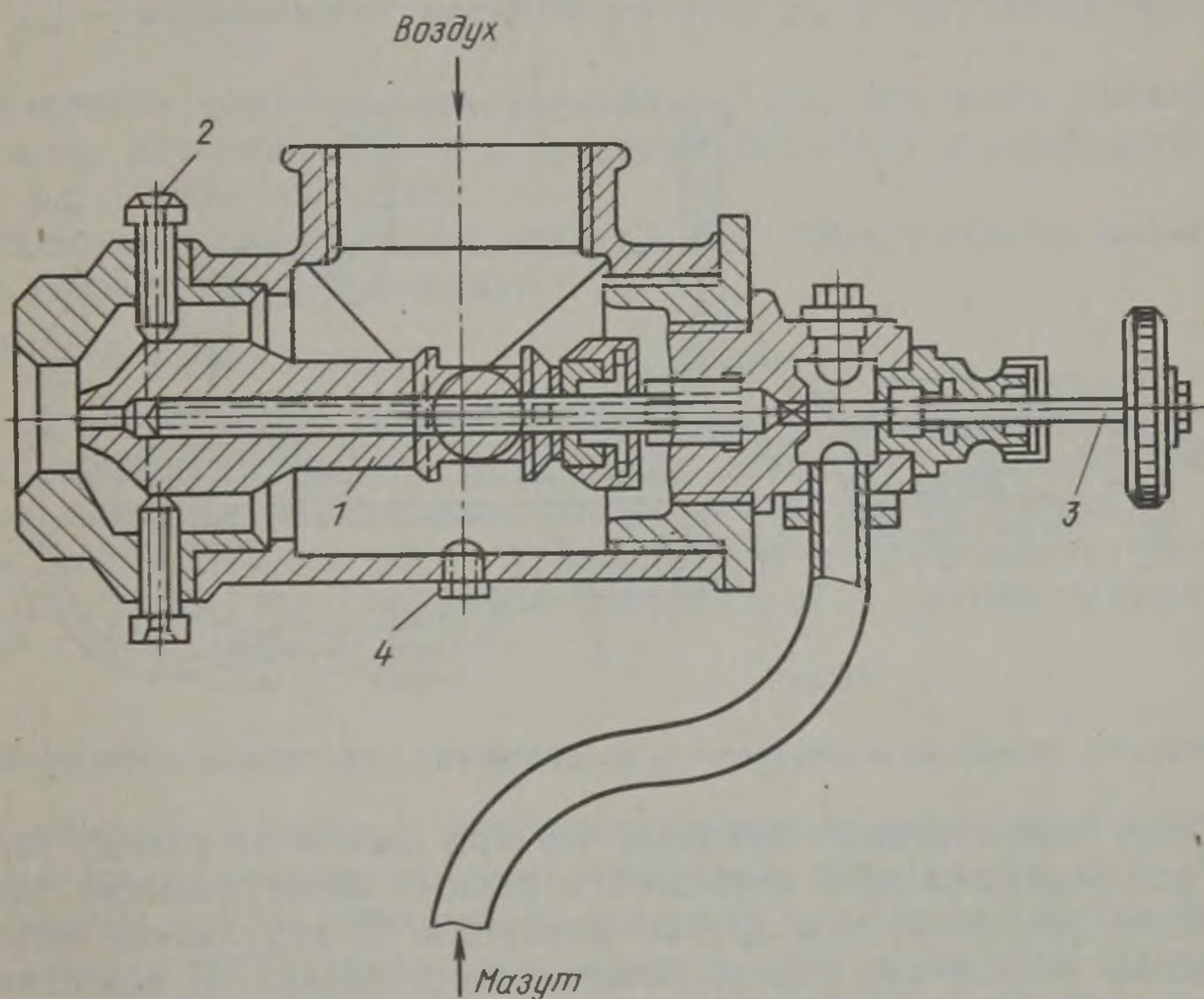


Рис. 7-3. Форсунка конструкции Стальпроекта:

1 — мазутная трубка; 2 — винты для центровки мазутной трубки; 3 — игла для регулирования подачи мазута; 4 — сливная пробка

Форсунка снабжена специальным циферблатом, на котором отсчитывается степень регулирования подачи распылителя. Следует обратить внимание на то, что в форсунке конструкции Стальпроекта трубы для подачи мазута и воздуха расположены на одной оси. Поэтому можно, не снимая форсунки, лишь повернув ее, осуществлять осмотр и чистку. Форсунка дает длинный (~2—2,5 м), узкий факел, причем для полноты сгорания необходимо поддерживать коэффициент расхода воздуха, равным 1,2.

В настоящее время многие форсунки типизированы, что позволяет не рассчитывать их, а выбирать в зависимости от производительности. Основные размеры форсунки конструкции Стальпроекта приведены в табл. 7-3.

Широкое распространение получили турбулентные форсунки конструкции А. И. Карабина (рис. 7-4), которые отличаются следующими основными особенностями:

1) воздух, необходимый для распыливания и горения, поступает через тангенциально расположенные окна 2 воздушного сопла 1 и встречает частицы топлива под углом 75—90°;

2) подачу топлива регулируют иглой 3 у выхода из форсунки. При перемещении иглы поворотом маховичка размер выходной щели для топлива изменяется, а скорость вылета частиц топлива остается постоянной и достаточно большой.

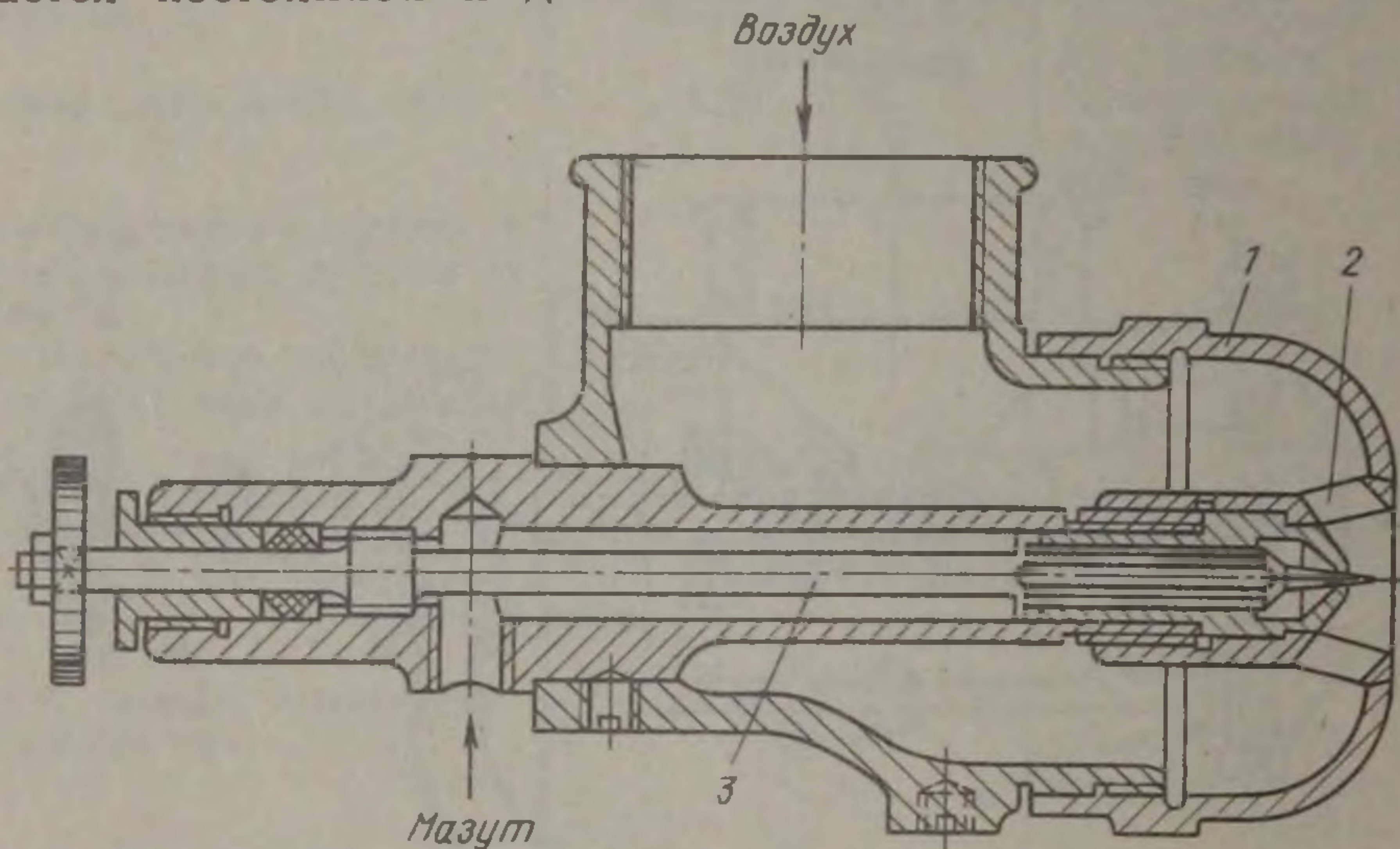


Рис. 7-4. Форсунка конструкции А. И. Карабина

Опыт эксплуатации показал, что при работе на вязких топливах эта форсунка дает короткий и ровный незатухающий факел, но более широкий, чем другие форсунки. В результате чего необходимо устройство форсуночного окна в кладке. К недостаткам форсунки следует отнести трудность регулирования подачи воздуха, которое можно осуществлять только при наладке.

Т а б л и ц а 7-3. Характеристика форсунок конструкции Стальпроекта

Характеристика форсунки	Внутренний диаметр воздухопровода, дюймы/мм					
	1,5/38	2,5/65	4/100	5/125	6/150	8/200
Производительность кг/ч, при давлении воздуха, кПа:						
2,94	3,5	11	32	54	80	135
6,86	8	24	57	82	120	205
Диаметр сопла, мм:						
мазутного	2,5	3	4	5	5	6
воздушного	21	40	60	75	95	135
Ход мазутного сопла, мм	6	13	21,6	25	32	42
Масса, кг	4,9	6,9	14,8	25,4	40,1	56,0

При расчете форсунок низкого давления определяют выходные сечения для мазута и воздуха.

Необходимая площадь выходного сечения для мазута, мм²:

$$f_m = Ab/\mu_m \sqrt{p_m \rho_m},$$

где A — коэффициент, равный 195,625 при давлении, выраженном в паскалях; b — расход мазута, кг/ч; p_m — давление мазута, Па; μ_m — коэффициент расхода мазута; ρ_m — плотность мазута, кг/м³.

Значение коэффициента расхода μ_m для форсунок низкого и высокого давлений лежат в пределах 0,2—0,3, а плотности мазута ρ_m — 950—960 кг/м³.

Выходные сечения для воздуха форсунок низкого давления определяют по выражению

$$f_v = A'V_v/\mu \sqrt{p_v \rho_v},$$

где f_v — площадь выходного сечения, мм²; V_v — количество воздуха, пропускаемого форсункой, м³/ч; p_v — полный напор перед выходным отверстием, Па; μ — коэффициент расхода воздуха, составляющий около 0,7—0,8; A' — коэффициент, равный 618,75, при p_v , выраженном в паскалях; ρ — плотность воздуха, кг/м³.

4. Форсунки высокого давления

Как отмечалось выше, в форсунках высокого давления в качестве распылителя применяют компрессорный воздух или пар. Конструктивно форсунки высокого давления для распыливания паром или сжатым воздухом мало отличаются одна от другой. Распылитель выходит через сопло или щель с большой скоростью и раздробляет топливо. В зависимости от формы сопла скорость выхода распылителя может быть докритической или сверхкритической.

Типичной для круглых струйных форсунок высокого давления одноступенчатого распыливания с внешним смесеобразованием, применяемых на малых и средних печах, является форсунка конструкции В. Г. Шухова (рис. 7-5). Проходное сечение ее 1 для мазута постоянно. Размер паровой (воздушной) щели регулируют перемещением мазутной трубки 2, для чего требуется ослабить контргайку 3. Вследствие сложности такого регулирования практически предпочитают регулировать расход мазута вентилем, установленным на мазутопроводе, а расход пара — вентилем, смонтированным на подводящем паропроводе.

В результате эффект распыливания ухудшается, а удельный расход пара увеличивается. Скорость истечения распылителя не превышает скорости звука (330 м/с). Факел форсунки узкий и длинный. Для форсунки малых размеров длина факела составляет 2,5—4 м; для больших форсунок она достигает 6—7 м. Фор-

сунка пригодна для работы в длинных топочных камерах. Для малых камерных печей форсунка конструкции Шухова непригодна, так как пламя ударяет в противоположную стену камеры, разрушает кладку и образует коксовые наросты несгоревшего мазута. Часть топлива выносится из печи несгоревшей. Расход пара, необходимого для распыливания 1 кг подогретого мазута, составляет 0,4—0,6 кг/кг, а расход сжатого воздуха изменяется от 0,6 до 0,8 м³/кг.

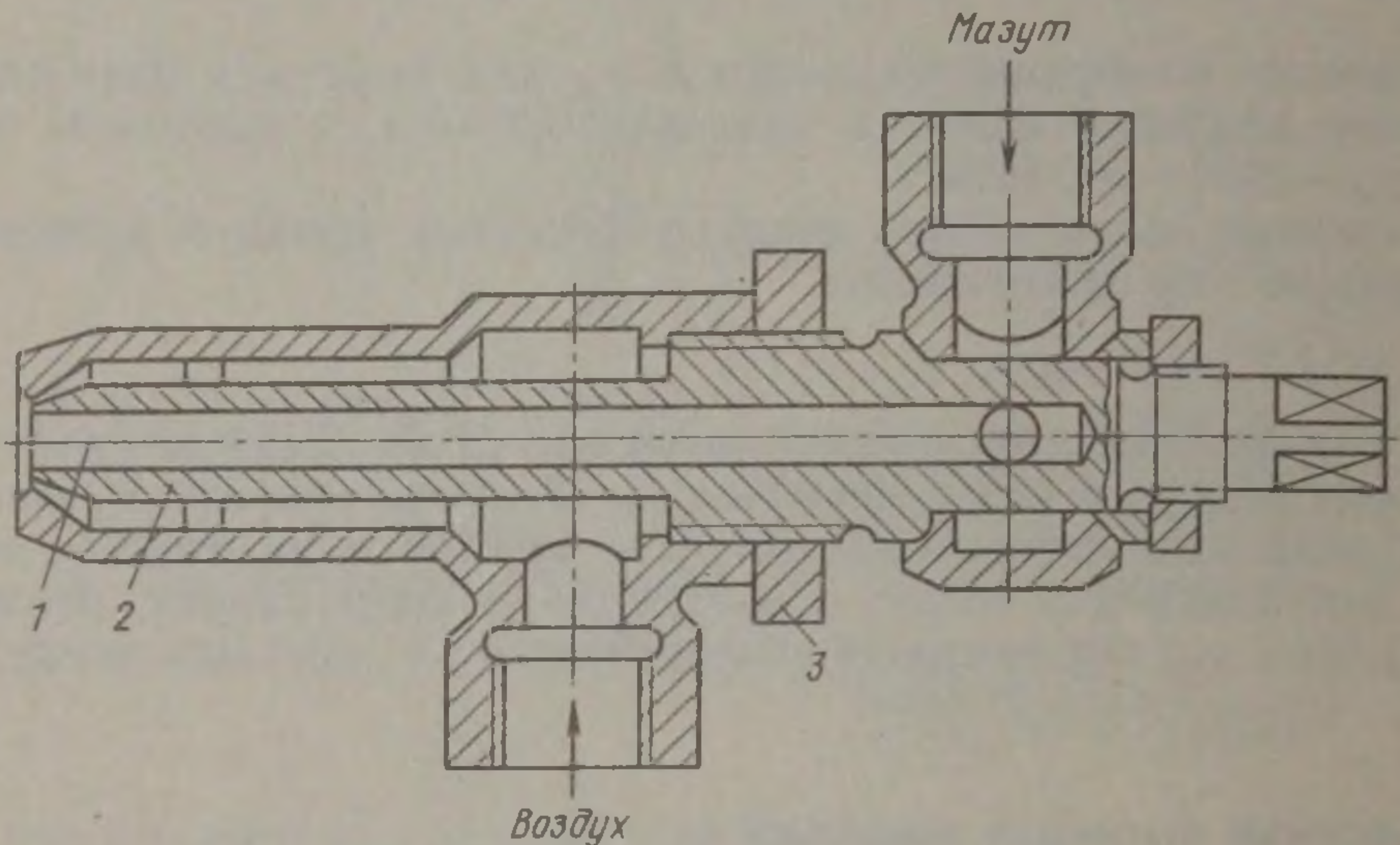


Рис. 7-Б. Форсунка конструкции В. Г. Шухова

Форсунки изготовляют десяти размеров (номеров), рассчитанных на производительность от 3 до 400 кг/ч (табл. 7-4).

Таблица 7-4. Характеристика форсунок конструкции В. Г. Шухова

Характеристика форсунки	Диаметр мазутопровода, дюймы									
	3/8	3/8	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	3/4	3/4	3/4
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Выходной диаметр, мм:										
для мазута	2	3	4	5	6	7	8	10	13	16
для пара	4,5	5,5	7	8	9	10	11	13	16	20
Производительность *, кг/ч:										
I	3	6	12	19	27	38	50	70	125	200
II	7	20	40	60	80	100	130	180	250	350
III	10	30	60	90	120	150	180	240	320	400
Масса, кг	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1,5	1,5	1,6

* I — напор мазута до 4,9 кПа; II — то же, до 58,8 кПа, давление пара или воздуха у форсунки 294,2 — 490,3 кПа; III — напор мазута 196—245 кПа, давление пара или воздуха свыше 490 кПа.

Для отопления крупных металлургических печей, например мартеновских, применяют форсунки высокого давления особой конструкции, создающие достаточно жесткий, светящийся факел, например форсунку конструкции Днепропетровского металлургического института (ДМИ), показанную на рис. 7-6.

В этой форсунке мазут поступает по центральной трубке, а распылитель до соприкосновения с топливом расширяется до давления, близкого к атмосферному. Применение сопла Лаваля

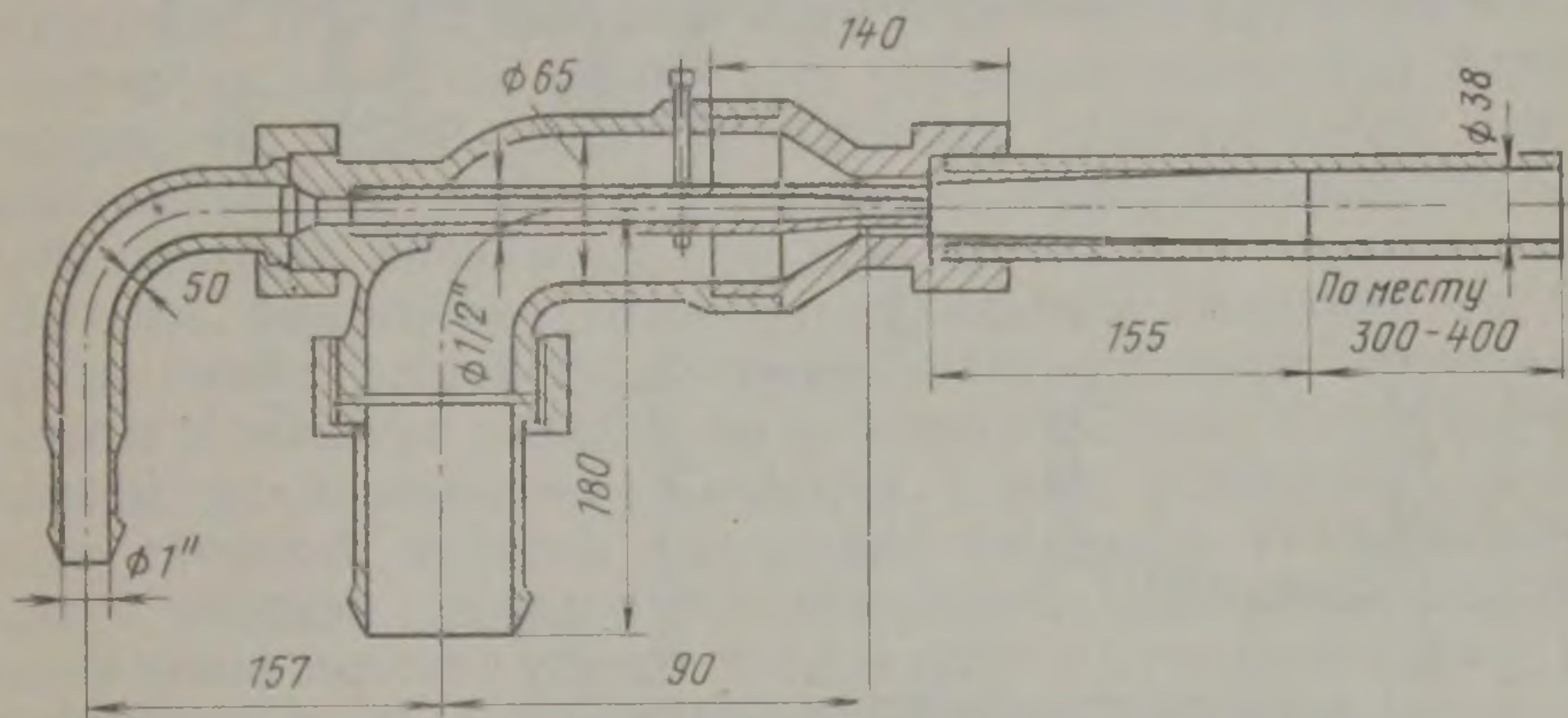


Рис. 7-6. Форсунка конструкции ДМИ

с диффузором позволяет достигать очень высокой скорости истечения (750 м/с и более), что обеспечивает хорошее распыливание мазута.

Пар, предназначенный для распыливания, должен быть перегретым. Пар можно заменить компрессорным воздухом при несколько увеличенном расходе воздуха, при этом длина сопла Лаваля получается меньше. Производительность форсунки изменяется в пределах 250—2500 кг/ч при изменении расхода пара или компрессорного воздуха (распылителей) соответственно 25—1250 и 180—1900 кг/ч.

Достоинства форсунки конструкции ДМИ заключаются в простоте, легкости подбора отверстий, рассчитанных на заданную производительность, хороших динамических качествах факела и сравнительно хорошем распылении. Форсунки в мартеновских печах устанавливают по оси головки. Необходимый для горения вторичный воздух, подогретый в регенераторах, поступает к форсунке по специальным керамическим каналам.

В нагревательных печах иногда при применении форсунок высокого давления вторичный воздух для горения также поступает по специальным керамическим каналам. Однако в большинстве случаев применяют форсунку высокого давления вместе с форсуночной коробкой (рис. 7-7), через которую подается воздух, необходимый для горения. Основные размеры некоторых форсунок высокого давления (ФВД) с двойным распыливанием приведены в табл. 7-5.

Форсуночные коробки применяют при температуре воздуха до 400 °С. Выходное сечение по воздуху рассчитывают на действительную скорость в пределах 20—25 м/с.

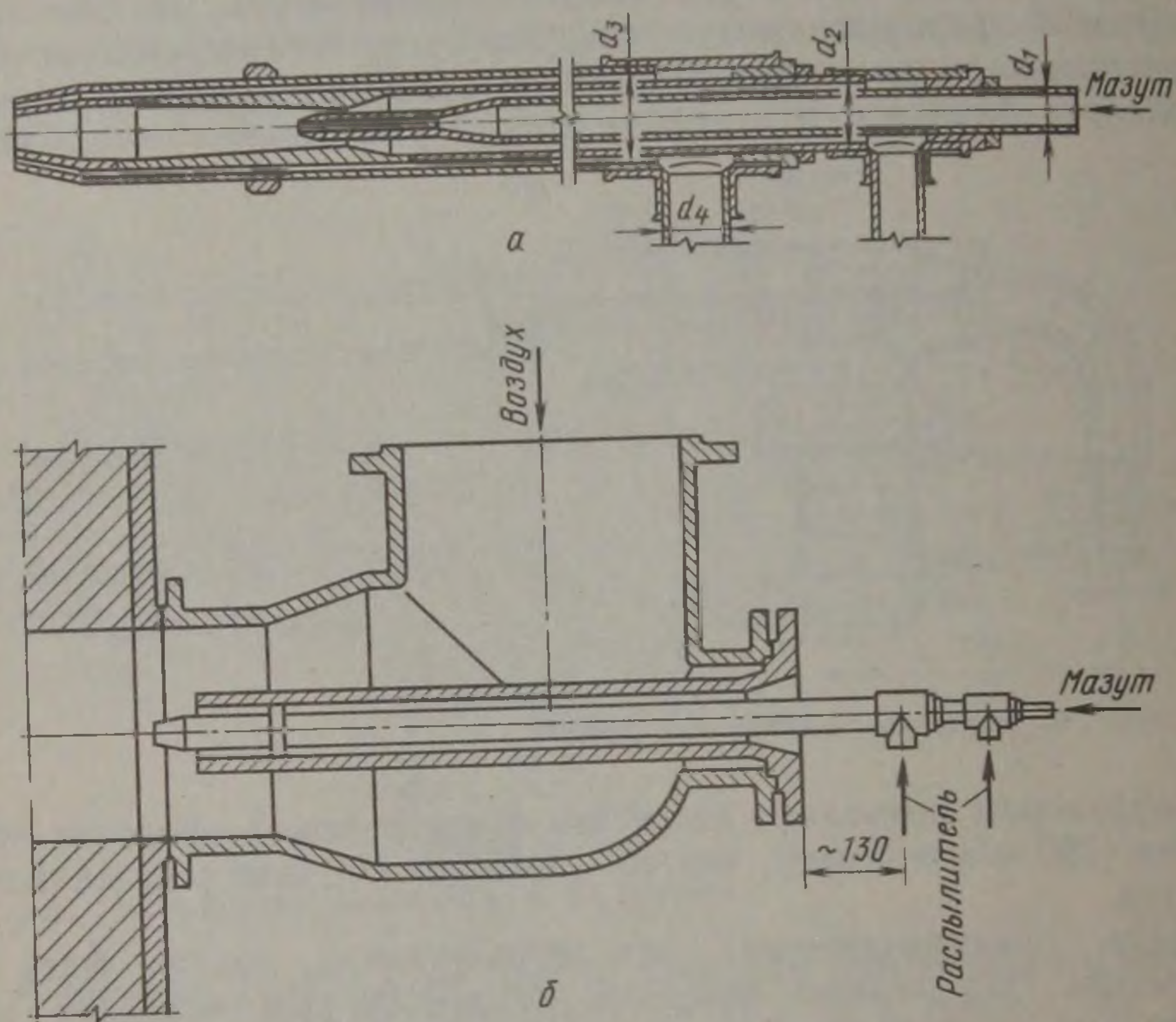


Рис. 7-7. Форсунка высокого давления конструкции Стальпроекта (а) и установка форсунки и форсуночной коробки (б)

Т а б л и ц а 7-5. Характеристика форсунок высокого давления конструкции Стальпроекта (см. рис. 7-7)

Характеристика форсунки	Тип форсунки			
	ФВД-100	ФВД-200	ФВД-400	ФВД-600
Пропускная способность при давлении мазута 200 кПа, кг/ч	100	200	400	600
Размеры, мм:				
d_1	10,8	11,7	13,0	16,5
d_2	12	17	24	29
d_3	16	21	28	33
d_4	17	22	29	34
L	1270	1270	1470	1470
Масса, кг	10,2	10,2	14,9	14,9

5. Комбинированное газо-мазутное отопление

В производственных условиях по различным причинам возможно изменение вида используемого топлива или добавление в случае нехватки одного вида топлива к другому (чаще всего мазута к газу). Иногда возникает необходимость в резервном топливе, в переводе печей с одного вида топлива на другой или в работе печей на комбинированном газо-мазутном отоплении. Решать подобную задачу можно двумя способами. Первый связан с установкой на печи, как горелок для сжигания газа, так и форсунок на случай перевода печей на полное или частичное отопление мазутом. Очевидно, что такой способ не является рациональным, так как усложняет конструкцию самой печи и создает большие проблемы по обеспечению печи воздухом для горения.

Другим, несомненно более рациональным способом, является создание таких устройств, которые могут работать, как на газообразном и жидком топливе по отдельности, так и при комбинированном использовании. Создание таких устройств является весьма сложной задачей, поскольку сжигание газообразного и жидкого топлива происходит в совершенно различных условиях. Газообразное топливо готово к сжиганию и его необходимо лишь смешать для этого с воздухом. Оно легче воспламеняется, сжигается с меньшим коэффициентом расхода воздуха, сгорает быстрее и полнее. Жидкое топливо надо сначала распыливать, затем смешивать с воздухом, обеспечивая его испарение и горение. Для полноты сжигания мазута необходимо поддерживать более высокую величину коэффициента расхода воздуха. При одновременном сжигании газообразного и жидкого топлива горение последнего будет затягиваться, так как газообразное топливо будет потреблять кислород в первую очередь.

Горелки, рассчитанные на комбинированное сжигание газообразного и жидкого топлива, должны иметь воздухопроводы, способные обеспечить их воздухом при самом разнообразном топливе. Целесообразно использовать такие комбинации различных видов топлива, при которых расход воздуха в единицу времени оставался бы приблизительно постоянным. Все это усложняется еще и целесообразностью, а иногда и необходимостью, использования подогретого воздуха.

Как уже отмечалось, мазут дает факел с высокой излучательной способностью, поэтому сжигание природного газа с карбюрацией факела мазутом является в настоящее время весьма распространенным. Расход мазута составляет обычно 25—40 % от всего расхода тепла на печь. Для этой цели применяют различные газо-мазутные форсунки, одна из которых приведена на рис. 7-8. Эта форсунка позволяет сжигать за час до 1200 кг мазута и до 1000 м³ природного газа. В качестве распылителя используют сжатый воздух давлением 0,45 МПа. Если давление газа имеет приблизительно аналогичную величину, то распыливание мазута может осуществляться природным газом высокого давления.

В нагревательных печах существующие форсунки иногда приспособливают для комбинированного газо-мазутного отопления (рис. 7-9). Создают, однако, и специальные конструкции газо-мазутных горелок (форсунок), предназначенных для комбинированного отопления. Таких конструкций очень много и найти для них определенный классифицирующий признак трудно.

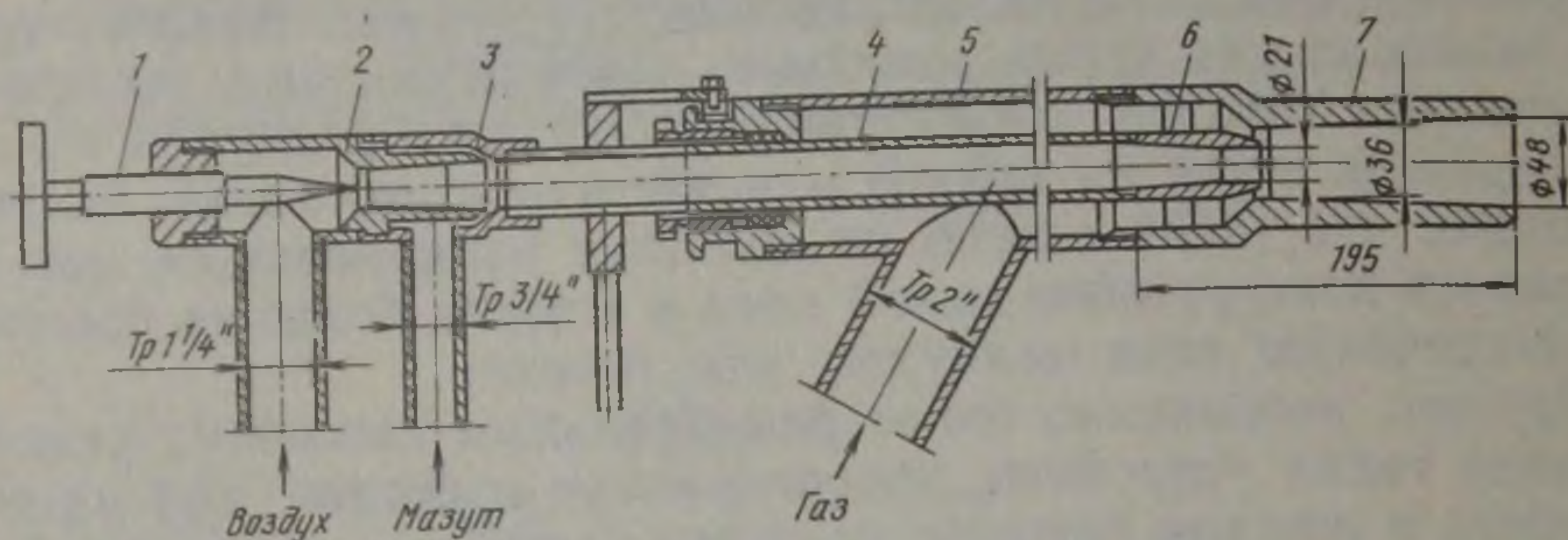


Рис. 7-8. Газо-мазутная форсунка для мартеновских печей: 1 — игла для регулирования сжатого воздуха; 2 — воздушное сопло; 3 — мазутное сопло; 4 — труба для топливно-воздушной эмульсии; 5 — труба газовая; 6 — наконечник; 7 — диффузор

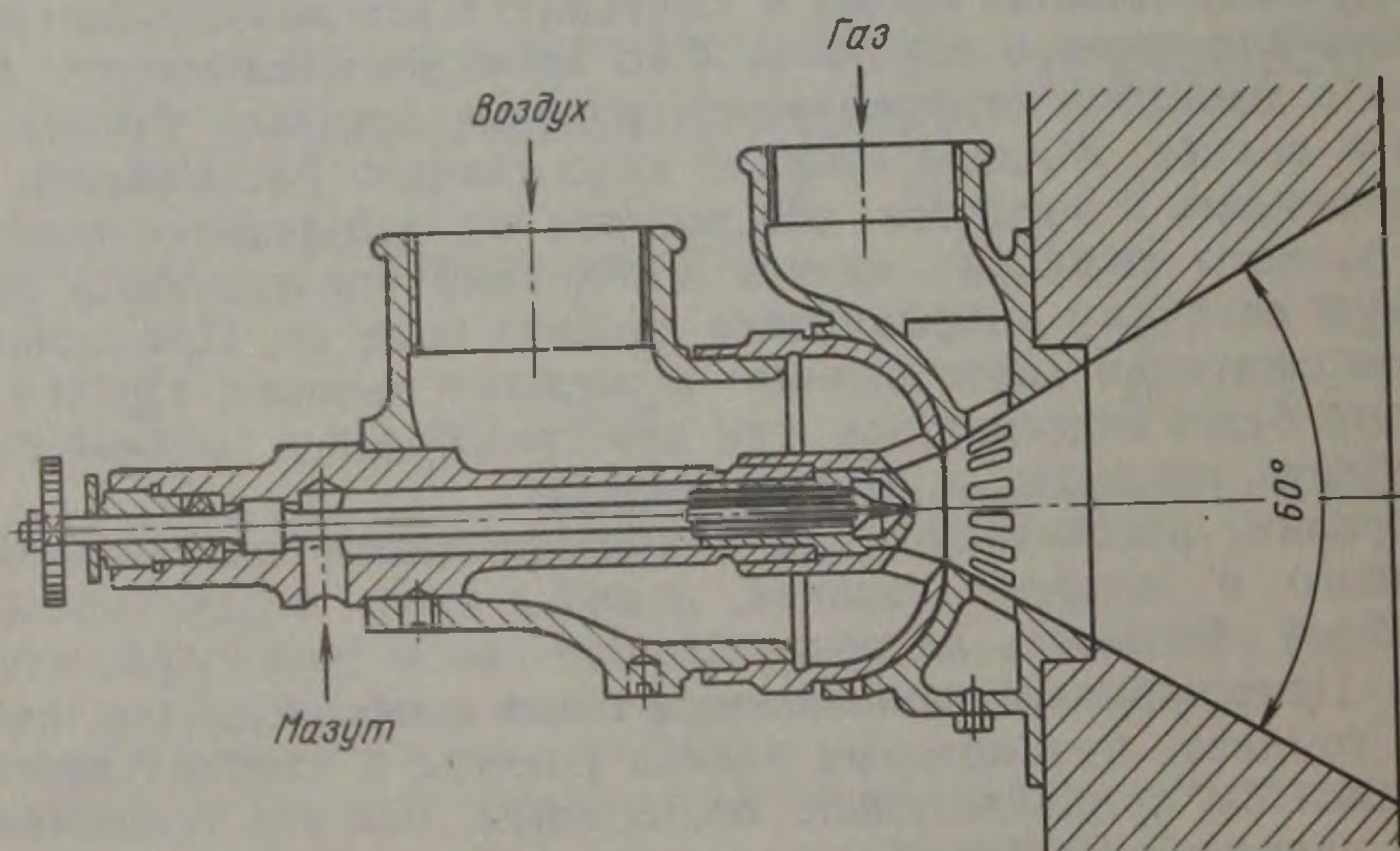


Рис. 7-9. Форсунка А. И. Карабина, приспособленная для газо-мазутного отопления

Существуют газо-мазутные горелки, в которых мазут и газ подаются в зону горения через концентрические, расположенные по оси горелки трубки (рис. 7-10). Такие горелки применяют для отопления нагревательных печей. Они характеризуются теплопроизводительностью до 42 ГДж/ч. Работают горелки на мазуте и коксовом газе при давлении газа 1—5 кПа. Допускается подогрев газа до 200 °С и воздуха до 500 °С.

В других газо-мазутных горелках мазут и газ подаются по объединенным конструктивно трубкам (рис. 7-11), причем мазут — всегда по внутренней трубке, так как он труднее смешивается

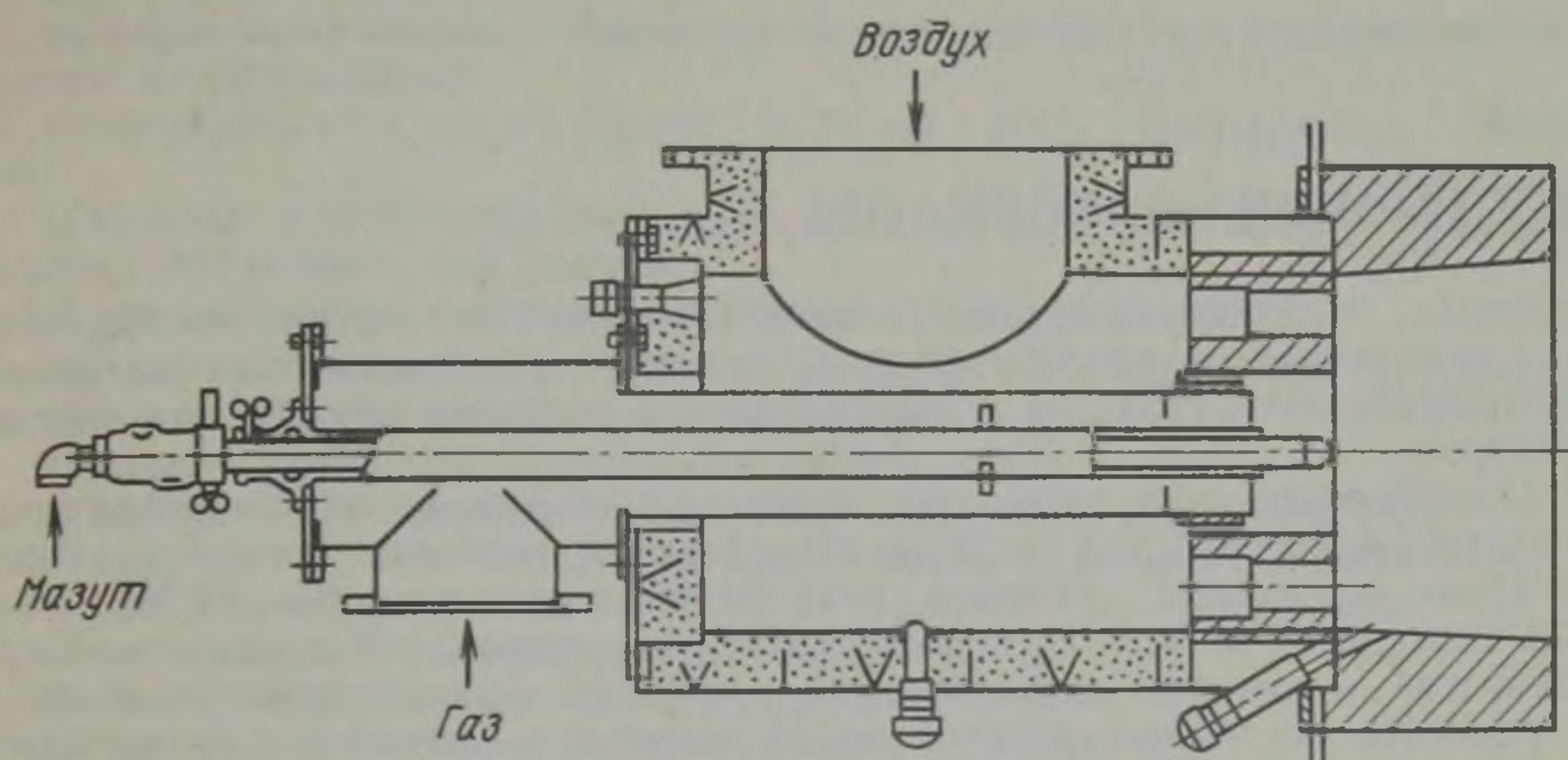


Рис. 7-10. Комбинированная газо-мазутная горелка для нагревательных печей

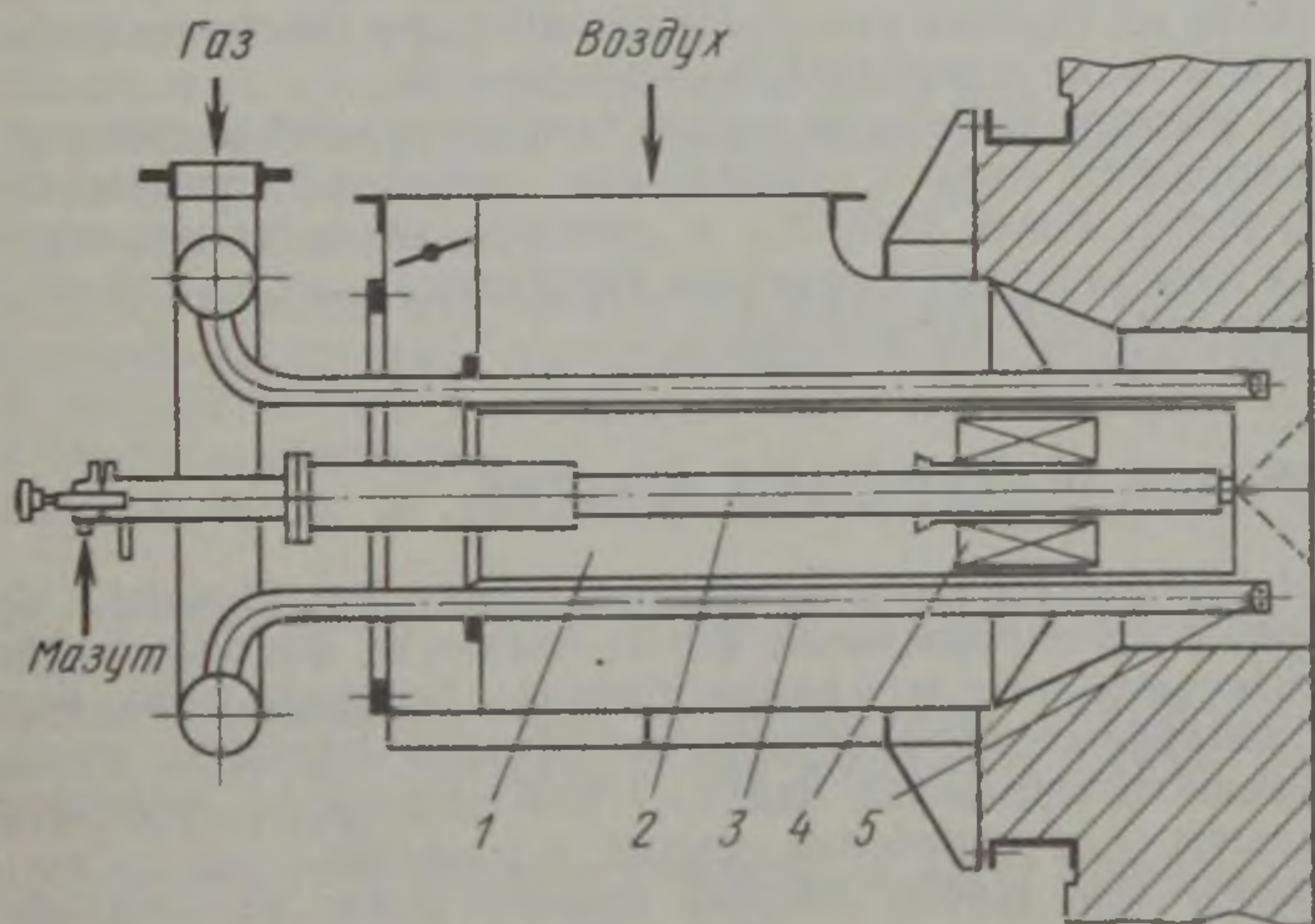


Рис. 7-11. Комбинированная газо-мазутная горелка с раздельным подводом мазута и газа:

1 — центральная воздушная труба; 2 — форсунка; 3 — газовые трубы; 4 — закручивающиеся лопатки; 5 — отверстие для выхода газа

с воздухом. Для улучшения смешения устанавливают специальные закручивающиеся лопатки для воздуха, а газ выходит из трубок через многочисленные маленькие отверстия. В случае чисто газового отопления форсунка может быть вынута.

МАТЕРИАЛЫ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И МЕХАНИЧЕСКОЕ Раздел III ОБОРУДОВАНИЕ ПЕЧЕЙ

Глава 8

ОГНЕУПОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Огнеупорами называют материалы, изготавливаемые на основе минерального сырья и отличающиеся способностью сохранять без существенных нарушений свои функциональные свойства в разнообразных условиях службы при высоких температурах.

Интенсификация всех процессов, протекающих при высоких температурах, требует повышения рабочих свойств огнеупорных изделий. Metallургическое производство потребляет основное количество огнеупоров (60—70 %). Огнеупорные материалы широко используют также в стекольной и цементной промышленности, в областях новой техники — атомной и ракетостроении. Развитие новых способов получения электрической энергии в магнитных гидродинамических генераторах в значительной степени также определяется свойствами используемых огнеупоров. Таким образом, наличие развитой огнеупорной промышленности в стране характеризует степень ее индустриализации.

Качество применяемых в промышленности огнеупоров влияет на производительность агрегатов, на качество готовой продукции и на стоимость единицы продукции. В производстве при применении огнеупоров главной задачей является соответствие их свойств условиям службы при обязательном требовании, чтобы их стоимость была экономически приемлемой.

С развитием энергетики страны растет температурный потенциал процессов. Применение природного газа и обогащение дутья кислородом обеспечивают получение температур более 2000 °С, в дуговых печах температура достигает 3000 °С. Поэтому параллельно с развитием энергетики идет и развитие технологии производства огнеупорных материалов.

1. Классификация огнеупорных изделий

Применяемые в промышленности огнеупоры делят на изделия, которым при изготовлении придается определенная форма (кирпичи, фасонные изделия, крупные блоки) и неформованные материалы (бетоны, торкрет-массы, мертели).

В основу классификации огнеупорных изделий положено шесть основных признаков: химико-минеральный состав, огнеупорность, пористость, способ формования, термическая обработка, форма и размеры.

1. По химико-минеральному составу изделия делят на следующие группы, зависящие от содержания оксидов (%), определяющих их свойства:

- а) кремнеземистые: диоксидные ($\text{SiO}_2 \geq 93$); кварцевые ($\text{SiO}_2 \geq 85$);
- б) алюмосиликатные: полукислые ($\text{SiO}_2 < 85$), шамотные (Al_2O_3 28—45), муллитокремнеземистые (Al_2O_3 45—62), муллитовые (Al_2O_3 62—72), муллитокорундовые (Al_2O_3 72—90);
- в) глиноземистые — корундовые ($\text{Al}_2\text{O}_3 > 90$);
- г) магнезиальные-периклазовые (магнезитовые) ($\text{MgO} \geq 85$);
- д) магнезиальноизвестковые: периклазоизвестковые (магнезитодоломитовые) (MgO 35—75; CaO 15—40); известковопериклазовые (доломитовые) (MgO 10—50; CaO 45—85);
- е) периклазохромитовые ($\text{MgO} > 60$; Cr_2O_3 5—20); хромитопериклазовые (MgO 40—60; Cr_2O_3 15—35); хромитовые ($\text{MgO} < 40$; $\text{Cr}_2\text{O}_3 > 30$);
- ж) периклазошпинельные ($\text{MgO} > 40$; Al_2O_3 5—55); шпинельные (MgO 25—40; Al_2O_3 55—70);

з) магнезиальносиликатные: периклазофорстеритовые (MgO 65—85; $SiO_2 > 7$); форстеритовые (MgO 50—65; SiO_2 25—40); форстеритохромитовые (MgO 45—60; SiO_2 20—30; Cr_2O_3 5—15);

е) углеродистые с огнеупорной основой С (углеродсодержащие, неграфитированные, графитшамотные);

ж) карбидкремниевые с огнеупорной основой SiC (карбидкремниевые, карбидкремнийсодержащие);

з) цирконовые с огнеупорной основой ZrO_2 (цирконовые, циркониевые);

и) окисные с огнеупорной основой Al_2O_3 , TiO_2 , BeO , HfO_2 (корундовые, титановые, берилловые, гафниеваемые);

к) неокислородные (нитридные, боридные, сульфидные).

На заводах применяют еще техническую классификацию, в соответствии с которой все огнеупоры разделяются на три группы:

а) кислые (в составе преобладает оксид SiO_2);

б) нейтральные (содержащие высокий процент С или Cr_2O_3);

в) основные (с преобладающим содержанием основных оксидов (MgO , CaO)).

2. По огнеупорности все огнеупоры разделяют на три группы:

а) огнеупорные (огнеупорность 1580—1770 °С);

б) высокоогнеупорные (огнеупорность 1770—2000 °С);

в) высшей огнеупорности (огнеупорность >2000 °С).

3. По пористости:

а) особоплотные (с открытой пористостью до 3 %);

б) высокоплотные (3—10 %);

в) плотные (10—16 %);

г) уплотненные (16—20 %);

д) среднепористые (20—30 %);

е) повышеннопористые (30—45 %);

ж) легковесные (с общей пористостью 45—85 %);

з) ультралегковесные (с общей пористостью >85 %).

4. По способу формования:

а) пластичноформованные;

б) полусухого формования из масс малопластичных или из порошков с добавкой связующего материала, изготовленные путем механического, гидравлического или вибрационного прессования; при изготовлении крупных блоков применяется пресстрембование;

в) плавные литые из расплава, получаемого обычно путем электроплавки;

г) литые, изготовленные путем литья из жидкого шликера в специальные формы (пеноизделия);

д) термопластичнопрессованные, изготовленные прессованием из шихты, в состав которой введены термопластичные добавки (парафин, воск и т. п.);

е) горячепрессованные;

и) изготовленные горячим прессованием из масс, нагретых до пластичного состояния;

ж) пиленные из естественных горных пород или из специально изготовленных блоков;

з) волокнистые, полученные путем расщепления расплава струей острого перегретого пара.

5. По термической обработке:

а) обожженные, обжигаемые в печах в процессе изготовления изделий;

б) безобжиговые, не подвергавшиеся обжигу до употребления в кладку;

в) плавные, подвергнутые отжигу после отливки;

г) горячепрессованные.

6. По форме и размерам различают:

а) простые изделия (прямые и клиновые нормальных, малых и больших форматов);

б) фасонные — простые, сложные, особо сложные и крупноблочные (массой >60 кг);

в) специальные — промышленного и лабораторного назначения (тигли, трубки, наконечники и т. п.).

Неформованные огнеупорные материалы классификации, установленной ГОСТом, не имеют.

2. Свойства огнеупорных материалов

Свойства огнеупорных материалов зависят от их химического состава, способа изготовления изделий, а также от условий эксплуатации их на производстве.

Методов испытаний огнеупоров много, основные из них нормируются ГОСТами и техническими условиями (ТУ).

Огнеупорность

Огнеупорностью называют свойство материала или изделия противостоять длительное время воздействию высоких температур, не теряя формы и не переходя в тестообразное состояние. Огнеупорность зависит от химического и минералогического

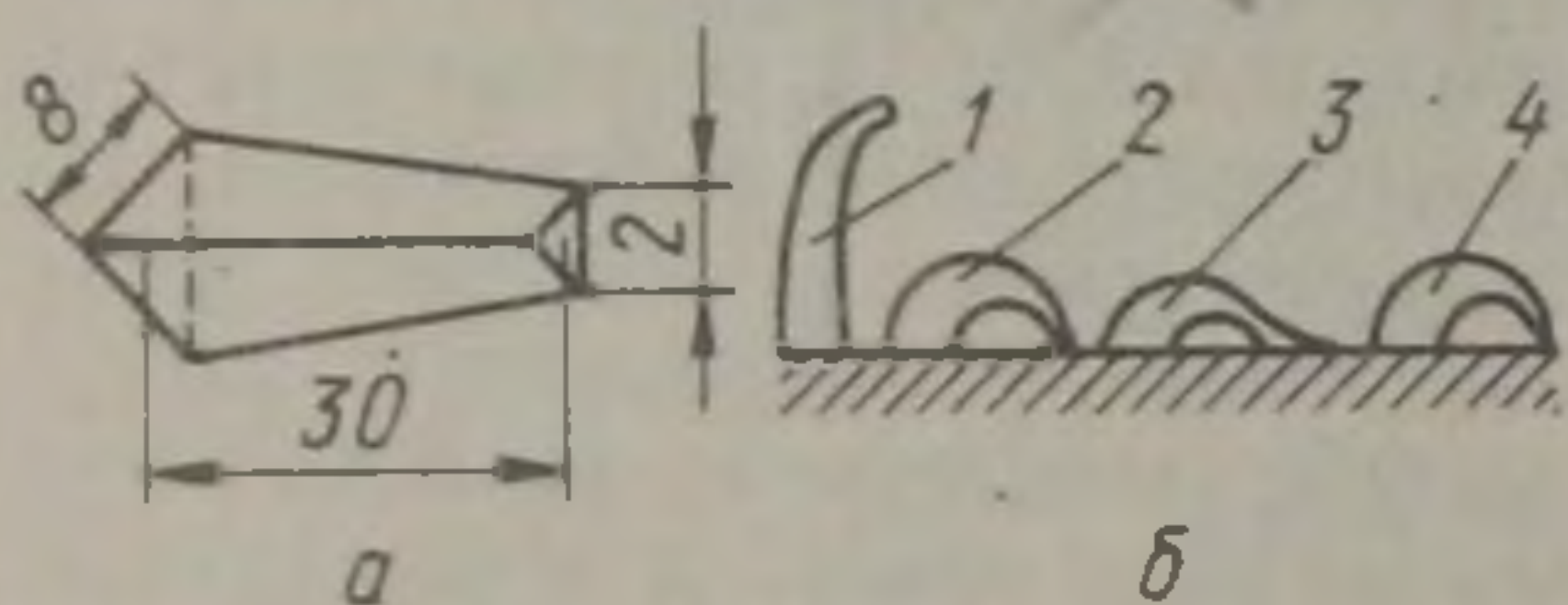


Рис. 8-1. Определение огнеупорности:
а — пироскоп; б — пироскопы при нагреве; 1—3 — стандартные образцы; 4 — опытный образец

состава материала, крупности частиц, наличия примесей, скорости нагрева образца и его параметров. В связи с этим огнеупорность определяют в постоянных условиях, установленных стандартом (ГОСТ 4069—69).

Образец имеет вид усеченной трехгранной пирамиды высотой 30 мм со стороной верхнего основания 2 мм и нижнего 8 мм. При изготовлении образца материал измельчается до порошка, проходящего через сито 900 отв./см². Испытуемый образец устанавливают на плиту рядом с набором стандартных пироскопов известной огнеупорности (ГОСТ 21739—76) и помещают в криптоловую печь. Огнеупорность характеризуется той температурой, при которой образец, деформируясь при нагревании, верхним основанием коснется плиты, на которой он установлен. Температуру определяют по стандартному пироскопу, который коснется своей вершиной плиты одновременно с испытуемым (рис. 8-1).

Стандартные пироскопы имеют номера, умножением которых на 10 определяют температуру, т. е. огнеупорность данного пироскопа. Например, ПК-170 имеет огнеупорность 1700 °С. Скорость повышения температуры должна быть строго определенной, так как процесс размягчения и деформации огнеупорного материала является сложным процессом, протекающим во времени.

Огнеупорность является одним из основных свойств, определяющих температурные границы использования огнеупоров, но не единственным, поэтому судить о пригодности материала или изделия только по его огнеупорности нельзя.

Деформация под нагрузкой

Огнеупорные изделия в футеровке печей одновременно с нагревом подвергаются действию механической нагрузки. В зависимости от места использования огнеупора давление колеблется от 0,1 до 0,3 МПа; так огнеупор на поду подвергается нагрузке расплавленного или нагреваемого металла, огнеупор в стенке испытывает давление вышележащих слоев кладки, в своде на огнеупор влияет сжатие, вызванное расширением свода при нагреве. В связи с этим стандартом установлено исследование деформации огнеупора при нагреве и давлении 0,2 МПа.

Из изделия выпиливают цилиндрический образец диаметром 36 мм и высотой 50 мм, к которому прикладывают указанную нагрузку и нагревают в криптоловой печи с установленной стандартом скоростью (ГОСТ 4070—82). При нагреве образца измеряется температура печи и высота образца. В начале нагрева образец несколько увеличивается по высоте, затем начинает давать усадку. Характерными считают две температуры: $T_{в.р}$ — температуру начала размягчения,

соответствующую 4 %-ному сжатию образца; $T_{к.р}$ — температуру конца размягчения, соответствующую 40 %-ному сжатию образца.

На деформацию под нагрузкой влияет природа огнеупорного материала и наличие твердой и жидкой фаз. На рис. 8-2 показаны характерные кривые деформации огнеупора под нагрузкой:

а) кривые 1 и 2 иллюстрируют деформацию огнеупора, состоящего из зернистой основы и большого количества (40—50 %) связующей ее стекловидной фазы (шамотные изделия). При нагреве количество жидкой фазы увеличивается. Основа, содержащая кремнезем и глинозем, растворяется в ней, вследствие чего вязкость жидкой фазы возрастает. Поэтому усадка образца при испытании, начинаясь при сравнительно низких температурах, происходит плавно;

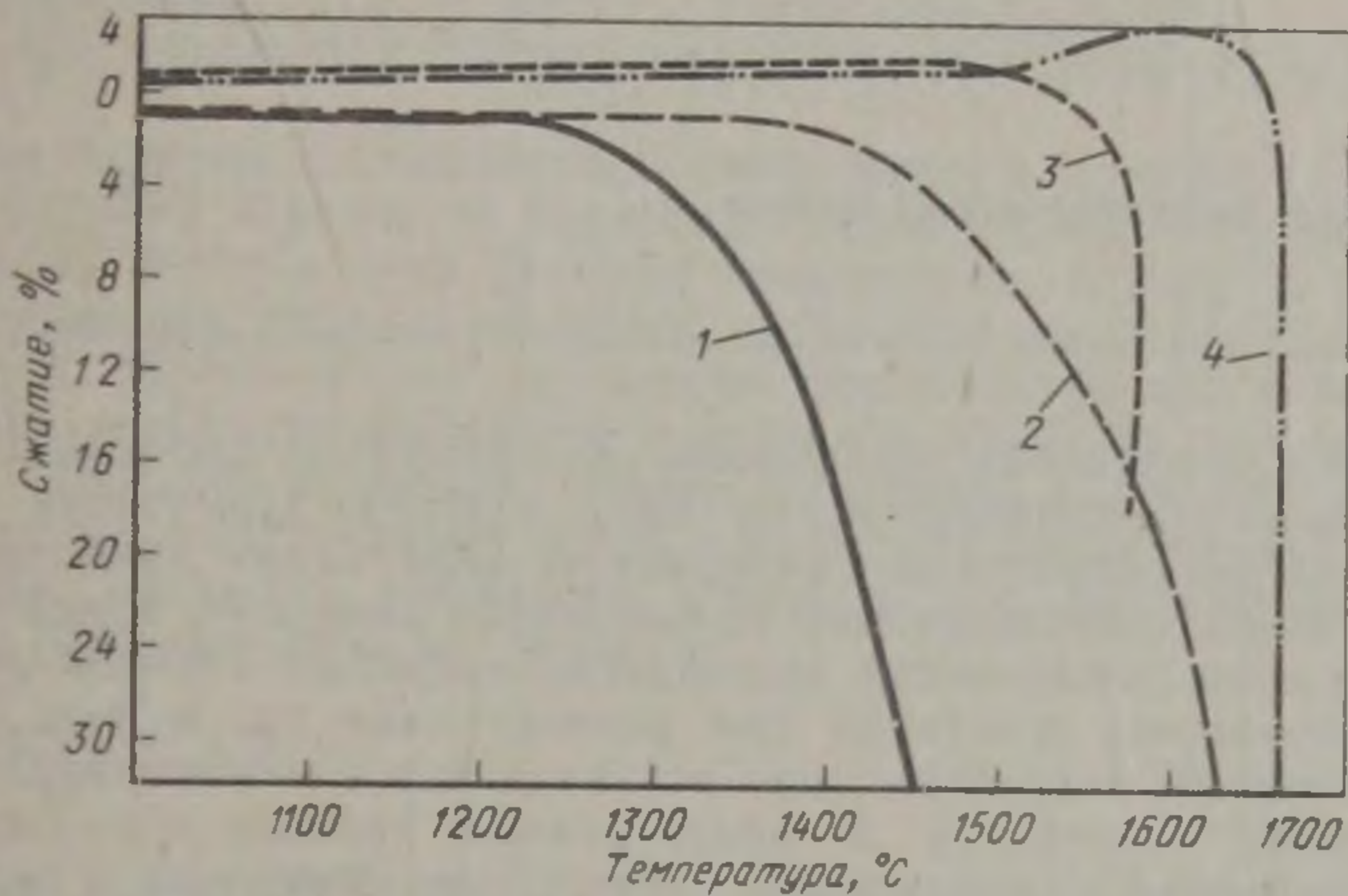


Рис. 8-2. Кривые деформации огнеупоров при одновременном воздействии нагрузки и температуры

б) кривая 3 показывает деформацию огнеупора, состоящего из кристаллов, не образующих сростка, имеющих связку менее огнеупорную, чем кристаллы. При нагреве кристаллы практически в связке не растворяются, поэтому вязкость не уменьшается. В результате образец не дает плавной усадки, а скалывается не достигая 40 % усадки. Этим объясняется и большой разрыв для таких изделий между огнеупорностью и температурой деформации под нагрузкой (периклазовый);

в) кривая 4 иллюстрирует деформацию огнеупора, имеющего в своей основе прочный кристаллический сросток, почти не растворяющийся в жидкой фазе, содержание которой незначительно (10—12 %), (динас). Деформация таких изделий начинается при температуре близкой к их огнеупорности и происходит в узком интервале (10—20 °C).

Как видно из табл. 8-1, у динасовых изделий температура начала деформации близка к температуре огнеупорности. У периклазового огнеупора $T_{н.р}$ значительно ниже температуры огнеупорности. При нагреве шамотных огнеупоров интервал деформации около 200 °C, а $T_{н.р}$ на 350 °C ниже температуры огнеупорности. Чем ближе $T_{н.р}$ к огнеупорности изделий, тем, следовательно, лучше используются свойства исходного сырья, составляющего основу огнеупора, и тем выше качество огнеупора.

Таким образом, деформация под нагрузкой является самым важным показателем, определяющим верхний температурный предел службы огнеупорных изделий, и часто называется их строительной прочностью.

Термостойкость

Способность огнеупора выдерживать, не разрушаясь, резкие колебания температуры называют термостойкостью. Измеряют термостойкость числом теплосмен, которое выдерживает огнеупор при испытании (до потери в массе 20 %). Раз-

Т а б л и ц а 8-1. Связь строительной прочности огнеупоров с их составом и огнеупорностью

Огнеупорные изделия	Содержание основного оксида, %	Огнеупорность, °С	Температура деформации, °С	
			$T_{в.р}$	$T_{к.р}$
Динасовые	96 SiO ₂	1730	1650	1670
Периклазовые	92 MgO	2300	1550	1580 *
Шамотные	40 Al ₂ O ₃ + 55 SiO ₂	1750	1400	1600

* Скалывание периклазового образца.

личают водяные и воздушные теплосмены. Исследование производят в соответствии с установленным стандартом. За одну водяную теплосмену принимают: односторонний нагрев изделия до температуры 1300 °С при комнатной температуре холодного конца с последующим охлаждением нагретого конца в проточной воде. При воздушных теплосменах охлаждение нагретого образца производится на воздухе. Разрушение огнеупора при резкой смене температур может быть вызвано термическими напряжениями, возникающими в материале при значительном градиенте температур и анизотропией термического коэффициента линейного расширения, химическими реакциями (химические напряжения). Таким образом, термостойкость изделий зависит от термического коэффициента линейного расширения и модуля упругости огнеупорного материала.

При создании изделий из различных исходных материалов необходимым условием получения высокой термостойкости является соблюдение условия: $E_1\alpha_1 \approx \alpha_2 E_2$, т. е. $\alpha_1 > \alpha_2$ при $E_1 < E_2$, где E_1 и E_2 — модули упругости компонентов 1 и 2; α_1 и α_2 — их термические коэффициенты линейного расширения.

Химическая стойкость

Химическая стойкость характеризует способность огнеупоров не разрушаться в результате химического воздействия газов, шлаков, металла, пыли шихты и других веществ, которые обобщенно можно назвать средой. В процессе взаимодействия огнеупора со средой происходит его механическое истирание и их химическое взаимодействие, в результате чего уменьшается толщина футеровки, возможно налипание шлака или окалина. На границе шлака и огнеупора образуется расплав, проникающий в футеровку и образующий с ней метаморфический слой. Последний, стекая с поверхности огнеупора, смывает оставшиеся грубые частицы основы огнеупора.

Таким образом, на химическую стойкость огнеупоров влияет состав огнеупора и воздействующей на него среды, истинная пористость огнеупора $P_{\text{ш}}$, температура процесса, вязкость шлака и смачиваемость огнеупора. Чем ближе химический состав огнеупора к химическому составу среды, тем их взаимодействие меньше. Наиболее активно воздействующей средой являются шлаки, поэтому определяя свойства огнеупоров, часто общее понятие химической стойкости заменяют понятием шлакоустойчивости огнеупоров. Существует тигельный способ определения разъедания и проникновения шлака в огнеупорное изделие. В образце огнеупора просверливают отверстие установленной глубины и диаметра, засыпают в него размельченный шлак, нагревают в электрической печи до 1500 °С и выдерживают 3—4 ч. После охлаждения образцы разрезают по высоте и измеряют глубину проникновения шлака.

Пористость

Большинство огнеупорных материалов и изделий пористы. Различают следующие виды пористости:

а) открытую P_o или кажущуюся $P_{каж}$ — это такая пористость, при которой поры сообщаются с поверхностью огнеупора и при кипячении его в воде могут заполняться водой;

б) закрытую P_z , при которой поры изолированы от окружающей среды;

в) общую или истинную $P_{ин}$, при которой есть как закрытые, так и открытые поры.

Часть открытых пор, а именно те поры, с помощью которых сообщается внутренняя поверхность огнеупора с наружной, называют сквозными или пронизываемыми порами P_c .

Пористость выражается процентным отношением объема пор к общему объему образца.

Истинная пористость колеблется в очень широких пределах — от 0 до 90 %. Пористость изделий зависит от пористости применяемых исходных материалов и от способа их изготовления (режима прессования, обжига и т. д.).

Наименьшей пористостью обладают литые изделия — $P_{ин} = 0 \div 16 \%$; обычные огнеупоры, изготовленные пластичным формованием или полусухим прессованием, имеют истинную пористость в пределах 16—30 %; изделия, предназначенные для тепловой изоляции, имеют пористость $P_{ин} = 50 \div 90 \%$.

Открытая пористость (кажущаяся) определяется насыщением водой исследуемого образца, путем его кипячения в течение 3 ч. Вычисление открытой пористости, %, производится по формуле:

$$P_o = \frac{G_2 - G_1}{V} 100,$$

где G_1 — масса сухого образца, кг; G_2 — масса образца насыщенного водой, кг; V — объем образца, м³.

Объем образца определяется путем гидростатического взвешивания.

Вводя понятие «водопоглощения» определяют кажущуюся плотность. Водопоглощением (B) называется отношение массы поглощенной воды к массе сухого образца

$$B = \frac{G_2 - G_1}{G_1} 100.$$

Отношение открытой пористости к водопоглощению равно кажущейся плотности, кг/м³:

$$\rho_{каж} = P_o/B = G_1/V.$$

При определении истинной пористости $P_{ин}$ надо знать плотность материала ρ (масса единицы объема материала в плотном состоянии — без пор).

Отношение кажущейся плотности $\rho_{каж}$ к истинной плотности характеризует степень плотности изделия. Определив степень плотности изделия, можно найти его истинную пористость, %:

$$P_{ин} = (1 - \rho_{каж}/\rho) 100.$$

Закрытая пористость определяется, как разность истинной и открытой пористости

$$P_z = P_{ин} - P_o.$$

Пористость огнеупорных изделий влияет на их теплопроводность, шлакоустойчивость и механическую прочность. Сквозная пористость оказывает большое влияние на газопроницаемость изделий.

Газопроницаемость

Различают газопроницаемость отдельных изделий и газопроницаемость кладки, последняя определяется в основном состоянием швов. Характеристикой газо-

проницаемости изделий является коэффициент, определяющий скорость фильтрации газов через сквозные поры.

Образец для исследования огнеупора на газопроницаемость вырезают из целого изделия в направлении, перпендикулярном направлению прессования. Через образец пропускается осушенный воздух комнатной температуры, одновременно измеряется перепад давления до и после образца.

Выражение для расчета коэффициента газопроницаемости, m^2 , выведено из уравнения Пуазейля и имеет вид

$$K = \mu V l / S \Delta p,$$

где V — расход воздуха, m^3/c ; l — высота образца, m ; S — площадь сечения образца, m^2 ; Δp — разность давлений, Pa ; μ — динамический коэффициент вязкости воздуха при температуре $20^\circ C$, $Pa \cdot c$.

Величина коэффициента газопроницаемости зависит от наличия сквозных пор в огнеупоре и от условий его эксплуатации, а именно от градиента давления $\Delta p/l$ и от температуры.

Газопроницаемость имеет большое значение при использовании огнеупора для футеровки вакуумных печей, при работе с защитной атмосферой, при изготовлении муфелей, труб рекуператоров и т. п.

Теплоемкость

Теплоемкость [c , $Дж/(кг \cdot K)$] огнеупорных изделий зависит от их химического и минералогического состава. Средняя теплоемкость различных огнеупоров изменяется в пределах $0,84—0,96$ $кДж/(кг \cdot K)$. С увеличением температуры огнеупора теплоемкость возрастает, но незначительно.

Удельная теплоемкость влияет на скорость нагрева и охлаждения футеровки, а также на аккумуляцию тепла насадок регенеративных камер и футеровки печей периодического действия.

Теплопроводность

Теплопроводность (λ , $Вт/(м \cdot K)$) зависит от химико-минералогического состава огнеупора и от пористости изделия.

Зависимость теплопроводности огнеупоров от температуры (без учета пористости) выражается эмпирической формулой

$$\lambda_T = \lambda_0 (1 \pm bT),$$

где λ_T — теплопроводность огнеупора при температуре, $Вт/(м \cdot K)$; λ_0 — теплопроводность при $0^\circ C$, $Вт/(м \cdot K)$; T — температура огнеупора, $^\circ C$; b — эмпирический коэффициент, зависящий от вида огнеупора.

Знаки «+» и «-» говорят о том, что в зависимости от химико-минералогического состава огнеупора теплопроводность с повышением температуры увеличивается или уменьшается. Значение теплопроводности изменяется в широких пределах ($\lambda_0 = 0,20—60$ $Вт/(м \cdot K)$). Определение коэффициента теплопроводности производится по ГОСТ 12170—76. Изделия с низкой теплопроводностью, у которых $\lambda_0 < 0,2$ $Вт/(м \cdot K)$, могут применяться в качестве тепловой изоляции.

Теплопроводность огнеупорных изделий влияет на способность огнеупоров выдерживать резкие смены температур, на способность их пропускать тепло или, наоборот, иметь теплоизолирующее свойство, на время, необходимое для разогрева печи до рабочей температуры. Таким образом, коэффициент теплопроводности оказывает большое влияние на величину теплового коэффициента полезного действия агрегата.

Температуропроводность

Температуропроводность [$a = \lambda/(c\rho_{каж})$, m^2/c] играет большую роль при определении скорости прогрева кладки.

Электропроводность

При низких температурах большинство огнеупорных изделий является диэлектриками. При нагреве до температуры, при которой возможно образование жидкой фазы, они становятся проводниками электрического тока. Исключением являются углеродсодержащие огнеупоры, которые проводят ток при любой температуре.

Проблема электропроводности приобрела особое значение при развитии электросталеплавильных печей, для которых электроизоляционные свойства огнеупоров особенно важны.

Термический коэффициент расширения

Термическим коэффициентом линейного расширения называют увеличение линейных размеров тела при нагревании на один градус (α , K^{-1}). Порядок этой величины для некоторых оксидных кристаллов $\alpha = (6-8) \cdot 10^{-6} K^{-1}$. Для аморфных тел и для кристаллов с кубической решеткой термический коэффициент объемного расширения β при нагревании на $1^\circ C$ примерно в три раза больше линейного.

Термический коэффициент расширения влияет и на линейное расширение изделия при нагреве. Знание термического расширения необходимо при определении допустимой скорости нагрева печи, а также для расчета необходимого количества и размеров температурных швов, зазоров, обеспечивающих возможность расширения огнеупора без разрушения кладки.

Постоянство объема при высоких температурах

В процессе службы огнеупоров в условиях высоких температур вследствие продолжающегося спекания и различных физико-химических процессов происходит так называемое дополнительное изменение объема (например, шамот дает дополнительную усадку, динас — дополнительный рост). Незначительная дополнительная усадка не вызывает разрушения кладки, а небольшой дополнительный рост влияет положительно, так как приводит к уплотнению швов. Дополнительный рост или усадку огнеупоров вычисляют по формуле

$$\Delta V = \frac{V_1 - V_0}{V_0} 100 \%,$$

где V_1 — объем после нагрева до температуры печи и выдержки при этой температуре в течение 2 ч; V_0 — первоначальный объем.

Заметное изменение объема недопустимо, поэтому при изготовлении изделий вводят в состав шихты компоненты, обеспечивающие постоянство объема. Большую роль играет обжиг изделий. Недостаточно обожженные изделия в процессе службы при температурах выше температур обжига дают значительные дополнительные изменения в результате продолжающихся минералогических превращений.

Теплофизические свойства некоторых огнеупоров приведены в табл. 8-2.

Правильность формы и размеров огнеупорных изделий

Размеры всех огнеупорных изделий, как нормальных, так и фасонных стандартизованы. Однако, в процессе их изготовления возможны отклонения от установленных размеров. В этих случаях увеличивается размер швов и кладка получается менее плотной. Стандарты и технические условия устанавливают допустимые отклонения от заданных размеров для каждого вида огнеупора.

Изделия, изготовленные пластичным формованием, дают наибольшее отклонение от стандарта. Полусухое прессование обеспечивает получение изделий более точных размеров. Чем меньше допустимый размер шва кладки, тем меньше должно быть отклонение размеров от стандарта. При применении неформованных огнеупоров расхождение в процессе производства футеровки связано с колебанием ее влажности, крупности, применяемого порошка и качества связующего материала.

Т а б л и ц а 8-2. Теплофизические свойства огнеупоров

Огнеупорные изделия	Теплопроводность, Вт/(м·К), при температуре, °С			Теплоемкость, Дж/(кг·К), при температуре, °С		
	20	500	1000	20	500	1000
Шамотные	1,16	1,34	1,51	0,83	1,00	1,08
Динасовые	1,16	1,40	1,63	0,79	0,96	1,00
Периклазовые	5,82	4,66	3,50	0,92	1,08	1,08
Корундовые	29,10	10,04	5,82	0,83	1,00	1,08

Огнеупорные изделия	Объемная плотность, кг/м³	Температуропроводность (м²/с) при температуре, °С			Термическое расширение, % при 1000 °С
		20	500	1000	
Шамотные	2,0	0,70	0,67	0,70	0,6
Динасовые	1,9	0,77	0,77	0,86	1,3
Периклазовые	2,6	2,42	1,66	1,25	1,35
Корундовые	3,8	9,20	2,74	1,42	0,6

Механическая прочность при обыкновенной температуре

Огнеупоры при обыкновенной температуре характеризуются хрупким разрушением, которое наступает после небольшой упругой деформации и малой по величине пластической деформации. Механическая прочность огнеупоров характеризуется пределом прочности при сжатии $\sigma_{сж}$, который для обычных изделий находится в пределах 20—50 МПа, для плотных — 50—100 МПа. Прочность огнеупоров при деформации изгиба $\sigma_{изг}$ и растяжения $\sigma_{рас}$ находится приблизительно в зависимости от $\sigma_{сж}$: $\sigma_{изг} \approx (0,3 \div 0,2) \sigma_{сж}$, $\sigma_{рас} \approx (0,16 \div 0,12) \sigma_{сж}$.

Прочность огнеупоров зависит от их пористости: при обыкновенной температуре прочность мелкозернистых (а следовательно, и мелкопористых) изделий выше, чем крупнозернистых. Оказывает влияние и равномерность распределения пор. Для огнеупорных изделий, применяемых в металлургических агрегатах, большое значение имеет и механическая прочность на истирание. Разрушение огнеупорных изделий и футеровок в результате истирания при непосредственном воздействии слоя шихты (доменные печи, обжиговые печи) или запыленными газами называется механическим износом. Истирание может происходить при любой температуре. Стойкость изделий по отношению к истиранию определяется в соответствии с установленным стандартом путем измерения потери массы при обработке испытуемого образца на абразивном круге. Уменьшение массы образца позволяет судить о механическом износе изделия. Износостойкость изделий зависит от их зернового состава, структуры, пористости и применяемой при изготовлении связки. Высокое давление при формовании, высокотемпературный обжиг, хорошая спекаемость изделия обеспечивают повышение их износостойкости. Особое значение устойчивость футеровки к истиранию имеет во вращающихся печах для обжига, в слоевых печах типа доменных печей, вагранок, в сталеразливочных ковшах и т. п.

3. Огнеупорные изделия

Огнеупорные материалы и изделия бывают естественными и искусственными. К естественным относятся: кварцевые песчаники, тальковый сланец, хромистый железняк, огнеупорная глина, асбест и др. Эти материалы применяют в про-

мышленности без длительной специальной обработки для изготовления набивных масс, изолирующих обмазок, картонов, засыпки. Тальковый сланец используют для кладки некоторых элементов печей.

Большинство применяемых в металлургической промышленности огнеупоров — искусственные. Это многокомпонентные соединения, которые изготавливают по следующей общей технологической схеме: а) подготовка исходных материалов, целью которой является очистка от вредных примесей и получение путем обжига устойчивых соединений, их измельчение и сортировка;

б) приготовление исходной шихты, заключающееся в перемешивании определенных количеств исходных компонентов и увлажнении смеси;

в) формовка изделий;

г) сушка изделий, которая производится медленно с целью равномерного удаления гигроскопической влаги по всей толщине изделия до влажности 1—1,5 %. Оставление незначительной влажности необходимо для сохранения прочности изделия;

д) обжиг изделий — это наиболее ответственная операция в процессе производства огнеупоров. Основной целью обжига является получение твердого кристаллического сростка. Большинство изделий обжигают в специальных печах по установленному технологией производства режиму, отдельные огнеупорные изделия обжигаются прямо в кладке металлургической печи (безобжиговые изделия). При изготовлении плавных изделий шихту нагревают до температуры расплавления и разливают по формам, в которых происходит последующее медленное охлаждение изделий с целью снятия внутренних напряжений.

В соответствии с теорией, изложенной акад. А. А. Байковым, физико-химическая сущность производства огнеупорных изделий заключается в обеспечении выделения из сырья в чистом виде соединений, составляющих основу огнеупора, добавки к ним связующих и, если требуется, незначительного количества плавней, увлажнение и равномерное перемешивание всей шихты. В процессе обжига происходит расплавление связующих соединений и шлакование ими основных соединений, их растворение в полужидкой фазе и перекристаллизация с образованием новых прочно сросшихся кристаллов. Температура и длительность обжига должны обеспечить необходимое количество жидкой фазы и достаточное время для окончания процесса перекристаллизации.

Кремнеземистые огнеупорные изделия

Общая характеристика. К кремнеземистым изделиям относятся динасы ($\text{SiO}_2 \geq 93\%$) (ГОСТ 4157—79) и кварцевые изделия ($\text{SiO}_2 \geq 85\%$).

Сырьем для изготовления динаса служит чистый кварцит, содержащий $>95\%$ SiO_2 и 1,5—2,0 % извести. Известны восемь модификаций кремнезема, из которых одна аморфная — кварцевое стекло и 7 кристаллических: α - и β -кварц, α -, β - и γ -тридимит, α - и β -кристобалит. В природе кремнезем находится в виде β -кварца и перевести его полностью в иную модификацию не удается. Переход из одной модификации в другую, совершаемый при изменении температуры и присутствии жидкой фазы, сопровождается изменением удельного объема и вызывает внутренние напряжения, могущие привести к разрушению изделия. Поэтому при производстве динаса необходимо считаться со свойствами SiO_2 .

На рис. 8-3 приведена схема полиморфных превращений кремнезема, из которой видно, что по температуре плавления наиболее выгодным является кристобалит, а с точки зрения постоянства объема — тридимит.

Тридимит имеет наименьшее термическое расширение и представляет собой прочный сросток кристаллов, в то время как кристобалит имеет значительно более рыхлую структуру. В связи с этим стремятся в результате обжига получить 50—70 % тридимита и не более 30 % кристобалита. Скорость перерождения кварца в тридимит увеличивается при введении минерализаторов (FeO , CaO) и зависит от температуры и длительности обжига. Высокая степень тридимитизации динаса достигается обжигом его при температуре 1300—1450 °С с выдержками при температурах, соответствующих перекристаллизации кремнезема из одной модификации в другую. При температуре 550—650 °С наблюдается переход β -кварца в α -кварц, удельный объем возрастает на 4,6 %; при 1100—

1350 °С появляется жидкая фаза и начинается переход α -кварца в α -тридимит; в интервале температур 1350—1450 °С обжиг следует вести очень медленно, так как скорость перекристаллизации кварца в этот период значительно увеличивается. При большой скорости нагрева α -кварц перейдет в α -кристобалит. Охлаждение в интервале температур 300—100 °С также следует проводить медленно, так как в этот период происходит превращение α -тридимита и α -кристобалита в модификации β и γ , что связано с уменьшением их удельного объема.

Содержание примесей в кремнеземе, вместе со специально добавленными минерализаторами, не должно превышать 3—7 % ($\leq 0,3\%$ Na_2O , $\leq 1,5\%$ FeO

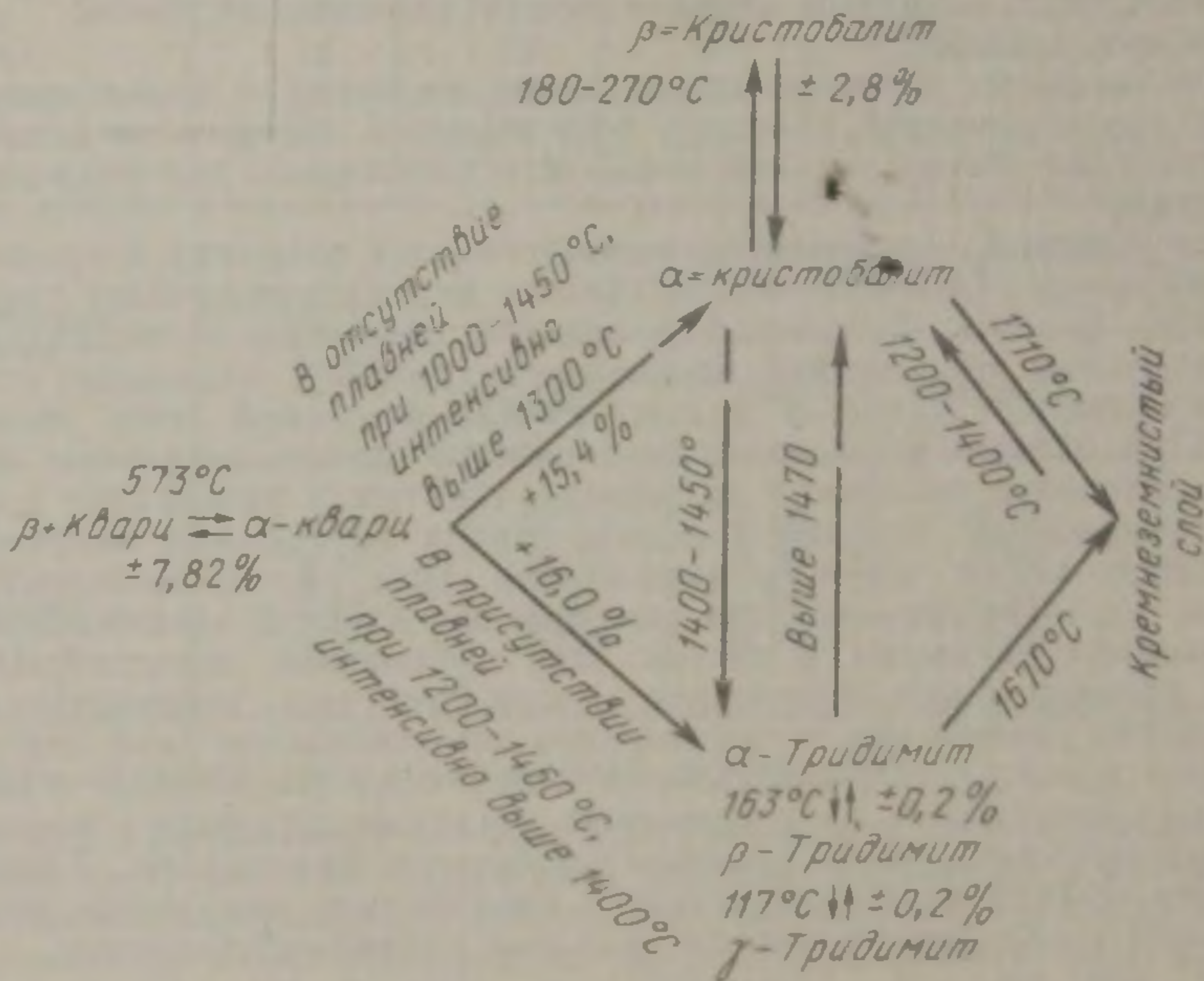


Рис. 8-3. Схема полиморфных превращений кремнезема

и Al_2O_3 , $\leq 2-3\%$ CaO и MgO), так как их присутствие в шихте заметно понижает огнеупорность изделия. Однако без добавки в шихту минерализаторов жидкая фаза не будет образовываться в достаточном количестве, способствующем переходу α -кварцу в α -тридимит, что вызовет повышенное содержание кристобалита в изделии.

Добавка в шихту измельченного динасового боя (20—30 %) уменьшает возникающие при обжиге внутренние напряжения и сокращает рост изделия. В качестве связующего добавляют CaO в виде известкового молока (1,7—2,5 %) и сульфитно-спиртовую барду (0,2—1,0 %). Шихту увлажняют до 3—7 %. Прессуют изделия под давлением 25—60 МПа, а для получения плотного динаса давление повышают до 100 МПа или применяют двустороннее сжатие. Сушку динаса производят медленно — при 100—200 °С до влажности 1—1,5 %. Обжиг осуществляют обычно в туннельных печах непрерывного действия, а сложных фасонных изделий — в печах периодического действия. Режим обжига устанавливают в зависимости от качества сырья и ассортимента изделий. Предельная температура обжига 1450 °С. Длительность обжига достигает 100 ч и более.

Свойства и служба. Огнеупорность 1700—1730 °С, т. е. сравнительно невысокая, однако динас выдерживает большие механические нагрузки до температур, близких к температуре его огнеупорности. В связи с этим температура начала деформации динаса высокая $T_{н.р} = 1650$ °С. Следует иметь в виду, что после начала деформации динас очень быстро дает усадку и достигает конца деформации ($T_{к.р} = 1670$ °С). Термостойкость динаса низкая — 1—2 водяных теплосмены. Но при высоких температурах ($T > 760$ °С) динас значительно лучше противостоит резким изменениям температуры, в связи с чем не

следует динасовую кладку делать с искусственным охлаждением, а при остановке на ремонт охлаждение кладки надо производить медленно.

Для динаса характерна хорошая стойкость по отношению к кислым шлакам (при $\text{CaO/SiO}_2 < 0,54$). Оксиды железа, меди, свинца и других металлов взаимодействуют с кремнеземом динаса и образуют легкоплавкие силикаты, что приводит к быстрому оплавлению огнеупора.

Известь, щелочи и их пары также образуют с кремнеземом легкоплавкие соединения, в результате разрушение динаса начинается при температуре 1000°C . В среде водорода кремнезем при температуре 1200°C и выше переходит в кристобалит, что сопровождается нарушением прочности изделия.

При нагревании или охлаждении объем динасовых изделий изменяется, что связано с термическим расширением и полиморфными превращениями кремнезема. Расширение может иметь и необратимый характер, что зависит от тримитизации динаса в процессе его обжига. Поведение динаса при службе в значительной степени связано с его ростом. Суммарное расширение динаса при нагревании до 1500°C не должно превышать $1-1,5\%$, а дополнительный рост $0,3-0,4\%$. Рост объема динаса способствует уплотнению швов и, следовательно, повышению прочности и плотности кладки.

Стойкость динаса к структурному растрескиванию при насыщении кислыми шлаками и механическая прочность при высоких температурах хорошие, и, как правило, не являются причиной его разрушения.

Благодаря этим свойствам динас широко применяют в качестве сводового материала стекловаренных, а иногда и небольших мартеновских печей. При службе в своде динас приобретает зональное строение: 1) неперерожденная светло-желтая (наружный конец кирпича); 2) переходная светло-бурая; 3) тридимитовая черная; 4) кристобалитовая светло-серая (рабочая зона).

Рабочая кристобалитовая зона имеет равномерно зернистую структуру кристобалита, почти полностью перекристаллизованного из исходного тридимита со значительным содержанием магнетита. Огнеупорность этой зоны выше тридимитовой и в $10-15$ раз выше исходного динаса. Тридимитовая зона состоит из хорошо развитых кристаллов тридимита, силикатов железа и кристаллов магнетита.

Переходная зона содержит, наряду с кристаллами тридимита, еще большое количество стекловидной фазы. Плотная структура тридимитовой и кристобалитовой зон предохраняет динас от скалывания и отрыва кусков рабочей зоны, износ свода при этом происходит путем постепенного оплавления рабочей поверхности.

В мартеновских печах динас используют для кладки верхних рядов насадок регенераторов и их сводов (интенсивность износа определяется температурой и запыленностью дымовых газов), а также для кладки стен, сводов и подин кислых сталеплавильных печей. Динас применяют для кладки стен непрерывно действующих высокотемпературных нагревательных печей (нагревательных колодцев, методических печей).

Динас является основным материалом для кладки коксовых печей, где он служит $15-20$ лет. Динасовые изделия применяют в воздухонагревателях доменных печей, где используется его устойчивость к деформации при повышенных температурах и отсутствие дополнительной усадки. В цветной металлургии динас применяют для кладки стен, сводов, подин отражательных и электрических печей.

С целью повышения качества динаса разработано производство высокоплотного динаса ($\text{P}_n = 11-13\%$) с повышенным содержанием SiO_2 (98%) и снижением содержания примесей, особенно Al_2O_3 . Высокоплотный динас имеет повышенную химическую стойкость (в том числе и шлакоустойчивость), низкую газопроницаемость и повышенную огнеупорность. Применяют его в сводах электропечей.

К кремнеземистым огнеупорным изделиям относится и спеченный огнеупор, полученный из плавленного кремнезема. Основным компонентом является кремнезем. В качестве связующего вещества применяют тонкомолотое кварцевое стекло. Для этих изделий характерна низкая теплопроводность, малое термическое расширение и сравнительно высокая термостойкость. Специальной технологией

изготовления можно получить высокий процент открытой пористости (до 60—85 %), т. е. хорошую тепловую изоляцию.

Основные области применения этих изделий обусловлены хорошим сопротивлением воздействию расплавленного металла. Их применяют для изготовления сталеразливочных стаканов для машин непрерывного литья заготовок в цветной металлургии, для футеровки ковшей, выпускных отверстий в плавильных печах алюминиевого, медного и цинкового производства.

Алюмосиликатные огнеупорные изделия

К алюмосиликатным относятся изделия, в которых содержится более 15 % Al_2O_3 и не более 85 % SiO_2 . В зависимости от соотношения этих оксидов в составе огнеупора изменяются его свойства. На рис. 8-4 представлена диаграмма состояния $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$.

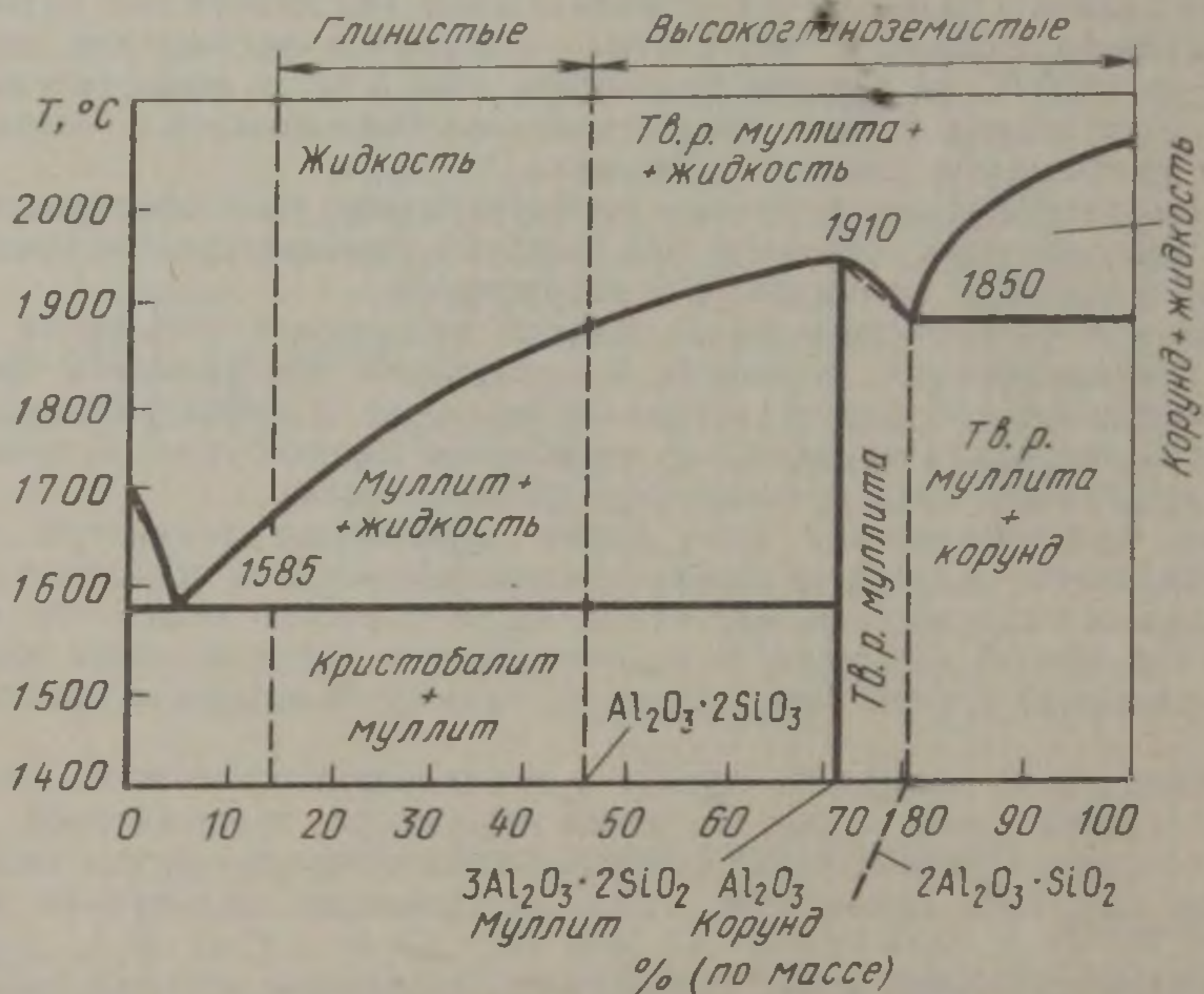


Рис. 8-4. Диаграмма состояния системы $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$

Классификация алюмосиликатных огнеупоров приведена ниже:

	$\text{Al}_2\text{O}_3, \%$
Глинистые:	
полукислые	15—28
шамотные	28—45
Высокоглиноземистые:	
муллитокремнеземистые	45—62
муллитовые	62—72
муллитокорундовые	72—90
глиноземистые корундовые	>90

Как видно из рис. 8-4, наиболее устойчивой твердой фазой является муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), содержащий 72 % Al_2O_3 и 28 % SiO_2 . Наименьшая температура появления жидкой фазы равна 1585 °С. Эвтектика содержит 5,5 % Al_2O_3 и 94,5 % SiO_2 . Плавни, содержащиеся в глинах, снижают температуру плавления эвтектического соединения до 1545 °С. Повышение содержания глинозема в составе огнеупора улучшает его качество. Однако при службе огнеупора при взаимодействии его со шлаком температура плавления значительно снижается, так как в системе $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ шлак (CaO) играет роль плавни и температура плавления может снизиться до 1165 °С. Технология изготовления огнеупорного изделия определяется его видом и применяемым сырьем.

Общая характеристика (марки — ША, ШБ, ШВ). Для производства шамотных огнеупоров используют огнеупорные глины и каолины, основой которых является каолинит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Глины и каолины относят к полидисперсным материалам. Фракция глин 0,01—0,005 мм имеет разную форму, каолины имеют форму пластинок или чешуек толщиной около 0,72 нм, соединенных друг с другом в червеобразные сrostки.

Основные примеси в глинах и каолинах: свободный кремнезем, глинозем, щелочные и щелочно-земельные оксиды, соединения железа, титана, органические примеси. Неорганические примеси снижают огнеупорность глин и каолинов, поэтому их называют главнями. Количество примесей обычно не превышает 6—7%. Наиболее вредными являются пирит и марказит.

Характерными свойствами глин и каолинов являются пластичность, связующая способность и спекаемость. Наличие в каолинитах кристаллизационной воды приводит к образованию при их обжиге усадочных трещин. В связи с этим при изготовлении изделий необходимо применять отошители, в качестве которых используют обожженную огнеупорную глину — шамот. Глины, высушенные при температуре 110 °С, теряют пластичность, но при добавлении воды опять становятся пластичными. При нагреве до 450—600 °С удаляется химически связанная вода, при этом каолинит необратимо теряет пластичность (шамот). При дальнейшем нагреве до 1200 °С образуется муллит $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. Выдержка при этой температуре способствует росту кристаллов муллита. Одновременно с муллитом образуются кристобалит, аморфная часть и жидкая фаза. Количество последней связано с содержанием щелочей в исходном сырье.

Технология производства шамотных огнеупоров может быть представлена следующей схемой: приготовление шамота (приготовление глины — связки) → дозирование шамота и связки (смешение) → увлажнение массы → формование и прессование → сушка → обжиг.

Обжиг глины на шамот производится во вращающихся печах или в многозонном реакторе кипящего слоя. Помол и рассев шамота позволяет получить различные фракции, так как зерновой состав шамота влияет на механическую прочность, термостойкость и шлакоустойчивость изделий.

Глина, используемая для связки, подвергается сушке, тонкому помолу и прессованию; для этой цели применяют глину с содержанием частиц крупностью до 0,5 мм более 70%. При изготовлении обычных шамотных изделий в состав массы входит 35—40% глины-сырца и 65—60% шамота. Смешение производят или на бегунах или более легкими бегунковыми смесителями.

Изготовление изделий производится пластичным формованием или полусухим прессованием. При пластичном формовании увлажненная масса (влажность 16—25%) поступает в ленточные прессы, где ей придаются грубая форма и начальное уплотнение. Затем изделие поступает на допрессовочные прессы, где ему сообщается окончательная форма. Усадка изделий после обжига достигает 6—8%. При полусухом прессовании масса имеет влажность 7—9% и прессуется под давлением 25 МПа. После обжига усадка изделий не превышает 3—4%.

При изготовлении сложных фасонных изделий или крупных блоков применяют метод трамбования. Влажность формовочной массы в этом случае составляет 5—6%, а усадка после обжига не превышает 2,0%.

Сырец, полученный одним из перечисленных способов, сушат в специальных сушилках на полочных вагонетках, затем изделие подвергается обжигу в туннельных или кольцевых печах. Основные физико-химические процессы при обжиге происходят в связующей глине, одновременно продолжают и некоторые процессы в шамоте. Скорость обжига во избежание образования трещин не должна быть высокой, так как разложение каолинита и спекание изделий сопровождается объемными изменениями. Конечная температура обжига шамотных изделий 1400 °С. Значительные изменения в составе и качестве исходного сырья определяют и большие изменения в свойствах изделий.

Свойства и служба. Огнеупорность шамотных изделий находится в пределах 1580—1750 °С. (не менее 1730 °С — ША, 1670 °С — ШБ, 1580 °С — ШВ). Температура начала деформации низкая (1170—1400 °С), однако,

температурный интервал между началом и концом деформации сравнительно велик (200 °С и более). Термостойкость высокая и зависит от состава масс и способа изготовления. При пластичном формовании изделий она составляет 6—12 теплосмен, а при полусухом прессовании достигает 50 теплосмен. С увеличением содержания шамота термостойкость растет. Шамотные изделия, содержащие кислый оксид SiO_2 и амфотерный Al_2O_3 , являются полукислыми огнеупорами и при высоких температурах подвергаются воздействию основных шлаков в том числе и окалина, при контакте с которыми образуются легкоплавкие соединения. Оксиды меди и свинца также образуют с шамотом легкоплавкие соединения. При наличии водорода в атмосфере печи шамотные изделия разрушаются вследствие взаимодействия его с SiO_2 и примесями Na_2O , TiO_2 , MgO . Для шамота характерна незначительная дополнительная усадка в результате повторного нагрева в процессе службы.

Благодаря широкому распространению исходного сырья и сравнительно низкой стоимости производства при достаточно высоком качестве изделий шамотные огнеупоры являются наиболее распространенными.

В черной металлургии их применяют в доменных печах для футеровки шахты и распара (ГОСТ 1598—75). Температура в шахте не превышает 1400 °С, но огнеупор подвергается истирающему действию шихты и химическому воздействию оксида углерода, осаждающегося в порах кладки. С целью повышения срока службы шамота его изготавливают повышенной плотности (марки ШПД-39; ШПД-41; ШПД-42). В воздухонагревателях доменной печи из шамота выполняют рабочий слой футеровки и верхние ряды насадки. Разрушение кладки связано с запыленностью газов, содержащих оксиды железа; при температуре 1300—1400 °С кирпич оплавляется. Срок службы верхних рядов насадки 1—1,5 года, футеровки стен 2—3 года. В мартеновских печах шамот широко используют в кладке нижнего строения (регенеративные камеры, борова).

Используя высокую термостойкость шамота, его широко применяют в качестве сталеразливочного припаса (ковшовой кирпич, фасонный кирпич для набора канавы, летниковые трубки, звездочки, воронки и др.) при заполнении изложниц снизу. Температура кладки ковша перед заполнением его сталью 250—300 °С, температура выпускаемой стали 1550—1600 °С. Футеровка ковша, таким образом, подвергается резкому термическому удару, а рабочая поверхность ее оплавляется. При сливе стали и понижении уровня металла футеровка подвергается разъедающему действию шлака. Срок службы футеровки ковша, выполненной из шамота, составляет 8—20 плавов и зависит от термостойкости и плотности огнеупора (ГОСТ 5341—69, марки КШУ-32; КШУ-37; КШУ-39).

Шамотные изделия применяют также для футеровки стен и сводов нагревательных колодцев, где они служат в течение 2—3 лет. Для футеровки подин нагревательных печей из-за возможного контакта с окалиной шамот применять нельзя.

Термические печи могут быть целиком выполнены из шамота и работают без ремонта от 5 до 15 лет. Печи для нагрева меди и ее сплавов работают при температуре 700—900 °С, а для нагрева сплавов на основе алюминия и магния при температуре от 100 до 600 °С. Нагрев при термообработке часто ведется в защитной атмосфере. Поэтому для нагревательных печей цветной металлургии требуются огнеупоры с малой газопроницаемостью, достаточно огнеупорные и термостойкие. Этим требованиям вполне отвечает обычный шамот или шамот повышенного качества (каолиновый высокоглиноземистый или многошамотные огнеупоры).

Шамотные изделия широко применяют для футеровки паровых котлов, дымоходов и за рабочим слоем футеровки различных плавильных печей.

Многошамотные огнеупоры

Повышение механической прочности и термостойкости шамотных изделий достигается увеличением содержания шамота в формовочной массе до 80—95 %. Соответственно содержание глины — сырца снижается до 20—5 %, что является недостаточным для обеспечения пластичных свойств массы. Для повышения связующей способности в массу вводят клеющие добавки и электролиты. Прессование изделия производится под давлением 80—100 МПа.

Полученные изделия имеют малую пористость, повышенную температуру начала деформации и хорошую термостойкость (до 100 теплосмен).

Полукислые огнеупоры

По своему химическому составу полукислые огнеупоры являются промежуточными между диансовыми и шамотными. Сырьем для их производства служат глины, содержащие 15—30 % Al_2O_3 и в качестве отощителя шамот и кварцевый песок. Технология изготовления такая же, как и для шамотных огнеупоров.

Огнеупорность полукислых изделий несколько ниже, чем шамотных, но плотность выше, благодаря чему они обладают более высокой шлакоустойчивостью. Дополнительная усадка не превышает 1—1,5 %.

Используют полукислые огнеупоры для футеровки различных нагревательных устройств, работающих при температурах выше 1500°C , они хорошо служат в сводах нагревательных печей.

Высокоглиноземистые огнеупорные изделия

Общая характеристика. Для производства изделий, содержащих свыше 45 % Al_2O_3 , используют природные высокоглиноземистые минералы — андалузит ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$), силлиманит ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$), кизанит ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$), боксит ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), корунд (Al_2O_3) и техническое сырье — глинозем и плавленный корунд. Такие огнеупоры могут быть получены путем высокотемпературного обжига формованных изделий или литьем из расплава.

Технология производства обожженных изделий аналогична производству многошамотных огнеупоров и отличается исходным сырьем, применением в качестве связующего особо чистых каолинов и органических добавок, повышением давления (120 МПа) при формовании и более высокой температурой обжига $1500—1750^\circ\text{C}$ (последняя для корундовых изделий).

В качестве сырья при изготовлении домуллитовых огнеупоров применяют силикаты глинозема, для муллитовых и муллитокорундовых — гидраты глинозема, а корундовые огнеупоры изготавливают из технического глинозема и электрокорунда.

Для улучшения спекания технического глинозема вводят добавки TiO_2 , AlF_3 и др. Уменьшение усадки при обжиге изделий достигается предварительным обжигом части исходного материала на «шамот».

Основными кристаллическими компонентами высокоглиноземистых изделий являются муллит и корунд.

Плавленные муллитовые изделия получают в электроплавильных печах путем расплавления шихты, состоящей из силлиманита, кокса и стального лома. При расплавлении идет реакция



Полученный муллит как более легкий всплывает и благодаря этому его легко разливают по формам. Во избежание возникновения внутренних напряжений и трещин, охлаждение изделий производится медленно в течение 4—10 суток. После чего их вынимают из форм и механической обработкой доводят до требуемых размеров.

Свойства и служба. Свойства изделий изменяются в зависимости от соотношения в огнеупоре исходных компонентов и содержания стекловидного вещества. Огнеупорность изделий $1770—1920^\circ\text{C}$ (последняя для корундовых огнеупоров). Строительная прочность характеризуется $T_{\text{н.р}} = 1610^\circ\text{C}$ и $T_{\text{к.р}} = 1830^\circ\text{C}$. Изделия обладают сравнительно высокой кажущейся плотностью и устойчивостью к истиранию. По химическому составу они близки к нейтральным огнеупорам, поэтому до температуры 1300°C хорошо противостоят как кислотам, так и основным шлакам. При более высокой температуре противостоят воздействию только кислых шлаков; обладают высокой термостойкостью (выдерживают до 160 теплосмен) и хорошо противостоят структурному растрескиванию.

Свойства плавлено-литых изделий следующие: огнеупорность 1850°C , температура начала деформации 1700°C , хорошо противостоят действию расплавленных шлаков различного состава. Истинная пористость низкая — 1—2 %, теплопро-

водность значительная. В процессе службы они легко подвергаются термическому растрескиванию.

Огнеупоры с высоким содержанием Al_2O_3 , особенно плавлено-литые, значительно дороже шамотных, но и свойства их значительно выше. Это обуславливает применение их в наиболее ответственных узлах плавильных и нагревательных печей.

Корундовые огнеупоры применяют в установках внепечного вакуумирования стали, в скользящих затворах ковшей при разливке стали. Плавленые корундовые изделия применяют в подинах нагревательных печей, где они выдерживают давление и удары тяжелых слитков и не взаимодействуют с оксидами железа при температуре службы.

Муллитокремнеземистые и муллитовые плавленые изделия применяют для футеровки сводов основных дуговых сталеплавильных печей, футеровки крышек нагревательных колодцев и сталеразливочных ковшей при разливке специальных сталей.

Применение муллитокремнеземистых огнеупоров для верхних рядов насадок исключает появление расплава на поверхности кирпича, благодаря чему отложения пыли при температуре $1400^\circ C$ остаются рыхлыми и легко удаляются продувкой сжатым воздухом, что увеличивает срок службы насадок до 4 мес.

В последние годы для изготовления футеровок в печестроении в Советском Союзе и за рубежом все в больших масштабах применяются различные виды изделий, изготовленных из керамических волокон. Сырьем для них служат прокаленный каолин, шамот или смесь глинозема и песка. Шихта расплавляется в электрической печи, после чего струя расплава раздувается перегретым паром или сжатым воздухом. В керамических волокнах содержатся 45—52 % Al_2O_3 и 46—53 % SiO_2 и незначительные количества Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO и др. Огнеупорность керамических волокон высокая — $1760^\circ C$, но при температуре, близкой к $1270^\circ C$, происходит кристаллизация и теряется эластичность волокон, поэтому предельная температура службы изделий из керамических волокон принята $1260^\circ C$. Однако, в последнее время найдены различные способы задерживания кристаллизации и, следовательно, повышения температуры их службы.

Нашли применение также изделия, изготовленные на основе муллитокремнеземистого хромосодержащего волокна на глиняной связке. Их свойства следующие: плотность 300—500 kg/m^3 , термостойкость более 50 воздушных тепломен, коэффициент теплопроводности 0,14—0,17 $Вт/(м \cdot K)$ и предельная температура применения 1300—1350 $^\circ C$.

Изделия из керамических волокон обладают рядом свойств, отличающих их от прочих огнеупоров: низкой плотностью, малой теплопроводностью, хорошей эластичностью и устойчивостью против вибрации, высокой термостойкостью, высокой температурой службы, химической стойкостью, пониженной теплоемкостью. Алумосиликатные волокнистые материалы и изделия из них обладают способностью противостоять сильным термическим ударам, имеют хорошую стойкость в окислительной и углеродсодержащей атмосферах. Благодаря низкой плотности изделия из керамического волокна не имеют термического расширения и аккумулируют в 5—20 раз меньше тепла, чем обычные огнеупоры, что особенно ценно для печей с периодическим режимом работы.

К основным недостаткам этих изделий относятся: сравнительно низкая стойкость в высокоскоростных газовых потоках, хрупкость и высокая стоимость из-за сложности изготовления.

Для повышения стойкости волокнистой футеровки при скорости движения газов более 15 м/с ее поверхность защищают слоем кремнеземистого цемента, который образует корку толщиной 0,25—0,5 мм, предохраняющую футеровку от выветривания. Из волокон изготавливают вату и плиты методом вакуум-прессования из гидромассы, в состав которой входит распушенное волокно, глиняная связка и осадитель — раствор полиакриламида (ШВП-350).

Периклазовые (магнезитовые) огнеупорные изделия

Общая характеристика. Периклазовыми называют изделия, содержащие не менее 85 % оксида магния. Главные примеси (CaO , SiO_2), содержащиеся в сырье, связанные в монтичеллит и форстерит, присутствуют в виде твердого раствора и являются для периклаза связующим материалом.

Периклазовые огнеупоры применяют как в виде штучных изделий, так и в виде порошков. Штучные изделия выпускают обожженными, безобжиговыми, армированными безобжиговыми (в металлических коксетах) и плавленоолитыми. Сырьем для производства периклазовых огнеупоров служит горная порода магнезит и морская вода (в тех странах, где мало залежей магнезита — США, Англия, Япония). Из морской воды осаждают $Mg(OH)_2$ путем обработки ее известковым молоком $MgCl_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow Mg(OH)_2 + CaCl_2$.

Природные магнезиты (кристаллические или аморфные) содержат примеси доломита, диабаза, кварца и др. Это вызывает необходимость обогащения магнезита, основанного на различной плотности магнезита и примесей. Известны и методы химического обогащения (например, солянокислый с гидролизом хлористого магния).

Магнезит подвергают обжигу с целью получения оксида магния в виде периклаза $MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2$ — 1210 кДж/кг. В зависимости от температуры обжига получают два вида продукта: при 800—1000 °С — каустический периклаз, а при 1500—1700 °С — спеченный периклаз. Каустический периклаз способен гидратировать (поглощать влагу) с образованием $Mg(OH)_2$. При затворении каустического периклаза водными растворами солей ($MgCl_2$, $CaCl_2$ и др.) он твердеет, в связи с чем его применяют при производстве безобжиговых изделий и огнеупорных бетонов. Каустический периклаз может применяться также в качестве связующего при изготовлении штучных периклазовых изделий. Спеченный периклаз является «намертво» обожженным магнезитом, не гидрирующим при обычной температуре. Однако при температуре 80 °С он гидратируется и при затворении растворами указанных солей схватывается (его называют периклазовым цементом).

Молотый обожженный периклаз увлажняется и вылеживается для гидратации свободного CaO и некоторой гидратации MgO с образованием коллоидного гидроксида магния. Образование $Mg(OH)_2$ сообщает массе необходимую для формования пластичность. Изделия прессуют при давлении более 100 МПа. Одновременно с уплотнением формовочной массы происходит некоторое измельчение крупных зерен. Процесс прессования происходит в две стадии: на первой стадии давление до 20 МПа, а на второй 90—100 МПа. Затем сырец сушат до конечной влажности 0,6—1,0 % и обжигают в туннельных печах при температуре 1600—1750 °С.

В интервале 400—1200 °С цемент из гидроксидов кальция и магния, вследствие их дегидратации, разрушается и изделия теряют прочность. При температуре более 1200 °С изделия спекаются. Усадка изделий незначительная — 1—2 %.

Свойства и служба. Периклазовые огнеупоры имеют высокую огнеупорность — более 1820 °С, но температура начала деформации намного ниже огнеупорности ($T_{н.р} = 1520$ °С). При температуре 1580 °С происходит скалывание образца, т. е. изделие разрушается. При применении форстеритовой связки ($2MgO \cdot SiO_2$) строительная прочность изделия повышается ($T_{н.р} = 1600$ °С).

Термостойкость периклазовых изделий всего 3—5 водяных или 4—9 воздушных теплосмен, что обуславливается различием термических коэффициентов линейного расширения периклаза и силикатной связки. Термостойкость повышается при введении в шихту технического глинозема (5—8 %). При взаимодействии его с периклазом образуется шпинель MgO, Al_2O_3 . Глиноземистая шпинель обладает пониженным по сравнению с периклазом термическим коэффициентом линейного расширения, что способствует повышению термостойкости периклазовых изделий на шпинельной связке. Одновременное повышение плотности и термостойкости достигается введением в шихту вместо технического глинозема металлического алюминия (4 %). Окисление металлического алюминия сопровождается увеличением объема, что приводит к получению более плотных изделий. Шлакоустойчивость по отношению к основным шлакам и окалинам очень высокая.

Периклазовые изделия применяют для футеровки рабочего пространства основных мартеновских печей, подин нагревательных колодцев и методических печей. Для улучшения свариваемости кирпичей используют периклазовый огне-

упорный порошок (иногда с добавкой железной окалины), которым пересыпают каждый ряд кладки. Периклазовый кирпич подвергается растрескиванию и, вследствие насыщения оксидами железа, сплавлению. Повышение срока службы достигается применением водоохлаждаемых холодильников, которые размещают в передней стенке мартеновской печи (в столбиках между рабочими окнами); срок службы кладки при этом 150—250 плавов. Стойкость задней стенки повышается благодаря ежеплавочной заправке огнеупорными порошками.

В отражательных печах цветной металлургии стены также часто выполняют из периклазовых изделий.

В подинах нагревательных печей периклазовые изделия хорошо противостоят действию окалины, но разрушаются от механических ударов слитками.

Известковопериклазовые (доломитовые) огнеупорные изделия

Исходным материалом для изготовления известковопериклазовых изделий является природный минерал — доломит $MgCO_3 \cdot CaCO_3$. При обжиге доломита до температуры 1500—1700 °С получают спеченный доломит $MgO \cdot CaO$, который сохраняет способность гидратировать. С целью снижения температуры обжига и для связи свободной извести при производстве доломита вводят добавки (оксиды железа и магнезиальные силикаты). Образующиеся двухкальцевый ($2CaO \cdot SiO_2$) и трехкальцевый ($3CaO \cdot SiO_2$) силикаты и монтичеллит ($CaO \cdot MgO \cdot SiO_2$) не взаимодействуют с водой и сохраняют постоянство объема.

Изделия прессуют при давлении 50—60 МПа и обжигают до температуры 1450—1580 °С.

Известковопериклазовые стабилизированные (смолодоломитовые) огнеупорные изделия

Сырьем для изготовления являются обожженные доломит и магнезит. В шихту добавляют 4—11 % обезвоженной каменноугольной смолы, которая служит связующим и стабилизирующим веществом. Готовые изделия пропитывают смолой при температуре 300—400 °С, чтобы устранить опасность термического растрескивания при службе в печи.

Полученные изделия имеют повышенную шлакоустойчивость по отношению к основным шлакам, высокую прочность. Их огнеупорность несколько ниже огнеупорности периклазовых изделий. Доломит шире распространен в природе, чем магнезит и производство доломитовых огнеупоров дешевле периклазовых, поэтому их целесообразно применять везде, где они могут заменить периклазовые огнеупоры по своим свойствам. Смолодоломитовые изделия, специфическими особенностями которых являются высокая шлакоустойчивость в восстановительных средах, большая устойчивость к растрескиванию, точность размеров, применяют для футеровки кислородных конвертеров, стен и подин электросталеплавильных печей, основных мартеновских печей и для футеровки ковшей.

Доломитовый порошок в смеси со спеченным периклазом и с добавкой извести и железной руды применяют для заправки подин плавильных печей («Мартенит»).

Тальковые огнеупорные изделия

Тальк — это сравнительно мягкий природный материал (водный силикат магнезия $3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$), легко поддающийся обработке. Тальковые изделия изготавливают путем выпиливания их из породы и без предварительного обжига применяют для футеровки подин нагревательных печей. При нагревании во время службы до 900 °С протекает реакция полной дегидратации талька с образованием кремнезема в виде кристобалита $3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O \rightarrow 3MgO \cdot SiO_2 + SiO_2 + H_2O$. В результате объем изделия практически не изменяется и тальк сохраняет кристаллическое строение.

Огнеупорность талька низкая — 1550 °С, строительная прочность около 1400 °С. Шлакоустойчивость хорошая по отношению к основным и железистым оксидам, поэтому тальковые изделия применяют для подин нагревательных печей, если температура пода не превышает 1350 °С.

Магнезиальносиликатные (форстеритовые) огнеупорные изделия

Форстеритовые огнеупоры содержат 50—60 MgO, 25—40 % SiO₂. Сырьем для производства форстеритовых изделий служат природные минералы: сливинит, дунит, серпентинит и тальк. К минералам добавляют обожженный MgO. В качестве связующего применяют сульфитно-спиртовую барду и каустический магнезит. Формование производится аналогично периклазовым изделиям. Обжиг, в зависимости от исходного сырья, проводят при температурах 1600—1700 °С. Огнеупорной основой форстеритовых изделий является форстерит 2MgO·SiO₂ с содержанием 55 % MgO и около 35 % SiO₂.

Огнеупорность форстеритовых изделий высокая — более 1800 °С, строительная прочность хорошая — $T_{н.р} = 1580 \div 1620$ °С. Изделия устойчивы к железистым шлакам, несколько хуже — к известковым и неустойчивы к глиноземистым и кислым шлакам. Термостойкость 5—14 воздушных теплосмен.

Форстеритовые изделия применяют для кладки верхних рядов насадок мартеновских печей, так как до 1400 °С они не взаимодействуют с пылью шихты, выносимой газами из рабочего пространства. Свод насадки при этом должен быть выполнен из магнезитохромитовых изделий, так как при выполнении его из динаса образующийся железистосиликатный расплав, попадая на форстеритовый кирпич, вызывает его растрескивание и разрушение. Разрыхлению кирпича способствует также переменная окислительно-восстановительная атмосфера в газовых регенераторах. Поэтому рекомендуется применять форстеритовый огнеупор только в воздушных регенеративных насадках (служит 200—300 плавов). Форстеритовые изделия могут быть использованы при строительстве плавильных печей в цветной металлургии, для сводов дуговых печей и для замены периклазовых огнеупоров в плавильных печах с железистыми шлаками.

Магнезиальношпинелидные огнеупорные изделия

К магнезиальношпинелидным изделиям относятся изделия, сырьем для изготовления которых являются хромит FeO·Cr₂O₃ и спеченный периклаз. Огнеупорной основой служит периклаз и хромошпинелиды [алюмохромит FeO(CrAl)₂O₃, магнохромит (MgFe)O·Cr₂O₃ и др.]. Различают, в зависимости от состава, следующие виды огнеупоров:

- периклазохромитовые (>60 % MgO; 5—20 % Cr₂O₃);
- хромитопериклазовые (хромомагнезитовые) (40—60 % MgO; 15—35 % Cr₂O₃); хромитовые (<40 % MgO; >30 % Cr₂O₃); периклазошпинельные (50—85 % MgO; 5—20 % Cr₂O₃);
- периклазошпинельные (>40 % MgO; 5—55 % Al₂O₃);
- шпинельные (25—40 % MgO; 55—70 % Al₂O₃).

Хромитовые изделия изготавливают из шихты, состоящей из 80—90 % руды и 10—12 % магнезитового порошка с добавкой 7—10 % дунита. Магнезитовый порошок и дунит в процессе обжига образуют форстеритовую связку. Для улучшения связки вводят около 0,5 % органических клеящих добавок. Влажность массы 5—6 %. Обжиг изделия производят при температуре 1450—1500 °С.

Хромитовый огнеупор имеет низкую строительную прочность ($T_{н.р} = 1300$ °С), что в значительной степени ограничивает его применение. По химическим свойствам хромитовые огнеупоры относятся к нейтральным. Шлакоустойчивость у них высокая, как по отношению к кислым, так и к основным шлакам. Благодаря этому свойству его используют в качестве прокладки между кислыми и основными огнеупорами. В большей степени хромитовые материалы используют при изготовлении набивных масс, например, для футеровки охлаждаемых поверхностей в плавильных печах и паровых котлах.

Хромитопериклазовые изделия изготавливают из шихты, состоящей из 35—60 % хромита и 30—50 % периклаза с добавкой кремнезема. Технология изготовления аналогична изготовлению периклазовых огнеупоров. Огнеупорность их выше 2000 °С, строительная прочность лучше хромитовых огнеупоров ($T_{н.р} = 1400$ °С). Устойчивы против основных и железистых шлаков.

Производятся также безобжиговые хромитопериклазовые изделия, в шихту которых для связки вводят огнеупорную глину и органическую клеящую до-

бавку (1—3 %). Изделия прессуют под давлением 80—100 МПа и иногда их запрессовывают в железные формы. После сушки изделия применяют для кладки стен и сводов металлургических печей. В процессе службы металлургическая форма сваривается с огнеупором, образуя монолитную кладку.

Применяют хромитопериклазовые огнеупоры для футеровки подин нагревательных колодцев и методических печей, обжиговых печей и для кладки некоторых элементов мартеновских печей.

Периклазохромитовые изделия изготавливают как обычные, так и термостойкие. Обычные изделия отличаются от хромитопериклазовых повышенным содержанием MgO. Технология их изготовления аналогична изготовлению хромитопериклазовых и периклазовых огнеупоров.

Для производства периклазохромитовых изделий с повышенной термостойкостью применяют шихту, содержащую до 65 % периклаза, до 35—40 % хромита и добавляют 4—6 % железной руды. Периклаз вводят в виде мелкой фракции, а хромит — более крупной. В результате обжига из такой шихты получают периклазовые (ПХСУТ) и периклазошпинелидные (ПШСП) сводовые изделия. При производстве последних в шихту вводится 30—70 % тонкомолотой составляющей (хромита и периклаза). Остальная часть периклаза вводится фракцией 2 мм. Температура обжига ПХСУТ и ПШСП 1650—1750 °С. При увеличении давления прессования до 190 МПа и температуры обжига до 1750 °С изделия получают более плотными и механически прочными.

Огнеупорность ПХСУТ и ПШСП более 2000 °С, термостойкость от 2 до 15 теплосмен, хорошо противостоят воздействию основных шлаков.

Огнеупоры ПХСУТ и ПШСП применяют для сводов мартеновских и электросталеплавильных печей. Величина износа и срок службы сводовых изделий зависят от тоннажа печей, технологического процесса, конструкции свода и вида топлива. В процессе службы кирпич со стороны рабочего пространства насыщается жидким шлаком и приобретает зональное строение. Отмечают ясно выраженные три зоны: а) неизменную; б) переходную и в) рабочую.

В рабочей зоне изменяется химический состав за счет насыщения оксидами железа, в переходной наблюдается повышенное количество оксидов кальция и кремния и изменение структуры, заключающееся в увеличении пористости. Колебания температуры в рабочем пространстве вызывают напряжения в кладке, что приводит к образованию трещин, шелушению и скалыванию части изделий. Причиной такого разрушения является различие физических свойств зон кирпича. Возможен и износ оплавлением, что зависит, в основном, от состава шлака и пыли шихты. ПШСП изделия, как более плотные, слабее подвергаются химическому воздействию атмосферы печи, вследствие чего рабочая и переходная зоны у них меньше, а стойкость на 7—15 % выше стойкости сводов из ПХС кирпича.

При службе в электросталеплавильных печах сводовый кирпич подвергается термическим ударам, поэтому более термостойкий ПХСУТ кирпич служит лучше, чем ПШСП. Для футеровки конвертеров вследствие интенсивного воздействия шлака применяют высокоплотный периклазохромит (лучше стоит доломит). Разрушению футеровки способствует также понижение основности шлака при повышенном содержании кремния в чугуне и резкие изменения температуры, связанные с технологическим процессом конвертерного производства. Стойкость футеровки в кислородных конвертерах из ПШС изделий в среднем 150—200 плавов.

Изделия карбидкремниевые и карбидкремний содержащие

Карбидкремниевые изделия содержат карбида свыше 70 %; к карбидкремний-содержащим (шамотнокарбидкремниевым) относят изделия с содержанием 15—70 % SiC. Карбидкремниевые изделия в зависимости от способа изготовления и применяемой связки разделяют на рекристаллизованные карбидкремниевые огнеупоры и карбидкремниевые огнеупоры на различных связках (кремнеземистой, алюмосиликатной, нитрид кремния).

Введение карбида кремния в состав огнеупоров значительно повышает их теплопроводность, термостойкость и шлакоустойчивость. По своему химическому составу они являются слабокислыми, однако практически не подвергаются воз-

действию расплавленных металлов и шлаков. Недостатком является их легкая окисляемость.

Огнеупорность колеблется в пределах 1770—1920 °С, температура начала деформации 1500—1700 °С, карбидкремниевые изделия используют в рекуператорах, для изготовления муфелей при высокотемпературном нагреве металла. Высокая термостойкость и износостойкость позволяют использовать их для футеровки глиссажных труб нагревательных печей, циклонов, вращающихся печей для обжига.

Карбидкремниевые изделия на карбидкремниевой связке используют для футеровки электролизных ванн для электролитического рафинирования алюминия, на связке из нитрида кремния — для цементных толкательных камерных печей с углеродсодержащей средой.

Углеродистые огнеупорные изделия

К углеродистым относятся огнеупоры, состоящие в основном из свободного углерода. Они разделяются на три группы: углеродсодержащие (графитосодержащие), углеродистые неграфитированные (угольные) и углеродистые графитированные.

Наиболее широкое применение среди углеродсодержащих огнеупоров получили изделия, изготовленные из графита, огнеупорной глины и шамота. Изделия формируют пластичным или полусухим прессованием. Углеродистые изделия изготавливают из малозольного кокса или термоантрацита. Связкой при этом является каменноугольный пек или смола. Графитированные изделия получают путем дополнительной термообработки углеродистых изделий в восстановительной среде при температуре 2500 °С.

Углеродистые изделия высокоогнеупорные (2500 °С), термостойкие. По химическому составу они относятся к нейтральным огнеупорам с высокой шлакоустойчивостью, как к кислым, так и к основным шлакам. Для них характерно постоянство объема, высокая тепло- и электропроводность. Главным недостатком является способность к быстрому окислению. Основная область применения углеродистых огнеупоров — это футеровка горна и лещади доменных печей, футеровка ванн электрических печей для плавки цветных металлов и ферросплавов, печей для плавки алюминия, магния и др. Из углеродистых огнеупоров делают электроды для дуговых печей.

Цирконистые огнеупорные изделия

Основным сырьем для изготовления этих изделий являются минерал бадделит и цирконовая руда, содержащая 80—99 % ZrO_2 и SiO_2 . В качестве примесей присутствуют Al_2O_3 , Fe_2O_3 и другие оксиды. Таким образом, огнеупорной основой изделий является диоксид циркония, температура плавления которого 2700 °С.

Цирконистые огнеупоры бывают двух видов: 1) циркониевые, изготовленные на основе диоксида циркония; 2) цирконовые, изготавливаемые из силиката циркония.

При изготовлении циркониевых огнеупоров сначала делают из диоксида циркония с добавкой в него 4—5 % MgO брикеты и обжигают их при температуре 1700 °С (с целью перекристаллизации ZrO_2 в кубическую, более устойчивую форму). После обжига брикеты измельчают, добавляют в качестве связующего 10 % сырой циркониевой массы и стабилизирующую добавку (известь), прессуют под давлением 50 МПа и обжигают при 1700 °С. Порошок из обожженных брикетов может служить для изготовления различных изделий — тиглей, стаканов, а также для производства защитных обмазок.

Основой для изготовления цирконовых огнеупорных изделий является силикат циркония $ZrSiO_4$. Сырье предварительно обжигают при 1600 °С и обрабатывают соляной кислотой для удаления примесей. В подготовленную массу добавляют органический клей; изделия прессуют и обжигают при температуре 1550 °С.

Циркониевые изделия высокотермостойки (>2300 °С), шлакоустойчивы, особенно по отношению к кислым шлакам, имеют хорошую термостойкость (>25 теплосмен). Азот и углерод разрушают циркониевые изделия, образуя

Т а б л и ц а 8-3. Свойства огнеупорных изделий

Огнеупорные изделия	Содержание основных компонентов, %						Огнеупорность, °С	Открытая пористость, %
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	другие компоненты		
Динасовые	94—96	0,7—1,5	1,7—2,5	—	1,5—2,5	—	1710— 1730—	20—24
Шамотные	53—64	32—41	—	—	1,0—2,5	—	1710— 1730—	20—29
Муллитокремнеземистые	10—40	50—90	—	—	1—3,5	TiO ₂ 1—2	1790— 1920	10—30
Периклазовые	2—6	1—3	0,2—2,5	85—92	1—4	—	>1820	18—24
Хромитовые	5—11	22—30	—	14—23	11—16	Cr ₂ O ₃ 30—37	>1820	20—26
Периклазохромитовые	3—6	9—15	<1	55—63	5—10	12—17	>1820	19—24
Графитсодержащие	40—60	30—40	—	—	1,3—2,5	C 15—20	1690— 1730	16—25
Цирконовые	32—35	—	—	—	—	ZrO ₂ 64—67	>1850	16—28

с их основой хрупкие соединения — нитриды и карбиды. Тигли, изготовленные из циркониевых огнеупоров, применяют для плавки платины, иридия и других чистых металлов, а также для получения кварцевого стекла.

Свойства цирконовых огнеупоров несколько ниже, чем у циркониевых. Огнеупорность 1900—2000 °С. Шлакоустойчивость к кислым шлакам и термостойкость хорошие. Устойчивы к расплавам хлоридов, но разрушаются фторидами. Цирконовые изделия применяют для изготовления сталеразливочных стаканов, стопоров, для футеровки соляных ванн для закалки сталей.

Специальные огнеупорные изделия

К специальным огнеупорным изделиям относятся оксидные, карбидные и нитридные огнеупоры. Производство этих изделий затруднено получением чистых исходных материалов и сложностью их спекания. Огнеупорность специальных огнеупоров очень высокая, близка к их температуре плавления. Строительная прочность тоже высокая (для оксидных огнеупоров $T_{в.р} = 1800 \div 2000$ °С). Изделия отличаются малой пористостью, высокой механической прочностью. Из указанных огнеупоров наибольшее распространение получили оксидные с температурой плавления, °С: Al₂O₃ 2050, MgO 2800, ZrO₂ 2700, BeO 2550, ThO₂ 3300. Эти огнеупоры используют в камерах сгорания ядерных и других установок, в ракетной технике.

Карбидные и нитридные огнеупоры производят из карбидов и нитридов тугоплавких металлов с температурами плавления, °С: ZrC 2800, HfC 4160, W₂C 3135, ZrN 3355, TiN 3220 и некоторых других. Применяют эти огнеупоры,

Истинная плотность, г/см ³	Предел прочности при сжатии, МПа	Линейное расширение при температуре 1000 °С, %	Строительная прочность $T_{к.р.}$ °С	Термостойкость	Шлакоустойчивость
2,3—2,4	30—40	1,2—1,4	1550—1650	Низкая при низких и повышенная при высоких температурах	Хорошо противостоит кислым шлакам. Интенсивно разъедается основными шлаками
2,5—2,6	15—35	0,5—0,6	1400	Повышенная	Плохо противостоит кислым и основным шлакам и окалине
2,8—3,6	25—10	0,5—0,6	1400—1700	То же	До 1300 °С хорошо противостоит, выше разъедается основными и кислыми шлаками
3,4—3,6	30—70	1,2—1,3	1450—1600	Низкая	Хорошо противостоит основным шлакам и плохо кислым
3,8—4,1	30—60	0,8—0,9	1350—1450	—	Хорошо противостоит кислым и основным шлакам
3,65—3,95	30—70	0,8—1,0	1550—1600	Средняя	Хорошо противостоит основным шлакам
—	18—30	—	—	Повышенная	Хорошо противостоит основным и кислым шлакам
4,5—4,6	50—100	0,4	1600—1800	Средняя	Высокая по отношению к основным и кислым шлакам

вследствие высокой стоимости их производства, только для специальных и лабораторных нужд.

В табл. 8—3 приведены свойства некоторых огнеупорных изделий.

4. Неформованные огнеупорные материалы

Неформованные огнеупоры не имеют определенной формы, а изготавливаются в виде порошков или пластичных масс. Преимуществом их применения, по сравнению с кладкой из огнеупорных изделий, является монолитность (отсутствие швов), возможность нанесения футеровки без полного охлаждения печи, применение механизмов для выполнения трудоемкой работы возобновления футеровки (проведение холодного и горячего ремонтов торкретированием при помощи торкрет-аппарата).

К неформованным огнеупорам относятся огнеупорные бетоны, пластичные набивные массы, огнеупорные набивные массы, торкрет-массы, защитные гарниссажи.

Огнеупорные бетоны

Огнеупорные бетоны, как и обычные строительные бетоны, состоят из вяжущего вещества и заполнителя. Отличаются от обычных бетонов тем, что образуют прочную камнеподобную структуру, которая не разрушается при высоких температурах.

Т а б л и ц а 8-4. Свойства и области применения некоторых огнеупорных бетонов

Бетон	Заполнитель	Содержание, %				
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO
Шамотный	Шамот	40—45	35—45	—	—	—
Муллитокремнеземистый (высокоглиноземистый)	Муллитокремнеземистый шамот	30—40	55—65	—	—	—
Муллитокремнеземистый (высокоглиноземистый)	Глинозем	<10	85—95	—	—	—
Огнеупорный теплоизоляционный	Пористый шамот	40—50	40—50	—	—	—
Теплоизоляционный	Вермикулит, минеральные волокна	—	—	—	—	—

Вяжущие вещества разделяют на четыре группы: 1) гидравлические; 2) коагуляционные; 3) химические; 4) органические.

Гидравлические вяжущие:

а) портланд-цемент. Затвердевает при увлажнении. Применяют при изготовлении жаростойких бетонов для службы при температуре не выше 900 °С. Заполнителями в этом случае являются шамот, шлаки и т. п. При кремнеземистом заполнителе получают огнеупорный бетон;

б) глиноземистый цемент содержит алюминаты кальция и глинозем. Высокоглиноземистый цемент содержит 70—75 % Al₂O₃ и имеет огнеупорность выше 1800 °С;

в) периклазовый цемент получают тонким помолом периклаза. Твердеет при температуре 80 °С, а при добавке растворов солей MgCl₂·MgSO₄·7H₂O затвердевает при обычной температуре.

Коагуляционные вяжущие — жидкое стекло (водный раствор силиката натрия Na₂O·nSiO₂). Затвердевание происходит при температуре цеха.

Химические вяжущие — фосфатные связки. Твердение обусловлено химическим взаимодействием связующего с оксидами огнеупорных заполнителей.

Органические вяжущие — бакелит, смолы, пек и т. п. Эти вещества называются терморезактивными органическими соединениями, так как они при повышении температуры твердеют и связывают зерна заполнителя.

Для работы при температуре 900—1300 °С применяют обычный глиноземистый цемент и портланд-цемент с измельченными добавками (динас, шамот). При температуре 600—800 °С добавки реагируют с цементом, образуя безводные силикаты или алюминаты кальция. Для бетонов, работающих при температуре 1300—1500 °С, заполнителем служит хромит или хромитопериклаз. Для службы при температуре 1400—1700 °С применяют бетон на муллитокремнеземистом цементе с заполнителем из муллитокремнеземистых или хромитопериклазовых огнеупоров. При изготовлении огнеупорных бетонов на глиноземистом цементе, в интервале температур 500—1100 °С наблюдается потеря механической прочности. При нагреве выше 1100 °С начинается спекание и прочность вновь увеличивается. В процессе затвердевания бетона выделяется много тепла, поэтому для снижения его температуры и предотвращения испарения воды, в первые сутки бетон следует поливать водой.

Огнеупорность, °С	Максимальная температура службы, °С	Кажущаяся плотность, г/см ³	Теплопроводность при 400 °С, Вт/(м·К)	Основные области применения
1380—1400	1000—1300	1,6—1,8	0,5—1,0	Борова печей, крышки люков и заслонок
1770—1820	1600	1,9—2,3	0,8—1,2	Участки топок паровых котлов, крышки нагревательных колодцев, горелочные камни
<1820	1600—1700	2,6—2,8	1,7—1,8	Ответственные узлы нагревательных и плавильных печей, подвергающиеся воздействию высоких температур
1350—1460	1200—1400	1,0—1,3	0,3—0,4	Теплоизоляционный слой стен печи
—	600—1000	0,4—0,8	0,2—0,3	Теплоизоляционный слой стен

Технология изготовления огнеупорных бетонов следующая:

- 1) смешение цемента, заполнителя и воды (приготовление сырого бетона);
- 2) заполнение сырым бетоном деревянных форм;
- 3) выдержка для завершения процесса схватывания и затвердевания в течение 5—14 сут.;
- 4) сушка при температуре 110 °С;
- 5) обжиг при температуре 1300—1500 °С.

Сушка и обжиг возможны прямо в печи при сооружении из бетона крупных элементов, узлов или целиком печей. Нагрев при обжиге должен вестись постепенно, так как при этом происходят расширение, а затем усадка бетона, что может вызвать его растрескивание. Огнеупорность бетонов зависит от применяемого заполнителя.

Возможно изготовление изоляционного бетона, имеющего низкую теплопроводность. В качестве заполнителя для таких бетонов применяют диатомит или легковесные изделия из шамота, динаса и др.

В табл. 8-4 приведены свойства некоторых огнеупорных бетонов и области их применения.

Пластичные набивные массы

Огнеупорные пластичные массы изготавливают из различных огнеупорных материалов, измельченных до определенной зернистости и перемешанных с пластичными огнеупорными глинами или другими связками. Основным преимуществом их применения является увеличение срока службы футеровки. Футеровка, изготовленная из пластичных набивных масс, обладает более высокой устойчивостью к термическому расширению, имеет высокую герметичность (так как она монолитна) и термостойкость.

Пластичные набивные массы изготавливают из шамота, муллита, кремнеземистого огнеупора, хромита, углеродистых соединений и других огнеупорных материалов. В зависимости от применяемой связки набивные массы твердеют при высоких температурах или на воздухе при температуре цеха.

При выполнении футеровки из пластичных набивных масс последнюю наносят ровным слоем пневматическим или ручным тромбованием, после чего фу-

геровку сушат и затем постепенно доводят до рабочей температуры. Из пластичных набивных масс можно выполнять футеровку топок котлов, нагревательных печей, стены и подины плавильных печей.

Огнеупорные набивные массы

Они отличаются от пластичных набивных масс меньшим содержанием связующих веществ. Требования, предъявляемые к огнеупорным набивным массам, более высокие, особенно важна их способность противостоять разрушающему действию расплавленных металлов и шлаков, высокая механическая прочность и постоянство объема. Огнеупорные набивные массы наносятся под большим давлением с помощью пневматических трамбовок послойной или непрерывной набивкой с подачей массы малыми порциями. Плотность набивки должна быть высокой. Основным сырьем для изготовления масс служат материалы высокой чистоты — спеченый периклаз, спеченый известковопериклаз, хромит, плавильный глинозем, графит или кокс и др. Зерновой состав должен обеспечивать хорошую удобоукладываемость набивной массы. В качестве связующих веществ применяют: сернокислый и хлористый магний, различные фосфаты, жидкое стекло, каменноугольный пек и обезвоженную смолу. Последние в процессе службы образуют углеродистую связку, повышающую химическую стойкость набивных масс. В известковопериклазовых (доломитовых) набивных массах эти вещества препятствуют гидратации доломита. При повышенных требованиях к огнеупорности и химической стойкости набивных масс для их изготовления используют оксид циркония.

Огнеупорные набивные массы используют для подин сталеплавильных и индукционных печей, подин печей для выплавки цветных металлов, для набивки желобов доменных печей для выпуска чугуна и в ряде других мест с тяжелыми условиями службы, а именно, где футеровка непосредственно контактирует с расплавленным металлом и там, где требуется монолитность футеровки.

Торкрет-массы

Торкретирование при низких температурах сокращает сроки строительства, так как не требует изготовления опалубки, делает возможным укладку футеровки в зонах, расположенных на большой высоте, без специальных лесов, обеспечивает, как и применение набивных масс, монолитность футеровки.

Торкретирование при проведении горячего ремонта сокращает сроки работ, облегчает физический труд, делает возможным ремонт футеровки в трудно доступных местах кладки.

Торкрет-массы являются огнеупорными материалами типа бетонов. Исходным сырьем может служить кремнезем, шамот, хромит, магнезит, доломит и др. Зерновой состав подбирают, исходя из применяемой торкрет-машины. Удобоукладываемость массы достигается добавкой огнеупорной глины, влаги, связующих веществ и спекающих добавок, свойства которых зависят от назначения торкрет-масс (для холодного или горячего ремонта). Торкретирование осуществляют несколькими способами: полусухим, пульповым и пламенным.

При полусухом торкретировании влажность массы составляет 8—15%. При пульповом способе влажность 20—30%, масса имеет вид водной суспензии (пульпы). При пламенном торкретировании сухой материал наносят с помощью факела горелки, в который подается торкрет-порошок.

Торкрет-покрытия эффективны только в том случае, если они прочно держатся на рабочей поверхности футеровки и имеют хорошую устойчивость к воздействию шлака и металла.

При нанесении торкрет-массы между ней и футеровкой происходит сначала физическое, а затем и химическое взаимодействие. Физическое взаимодействие (адгезия) определяется, в основном, свойствами пластификатора и связки, входящих в состав массы, и состоянием поверхности футеровки.

Адгезия покрытия и футеровки осуществляется в основном за счет жидкости, содержащейся в торкрет-массе, и обуславливается действием капиллярных сил. В дальнейшем между покрытием и футеровкой возникает химическое взаимодействие, обеспечивающее более прочные связи.

Торкретирование применяют для футеровки агрегатов в холодном состоянии (например, для сталеразливочных ковшей) и чаще при производстве горячих ремонтов (шлаковый пояс мартеновских печей, передние и задние стены, стале-выпускное отверстие, желоба; стены и желоба электросталеплавильных печей; стены кислородных конвертеров; печей для выплавки меди и др.).

Примерный состав торкрет-порошка для торкретирования мартеновских печей, %: металлургический магнезит 60; хромит 40; глина огнеупорная, сверх 100 % — 5; тринатрийфосфат 5—10. Состав торкрет-порошков для торкретирования конвертеров, %: металлургический магнезит 70—80; шлак конвертерный 10—20; шлак доменный 10—20. Шлаки иногда заменяют угольным коксиком.

Защитные гарниссажи

Защитные гарниссажи широко применяют в плавильных печах цветной металлургии, где они являются эффективным средством защиты, а иногда и замены огнеупорной кладки. Защитные гарниссажи образуются на рабочей поверхности печей из спекающихся или расплавленных материалов и продуктов переработки при условии интенсивного отвода тепла через стенки. Так, например, в шахтных печах образование защитного гарниссажа обусловлено усиленным водяным охлаждением стен. В электропечах гарниссаж удерживается благодаря удалению электродов от стен печи и охлаждения стен водой или воздухом. Защитные гарниссажи на футеровке конвертеров создаются из продутой без флюсов охлажденной штейновой массы, насыщенной магнетитом. Однако, получение устойчивого гарниссажа в конвертере возможно только при удалении фурм от стенок.

Огнеупорные растворы и обмазки

Огнеупорные растворы применяют для заполнения швов между отдельными огнеупорными изделиями при выполнении кладки. По способности к затвердеванию их делят на твердеющие при высоких температурах, воздушнотвердеющие и гидравлически твердеющие. Растворы, твердеющие при высоких температурах, изготавливают на керамической связке. Их химический состав должен быть близок к химическому составу огнеупоров, из которых выполняют кладку.

Воздушнотвердеющие растворы приобретают прочность при температуре цеха, для этого при их изготовлении применяют связующие вещества, твердеющие в период сушки. Растворы изготавливают из тонкоизмельченного огнеупорного порошка (отощителя), пластичной огнеупорной глины с добавкой в качестве связующего жидкого стекла или фосфата алюминия. Воздушнотвердеющие растворы применяют там, где требуется высокопрочная кладка и устойчивость к вибрации.

В гидравлически твердеющих огнеупорных растворах связующими веществами служат цементы, схватывающиеся при смешении с водой. Эти растворы применяют в местах, где футеровка контактирует с водой при низких температурах.

Назначение растворов — создание монолитности кладки, заполнение всех пустот, которые могут образоваться при отклонении размеров изделий от стандартных.

Швы являются наиболее слабым местом кладки, поэтому растворы должны отвечать определенным требованиям. Они должны иметь огнеупорность и химическую стойкость, близкие к этим свойствам материала кладки. Необходима небольшая усадка, чтобы при нагреве не образовывались трещины, высокая механическая прочность.

В зависимости от требований, предъявляемых к кладке, допустимая толщина шва колеблется от долей миллиметра до 3—4 мм. Для тонких швов (до 1 мм) применяют жидкие растворы и кладку ведут особо тщательно. При толщине швов до 2 мм применяют полугустые растворы. При швах более 2 мм используют густые растворы.

Для приготовления жидкого раствора на 1 м³ сухой смеси требуется 600 л воды, полугустого 500 л, густого 400 л. Смесь составляют из порошка, размельченного до зерна, размер которого должен быть в 2—3 раза меньше толщины шва кладки, и из огнеупорной глины. Так динасовый раствор готовят из 90 % динасового порошка и 10 % огнеупорной глины, шамотный — из 80 % шамотного порошка и 20 % огнеупорной глины и т. п.

Для приготовления огнеупорных растворов могут быть использованы специально изготовленные порошки «мертели», которые при затворении водой образуют растворы нужной консистенции. Периклазовую и частично хромитопериклазовую кладку ведут насухо с уплотнением швов мелким сухим порошком из того же материала, что и сама кладка. При кладке насухо требования к соблюдению стандартных размеров кирпичей повышаются.

Кроме огнеупорных растворов применяют огнеупорные обмазки. В металлургической промышленности получили распространение два типа обмазок: уплотнительные и защитные. Уплотнительные обмазки наносят на внешнюю поверхность кладки с целью повышения ее газоплотности. Требования, предъявляемые к уплотнительным обмазкам, следующие: плотность более высокая, чем плотность кладки; способность затвердевать при низких температурах; плотное скрепление с кладкой.

В состав уплотнительных обмазок входят, %: кварцевый песок (или диносовый порошок) 60—70, огнеупорная глина 5—10, молотый асбест или графит 10—15, жидкое стекло 10—15. Обмазку наносят тонким слоем (2—4 мм) на хорошо очищенную поверхность кладки, смоченную жидким стеклом, сульфитным щелоком или другим клеящим веществом, входящим в состав обмазки.

Защитные обмазки наносят на рабочую поверхность футеровки с целью предохранения ее от химического воздействия шлака, металла или газов, повышения огнеупорности футеровки, защиты от механического истирания и пр. Обмазка должна обладать высокой огнеупорностью, шлакоустойчивостью, механической прочностью, плотностью и хорошей сцепляемостью с кладкой. Защитные обмазки изготавливают из огнеупорных порошков (шамота, кварцита, хромита, оксида циркония и т. п.) с добавлением связующих веществ и воды. В качестве связующих веществ применяют огнеупорную глину (3—13 %), жидкое стекло (2—7 %) или сульфитный щелок (4—8 %). Защитные обмазки наносят на очищенную рабочую поверхность футеровки слоем толщиной 2—3 мм, после чего печь нагревают и доводят до рабочей температуры. Возможно использование защитных обмазок при горячих ремонтах печей для ремонта небольших участков изношенной кладки.

Глава 9

ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Назначение теплоизоляционных материалов — снизить тепловые потери и, таким образом, обеспечить экономию топлива или электроэнергии, сократить время на разогрев печи после ремонта, следовательно, повысить производительность и снизить стоимость единицы продукции.

Теплоизоляционные материалы делят по ряду признаков на следующие группы:

по огнеупорности — на огнеупорные, выдерживающие рабочую температуру 800 °С, и неогнеупорные, которые могут быть использованы только при температурах ниже 800 °С;

по происхождению — на естественные и искусственные;

по форме и способу применения — теплоизоляционные материалы выполняются в виде изделий (кирпичей, листов и т. д.) или в виде неформованных материалов (засыпки, ваты, волокон и др.).

Воздух, как известно, обладает низкой теплопроводностью, поэтому материалам и изделиям, имеющим большое количество пор, заполненных воздухом, свойственны высокие теплоизолирующие свойства. Для теплоизоляционных материалов характерны низкие механическая прочность и шлакоустойчивость. В связи с этим теплоизолирующий слой кладки не следует подвергать нагрузке или допускать контакта его с жидкими средами (металлом или шлаком). Поэтому, учитывая сравнительно низкие свойства теплоизолирующих материалов, тепловую изоляцию обычно выполняют наружным слоем футеровки. Исключе-

нием являются печи периодического действия, где с целью уменьшения потерь на аккумуляцию тепла кладкой, стены и свод печей (или съемный керамический колпак) выполняют целиком из изоляционного материала. Внутренний слой выполняют из теплоизоляционного материала, обладающего большей огнеупорностью и механической прочностью, наружный — из материала, имеющего меньшую огнеупорность, но и значительно меньшую теплопроводность. В этом случае, благодаря низкой плотности теплоизоляционного материала уменьшается масса футеровки и количество тепла, затраченное на ее нагрев, снижается.

1. Естественные теплоизоляционные материалы

К огнеупорным естественным теплоизоляционным материалам относятся: диатомит, инфузорная земля, трепел и вермикулит. Первые три материала имеют состав $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

Диатомит — продукт разложения водорослей, имеет рыхлую землистую структуру. Применяют в виде порошка или изделий, изготовленных на глинистой связке: плотность изделий 500, 600 и 700 кг/м³, коэффициент теплопроводности соответственно равен 0,18, 0,21, 0,27 Вт/(м·К). Коэффициент теплопроводности засыпки из диатомита колеблется в пределах 0,12—0,16 Вт/(м·К). Предельная температура применения диатомитовых изделий 1000 °С, засыпки 900 °С.

Инфузорная земля является продуктом разложения животных организмов; применяют чаще в виде порошка.

Трепел — продукт выветривания горных пород, пористый материал с низкой теплопроводностью; применяют в виде порошка или изделий. По свойствам изделия из трепела близки к диатомитовым.

Вермикулит — это разновидность слюды, имеющая способность при нагреве значительно увеличивать свой объем. Используют вермикулит в виде засыпки или в виде плит. Применяется до температуры 700—900 °С. В обожженном виде носит название — зонолит. Предельная температура применения зонолита 1000—1100 °С. Коэффициент теплопроводности вермикулита и зонолита 0,1 Вт/(м·К).

К неогнеупорным изоляционным материалам относится асбест. Асбест является водным силикатом магния состава $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, имеет волокнистое строение, пористый. Применяют в виде крошки для засыпки или в виде изделий — шнура, картона, плит, ткани и ваты. При изготовлении картона и плит в качестве связующего добавляют 15—20 % огнеупорной глины. Коэффициент теплопроводности изделий из асбеста находится в пределах 0,13—0,17 Вт/(м·К). Асбестовую крошку применяют как основную составную часть теплоизоляционных обмазок. Предельная температура применения асбеста 500 °С. При более высокой температуре асбест теряет гидратную влагу, разрушается и, рассыпаясь в порошок, уплотняется, теряя свою пористость и теплоизоляционные свойства.

2. Искусственные теплоизоляционные материалы

К искусственным теплоизоляционным материалам относятся пористые легко-весные огнеупоры и изделия из различных волокон. Для получения легко-весных огнеупоров с высоким процентом равномерно распределенной пористости применяют три различных способа: 1) выгорающих добавок; 2) пеноспособ; 3) химический.

Легковесные изделия могут изготавливаться из шамота, динаса, диатомита, высокоглиноземистого сырья и т. п. Способ выгорающих добавок заключается в том, что в шихту, состоящую из огнеупорных порошка (15—20 %) и глины (40—50 %), вводят древесные опилки, древесный уголь или антрацит (30—35 %). Массу перемешивают на бегунах, увлажняют (до 25—40 %), формуют, сушат и обжигают. При изготовлении динасовых и корундовых легко-весов содержание огнеупорной глины в составе шихты снижается и для связи вводят органические вещества.

Плотность легвесных изделий колеблется в зависимости от исходного сырья и от пористости изделия в пределах от 800 до 1300 кг/м³. Коэффициент теплопроводности шамота и дианаса-легковеса 0,4—0,5 Вт/(м·К), муллитокремнеземистого легковеса 0,71 Вт/(м·К). Предельная температура применения шамота-легковеса 1200 °С, муллитокремнеземистого легковеса 1400 °С. Предел прочности при сжатии шамота-легковеса 1—3 МПа.

При пеноспособе производства изоляционных изделий готовят шликер, состоящий из 90 % мелкоразмолотого огнеупора (шамота и др.) и 10 % огнеупорной глины, и добавляют к нему пенообразующую эмульсию из канифольного мыла и столярного клея. Массу перемешивают, добавляют квасцы для сохранения пены, разливают массу по формам, дают затвердеть, после чего изделия сушат и обжигают. Изделия, полученные таким способом, называют пеноизделиями. Пористость этих изделий больше 75—85 % и равномернее распределена, чем при изготовлении изделий с применением выгорающих добавок. Плотность изменяется от 300 до 1000 кг/м³ в зависимости от огнеупорной основы и количества введенной в шликер пенообразующей эмульсии. Соответственно изменяется и коэффициент теплопроводности изделий от 0,15 до 1,6 Вт/(м·К) — для муллитокремнеземистых пеноизделий. Предельная температура применения пеношамота 900 °С. Пеноизделия обладают очень низкой механической прочностью, поэтому для обеспечения прочности тонкой футеровки высоких стен печи устанавливают в стенах металлическую арматуру или (если позволяет толщина стен) закладывают кирпичи повышенной прочности. Обычно пеноизделия применяют в качестве второго (наружного) теплоизоляционного слоя.

При химическом методе изготовления шамотных легковесных огнеупоров в шихту вводят около 3 % доломита и 5—6 % гипса. Добавка слабой серной кислоты способствует выделению из доломита углекислоты, которая вспучивает массу, а добавленный гипс удерживает полученную пену от оседания. Разлитый по формам сырец сушат и обжигают. Изделия по изолирующим свойствам близки к пеноизделиям. Химический способ применяют на заводах сравнительно редко, так как использование серной кислоты требует соблюдения особых мер охраны труда.

Волокнистые изоляционные материалы получили распространение сравнительно недавно. Их изготавливают на основе природных или искусственных материалов. Волокнистую теплоизоляцию применяют в виде ваты, плит, картона, войлока и др. Размеры волокон зависят от исходного сырья и технологии изготовления. Диаметр волокон около 2—20 мкм, длина 15—150 мм. При изготовлении изделий волокна пропитывают связующим раствором.

Преимущества волокнистой изоляции по сравнению с легковесными изделиями следующие: низкая плотность, малая теплопроводность, хорошая эластичность и устойчивость против вибрации, высокая термостойкость, химическая стойкость, пониженная теплоемкость.

Волокнистую теплоизоляцию изготавливают из минерального волокна, керамического волокна и стекловолокна.

Минеральные волокна. Основным сырьем для производства минерального волокна являются отвальные шлаки рудоплавильных печей черной и цветной металлургии или горные породы типа андезит и базальт. Расплавленные шлаки (или породу) продувают струей воздуха или пара и получают тонкое волокно (2—20 мкм) длиной 10—110 мм. Основными химическими составляющими минеральных волокон являются: SiO₂ (40—45 %), CaO (30—40 %), Al₂O₃ (10—20 %), Fe₂O₃ (2—5 %) и др. Максимальная температура службы 600 °С. Коэффициент теплопроводности менее 0,05 Вт/(м·К).

Керамические волокна. Как было сказано выше, изделия из керамического волокна широко применяют для изготовления футеровок печей. Наряду с этим они являются и высококачественной тепловой изоляцией. Промышленностью выпускаются муллитокремнеземистые волокнистые изделия в виде войлока, рулонного фетра, картона, плит: МКС-80-22 (80 % Al₂O₃, 22 % P₂O₅), МКРС-60-24, МКРР-130 (плотность 130 кг/м³), МКРВ-200, МКРП-340, МКРК-500. Предельная температура службы 1150 °С; муллитокремнеземистые хромсодержащие МКРПХ-450 имеют предельную температуру службы 1300 °С. Высокая температура службы и низкая теплопроводность ($\lambda = 0,05 \div$

$\pm 0,25 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$] позволяют использовать их в конструкциях, где к их стойкости предъявляются особо повышенные требования (изоляция глиссажных труб методических печей, печных роликов и т. п.).

Стекловолокна. Теплоизоляционные покрытия из стекловолокна изготавливают различными способами:

- 1) расплавленное стекло наматывают в виде лент;
- 2) размягчают конец стеклянного стержня и вытягивают его, наматывая в виде труб;
- 3) расплавленное стекло, вытекающее из тигля, продувают воздухом и полученную из волокон ленту сматывают в рулон.

Теплопроводность покрытий из стекловолокна $0,02—0,05 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Основными составляющими стекловолокна являются кремнезем и оксид кальция. Предельная температура службы 300°C .

В табл. 9—1 приведены некоторые данные по сравнительной характеристике теплоизоляционных изделий.

Таблица 9-1. Свойства теплоизоляционных изделий

Виды изделий	Предельная температура службы, $^\circ\text{C}$	Предел прочности на сжатие, кПа	Пористость открытая, %	Кажущаяся плотность, г/см^3	Теплопроводность при 350°C , $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$
Динасовые легковесные	1500	5400	53	1,1	0,42
Шамотные легковесные	1200	1000	77	0,58	0,2
Диатомитовые легковесные	1000	700	82	0,48	0,15
Муллитокремнеземистые легковесные	1400	8000—12000	75—80	1,35—1,6	0,5—0,7
Шамотные пеноизделия	900	7500—8500	—	0,3—1,0	0,15—0,2
Асбестовые покрытия	500	—	—	0,25—0,35	$<0,17$
Минеральные волокнистые покрытия	600	—	—	$<0,1$	$<0,05$
Покрытия из стекловолокна	300	—	—	0,06—0,12	0,02—0,05
Покрытия из керамического волокна	1260	—	—	2,56	0,05—0,25

Глава 10

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТАЛЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ПЕЧЕЙ

При сооружении печей, кроме огнеупорных и теплоизоляционных материалов, применяют сталь и чугун (для изготовления каркасов и печного оборудования), строительный кирпич, бутовый камень, щебень, гравий и песок.

1. Строительные материалы

Строительный кирпич (обыкновенный красный) изготавливают из смеси не огнеупорных красных глин и песка. Кирпич формуют методом пластичного формования (при влажности массы $18—25\%$) или полусухим прессованием

(при влажности 8—12 %). Объемная плотность колеблется в пределах 1700—1900 кг/м³. В связи с тем, что строительный кирпич применяют и для сооружений вне цеха его проверяют на прочность при замораживании. Насыщенный водой он выдерживает без разрушения 15 циклов замораживания при —15 °С с последующим оттаиванием.

Служба красного кирпича возможна только при температурах до 700 °С. Применяют строительный кирпич для кладки дымоходов низкотемпературных печей, строительства сушил и дымовых труб.

Б у т о в ы й к а м е н ь — это природный материал, представляющий собой куски гранита, песчаника или известняка, крупностью 0,02—0,1 м³. Используют как материал для кладки фундамента или в качестве заполнителя при изготовлении бутобетона. Песчаниковый камень более устойчив к действию температуры и может применяться до 700 °С, известковый камень только до 250 °С.

Щ е б е н ь получают путем дробления горных пород до кусков размером 10—80 мм. Применяют щебень, как заполнитель в бетонных смесях.

Г р а в и й — природный камень, который по происхождению делится на горный, речной и морской, а по крупности на особо мелкий (5—10 мм), мелкий (5—20 мм), средний (20—40 мм) и крупный (40—150 мм). Применяют, как и щебень, в качестве заполнителя в бетонных смесях.

П е с о к — продукт разрушения горных пород. Размер зерен песка от 0,15 до 5 мм, форма зерен угловатая, поверхность неровная. Речные и морские пески имеют округлую форму и ровную поверхность, что ухудшает их способность к сцеплению с вяжущей массой. Песок употребляют, как заполнитель при изготовлении бетона, строительных раствора и кирпича.

Строительные растворы предназначены для заполнения швов при кладке кирпичей, т. е. для обеспечения монолитности кладки, выполненной из штучных изделий (кирпичей, блоков). При составлении строительных растворов используют вяжущие материалы (известь, цемент) и заполнители, смесь которых при затворении водой становится пластичной. При кладке раствор твердеет и прочно связывает кирпичи между собой. По виду заполнителя строительные растворы разделяют на тяжелые и легкие. В первых заполнителем служат пески, а во вторых — легкие материалы типа шлаков диатомита и др. В практике часто применяют сложные растворы, составленные из смесей вяжущих материалов с добавлением для увеличения плотности швов, глины (цементно-известковый, цементно-известково-глиняный раствор и др.).

2. Металлы, применяемые в печестроении

При строительстве печей широко используют черные металлы (сталь и чугун), как обычные, так и жаропрочные и жаростойкие. Жаропрочными называют металлы, работающие в нагруженном состоянии при высоких температурах в течение длительного времени и обладающие при этом достаточной окалинстойкостью. Жаростойкими называют металлы, обладающие стойкостью против химического разрушения поверхности газовыми средами при температуре выше 550 °С и работающие в ненагруженном или слабонагруженном состоянии.

Требуемые свойства металла достигаются введением в его состав легирующих элементов, которые можно разделить на две группы: 1) элементы, окисляющиеся легче железа: хром, кремний, алюминий, марганец, титан, ниобий, цирконий, бор; 2) элементы, окисляющиеся труднее железа: никель, медь, кобальт. Элементы первой группы, окисляясь, образуют на поверхности металла плотно прилегающую к нему пленку окалины, которая защищает металл от дальнейшего окисления. Высокая жаростойкость достигается легированием одновременно несколькими элементами.

Агрессивными по отношению к стали являются также составляющие атмосферы, печи, такие как диоксид серы SO₂, водяной пар, пентаксид ванадия V₂O₅.

Жаропрочные стали обычно получают, повышая в них содержание хрома и никеля и легируя их дополнительно вольфрамом, ванадием, молибденом, титаном и другими элементами. При работе в атмосфере сернистых газов не рекомен-

дуются применять сплавы с повышенным содержанием никеля. В этом случае коррозионная стойкость повышается при легировании стали хромом. Газовая коррозия стали резко возрастает при воздействии на нее продуктов сгорания топлива, содержащих ванадий, что имеет место при работе с сернистыми мазутами.

В табл. 10-1 приведены рекомендации по применению сталей для печных механизмов и деталей, работающих при высоких температурах.

Т а б л и ц а 10-1. Рекомендации по применению жаропрочных и жаростойких сталей в конструкциях печей

Жаростой- кость, °С	Марка стали	Применение и рабочая температура
800	X14Г14Н3Т, X18Н10Т, 2X18Н9	Детали печей при нагрузке, конвейерные ленты, штанги толкателей, опорные элементы для кладки, детали печных роликов, внутренние кожухи термических печей
1050	X25Т	Детали печей при незначительных нагрузках до 1000 °С, радиантные трубы, металлические рекуператоры, детали горелок
1100	15X25Н19С2Л	Детали печей
1150	X28, X28АН	Детали печей до 1050 °С, рамы, поддоны, опоры подовых труб
1200	X25Н20С2, 15X25Н19С2Л	Детали печных роликов до 1150 °С

Из жаростойких чугунов широко применяется чугун, легированный кремнием (силал) — марка ЖЧС-5,5. Из него отливают блочные рекуператоры. Они служат до температуры стенки 800 °С. Применяются также хромистые чугуны марок ЖЧХ-1,5, ЖЧХ-2,5 для дроссельных клапанов, работающих в среде горячего газа и воздуха при температуре 600—650 °С.

Чугуны, легированные алюминием, с пластинчатым или шаровым графитом марок ЖЧЮ-22, ЖЧЮШ-22 могут применяться до температур 1000—1100 °С.

Глава 11

СТРОИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПЕЧЕЙ

1. Фундамент

Фундаментом называется та часть сооружения, которая служит для передачи силы тяжести всего сооружения на грунт.

Грунты подразделяются на: скальные, крупноблочные, песчаные и глинистые. Фундаменты заглубляют до грунта, прочность которого достаточна для того, чтобы выдержать давление от сооружения. Если грунт слабый, то его предварительно искусственно упрочняют (трамбованием, забиванием деревянных или железобетонных столбов, нагнетанием цементного раствора и т. п.). Нагрузка, производимая подошвой фундамента на грунт, не должна превышать 250 кПа.

Фундаменты печей и дымовых труб выполняют бутовыми, бутобетонными, бетонными и железобетонными.

По конструкции фундаменты печей можно разделить на следующие группы: сплошные, расположенные под всем сооружением;

ленточные, расположенные под сооружениями со сплошными несущими стенами;

одиочные, в виде отдельных столбов.

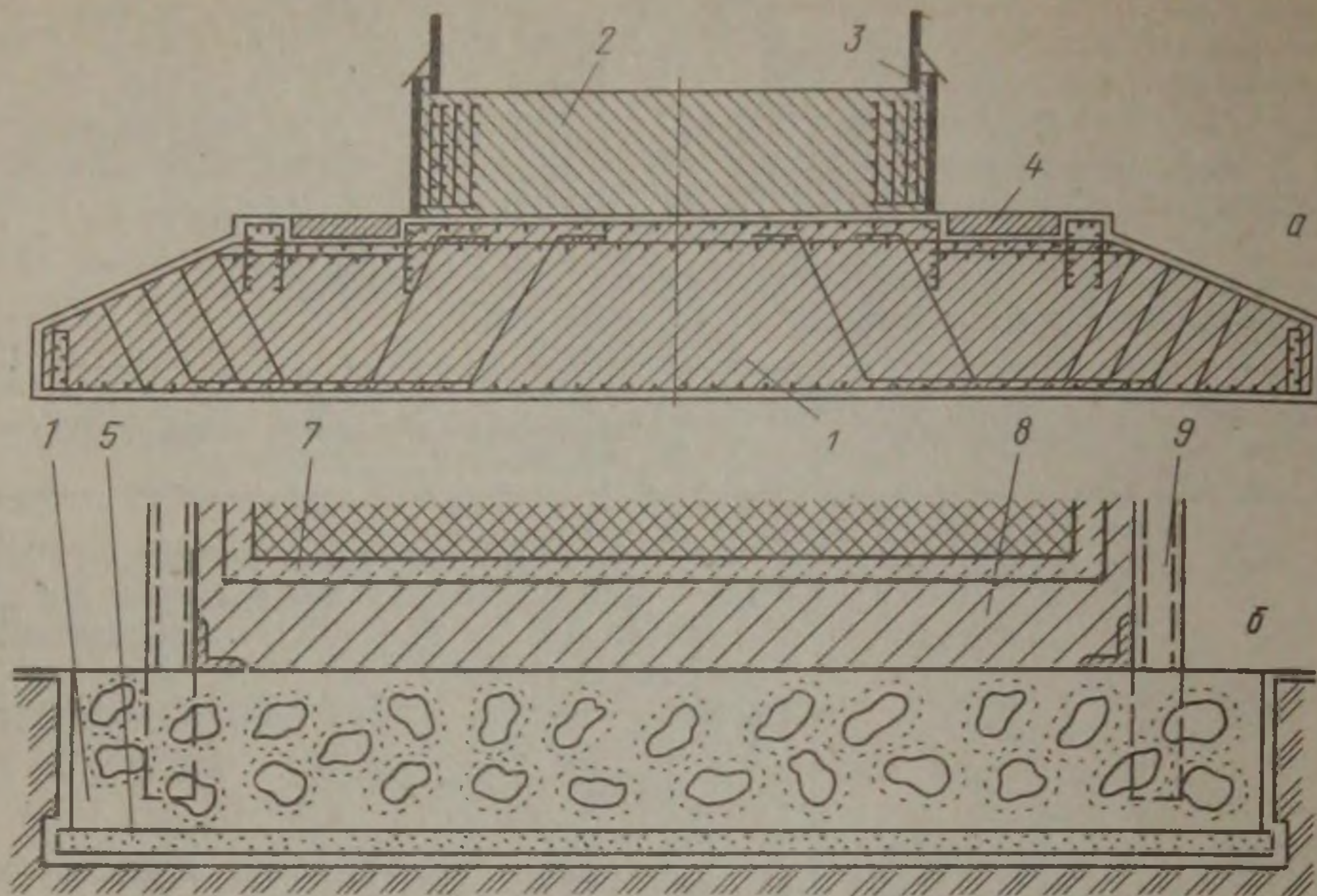


Рис. 11-1. Фундамент под доменную *a* и камерную *б* печи:

1 — плита фундамента; 2 — печь из огнеупорного бетона; 3 — кожух печи; 4 — ростверк под колонны; 5 — щебеночная подготовка; 6 — огнеупорная кладка; 7 — изоляционная кладка; 8 — кладка из глиняного кирпича; 9 — каркас печи

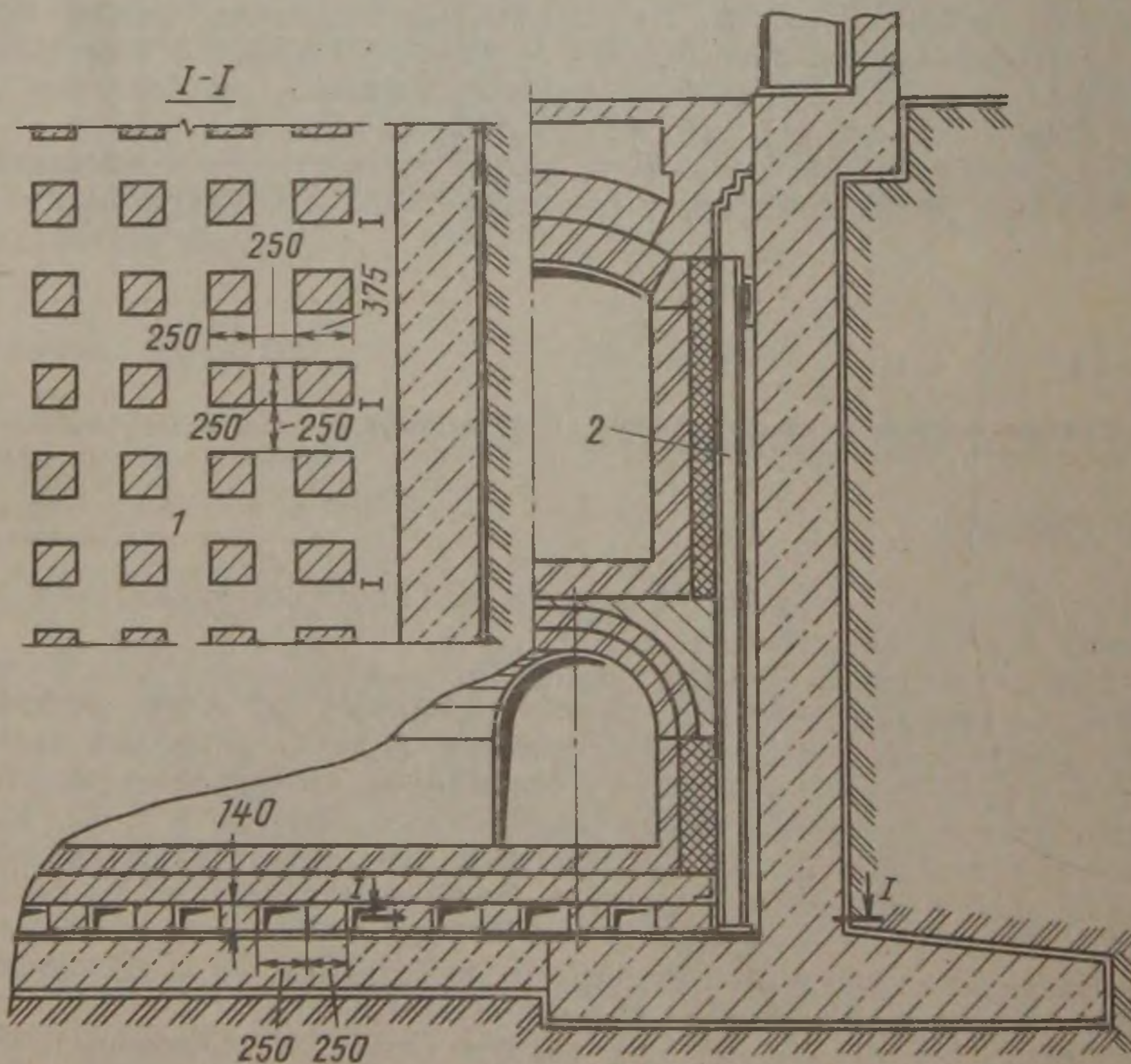


Рис. 11-2. Пример конструкции шанцев 1 и воздушного зазора 2 между кладкой и фундаментом

Фундаменты под печи чаще делают сплошными и изредка ленточными. Во избежание неравномерности осадки их выполняют самостоятельными, не связанными с фундаментами зданий и других сооружений. При строительстве печей вне зданий (доменные печи, дымовые трубы и т. п.), глубина заложения фундамента должна быть ниже глубины промерзания грунта.

Фундаменты под доменную и камерную печь приведены на рис. 11-1.

При сооружении фундаментов, подверженных воздействию высоких температур, необходимо применять жаростойкий бетон или предусматривать воздушное охлаждение поверхности бетона с помощью специально выполняемой системы шанцев и воздушного зазора между кладкой и фундаментом (рис. 11-2). Возможно также выполнение теплоизоляционного слоя между фундаментом и футеровкой печи, не допускающего повышение температуры фундамента более 1200°C .

При высоком уровне грунтовых вод или при необходимости заглубления части сооружения следует предусмотреть дренаж или заключить фундамент в гидроизоляционный ящик.

2. Каркас

Каркас предназначен для восприятия усилий, возникающих в футеровке печи при ее нагреве, а также для несения всей гарнитуры, арматуры, механизмов и другого оборудования печи.

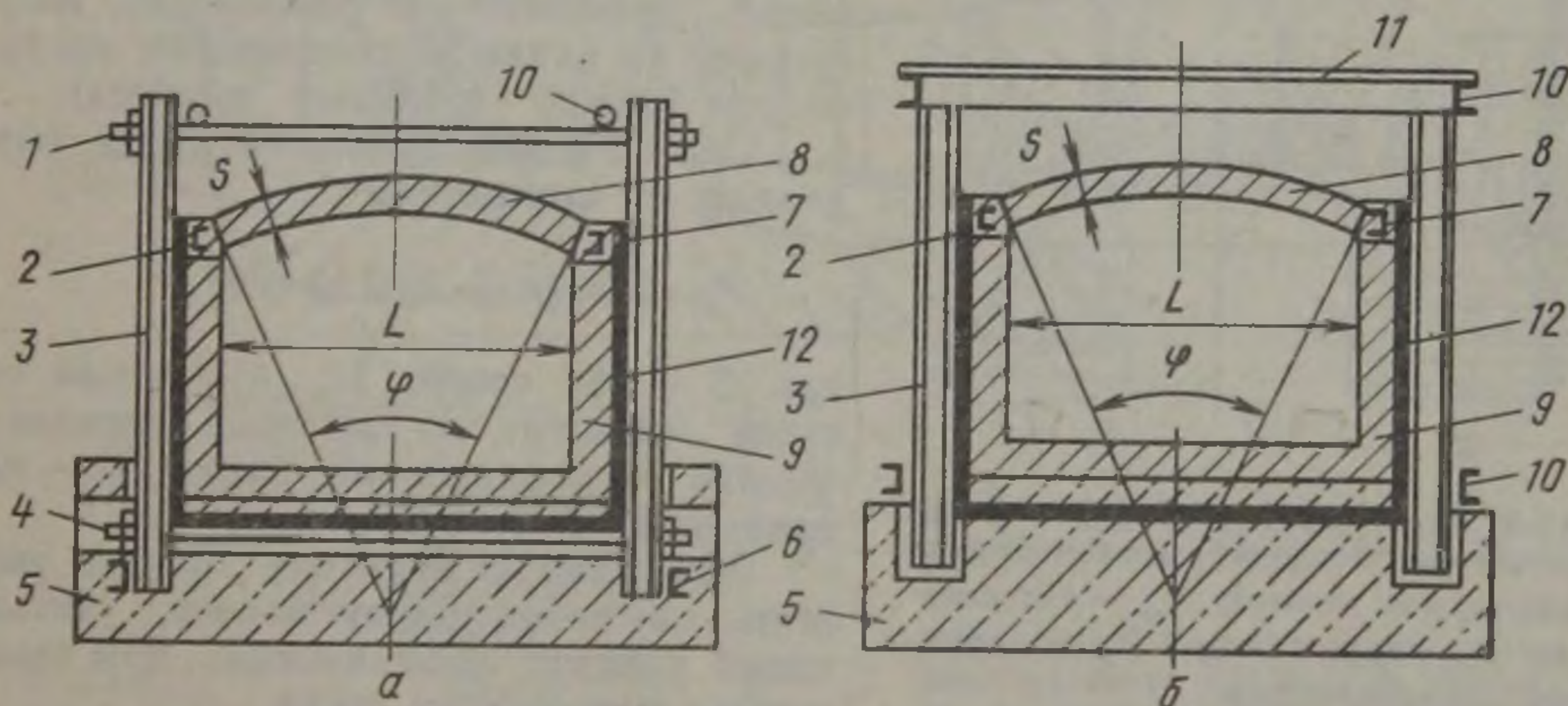


Рис. 11-3. Стоечные каркасы:

a — с гибкими (подвижными) связями; *б* — жесткой рамной конструкции; 1, 4 — верхняя и нижняя болтовая связь; 2 — подпятовая балка; 3 — стойка; 5 — фундамент; 6 — резервная балка; 7 — пятовый кирпич; 8 — свод; 9 — футеровка печи; 10 — продольная связь; 11 — поперечная сварная связь; 12 — кожух; *L* — ширина печи; *S* — толщина свода; φ — центральный угол свода

Различают каркасы следующих типов: стоечного с гибкими (подвижными) связями (рис. 11-3, *a*); стоечного жесткой рамной конструкции (рис. 11-3, *б*). Расширение кладки при этом компенсируется температурными швами; с листовой обшивкой; кожухи вертикальных шахтных печей; кожухи барабанных вращающихся печей и сушил.

Стойки каркасов выполняют из швеллеров или двутавров. Стойки крупных печей (мартеновских) делают из слябов различного сечения.

Ответственными элементами каркаса являются подпятовые балки, которые предназначены для восприятия усилий распора арочного свода и передачи его на каркас. Примеры конструкции подпятовой балки показаны на рис. 11-4. В печах с высокими температурами (плавильных) подпятовые балки делают с водяным охлаждением. На рис. 11-5 приведены конструкции подпятовых балок свода с подвешенной неводоохлаждаемой и водоохлаждаемой пятками, позволяющими проводить разборку стен печи без разрушения свода.

Ряд элементов каркасов печей необходимо выполнять водоохлаждаемыми. Для них применяют полые прокатные профили или квадратные трубы. На рис. 11-6 показаны водоохлаждаемые элементы каркаса методических печей, выполненные из квадратных труб.

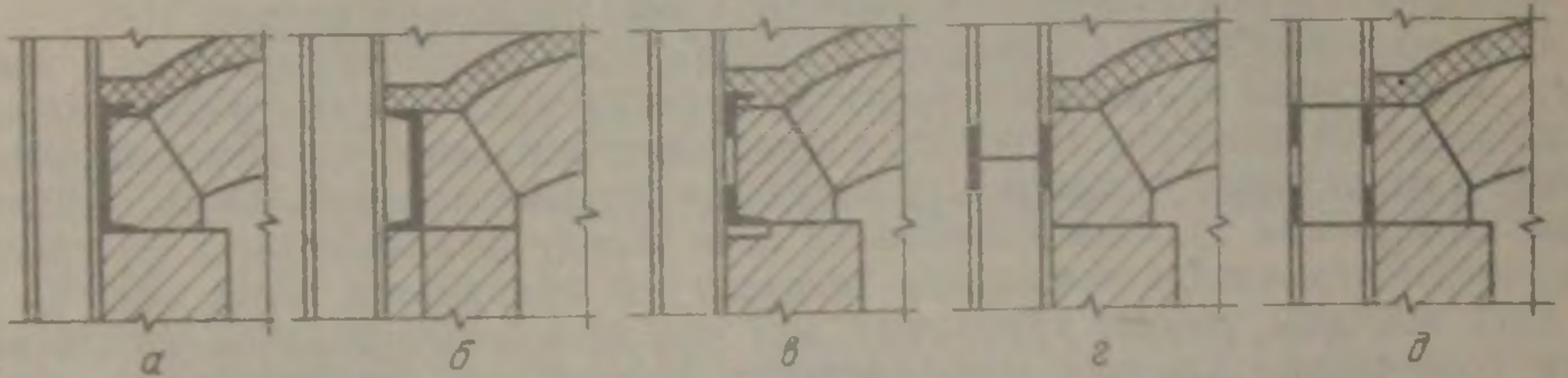


Рис. 11-4. Конструкции подпяттовых балок:
а и б — закладных; в, г и д — расположенных снаружи кладки

Каркасы печей с арочным сводом и подпяттовые балки рассчитывают по распорным усилиям, возникающим при нагреве свода. Горизонтальная составляющая P_r (см. рис. 11-5) воспринимается подпяттовой балкой, оказывая на нее изгибающее воздействие. Поэтому подпяттовую балку рассчитывают на изгиб, принимая ее равномерно нагруженной по длине и покоящейся на двух опорах (между стойками каркаса).

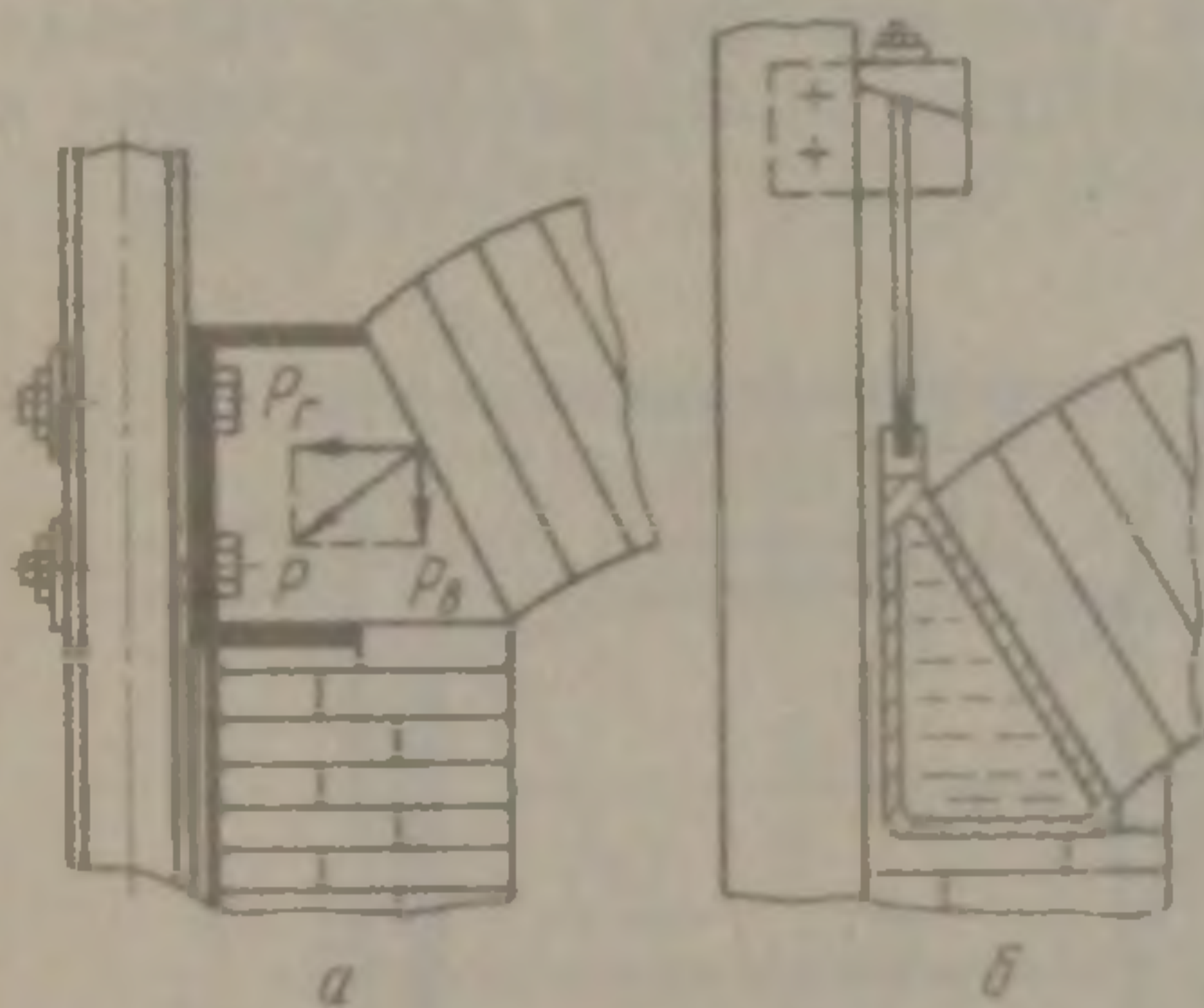


Рис. 11-5. Неводоохлаждаемая а и водоохлаждаемая б подпятниковые балки:
 P — распорное усилие; P_r — горизонтальная составляющая; P_v — вертикальная составляющая

Силу P_r для арочного свода определяют из выражения

$$P_r = G / [(n + 1) 2 \operatorname{tg} \varphi / 4],$$

где G — вес свода, Н; n — число пар стоек каркаса, на которые передается усилие от подпяттовой балки; φ — центральный угол свода.

Полученную величину P_r надо умножить на коэффициент запаса, учитывающий усилия, возникающие при термическом расширении свода.

При подвесном своде расчетом на изгиб проверяют поперечные тяги и вертикальные стойки.

3. Кладка

Футеровка является ответственной частью всех промышленных печей. От ее службы зависит надежность работы печи и длительность кампании. Элементами футеровки являются под, стены и свод.

Кладка должна быть, по возможности, непроницаемой для расплавленных металлов и шлаков, а также для печных газов.

В зависимости от требуемой тщательности работы кладку разделяют на категории, для каждой из которых допустимая толщина шва строго регламентирована:

особо тщательная, со швами толщиной не более 1 мм — для футеровки плавильных печей в местах возможного контакта с жидкой средой;

тщательная, со швами толщиной не более 2 мм — для футеровки, подвергающейся истирающему воздействию и для нагревательных печей с температурой до 1400 °С;

обыкновенная, со швами толщиной не более 3 мм — для футеровки, не контактирующей с жидким металлом и шлаком, и для нагревательных печей с температурой до 1200 °С;

простая, со швами толщиной до 4 мм — для выполнения нижних слоев пода. Рабочий слой футеровки в местах, где требуется наибольшая плотность, выкладывают особенно тщательно со швами не более 0,5 мм. При кладке бортов допускается шов толщиной до 5 мм, а при наружной облицовке печи красным

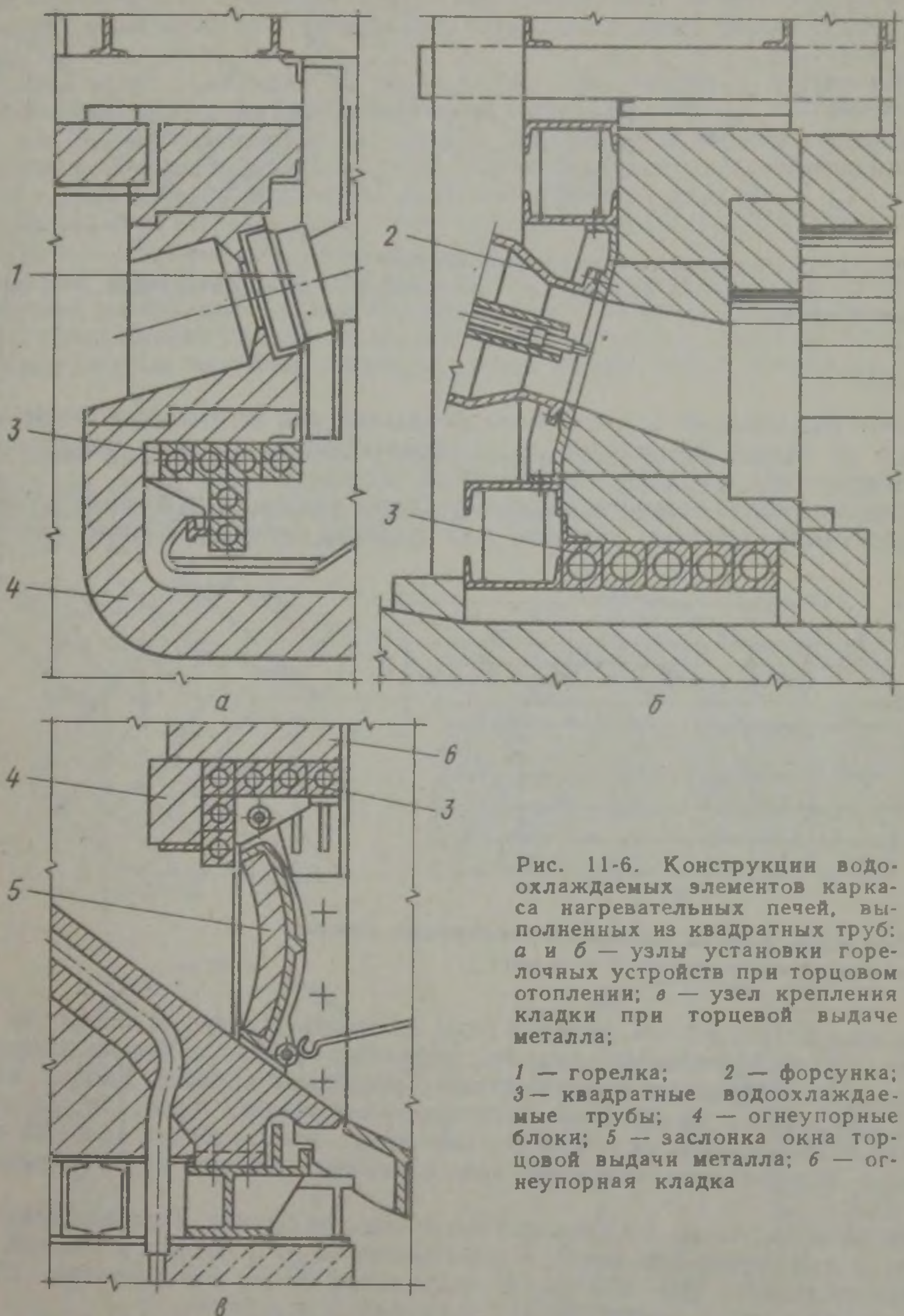


Рис. 11-6. Конструкции водоохлаждаемых элементов каркаса нагревательных печей, выполненных из квадратных труб: а и б — узлы установки горелочных устройств при торцовом отоплении; в — узел крепления кладки при торцевой выдаче металла;

1 — горелка; 2 — форсунка; 3 — квадратные водоохлаждаемые трубы; 4 — огнеупорные блоки; 5 — заслонка окна торцевой выдачи металла; 6 — огнеупорная кладка

или изоляционным кирпичом толщину шва принимают равной 8—10 мм. Кирпич в кладке может располагаться по-разному — на плашку, на торец или на ребро (рис. 11-7) с обязательным смещением швов (с перевязкой). Это делает кладку более устойчивой и плотной. Огнеупорный слой кладки с теплоизоляционным обычно не перевязывают, так как они имеют разные коэффициенты термического расширения, что при нагреве кладки может привести к ее разрушению.

Для компенсации термического расширения кладки в ней предусматривают температурные швы, размеры которых зависят от рабочей температуры и от применяемого для кладки материала. Ширина термических швов колеблется в пределах от 5 до 15 мм на 1 м кладки.

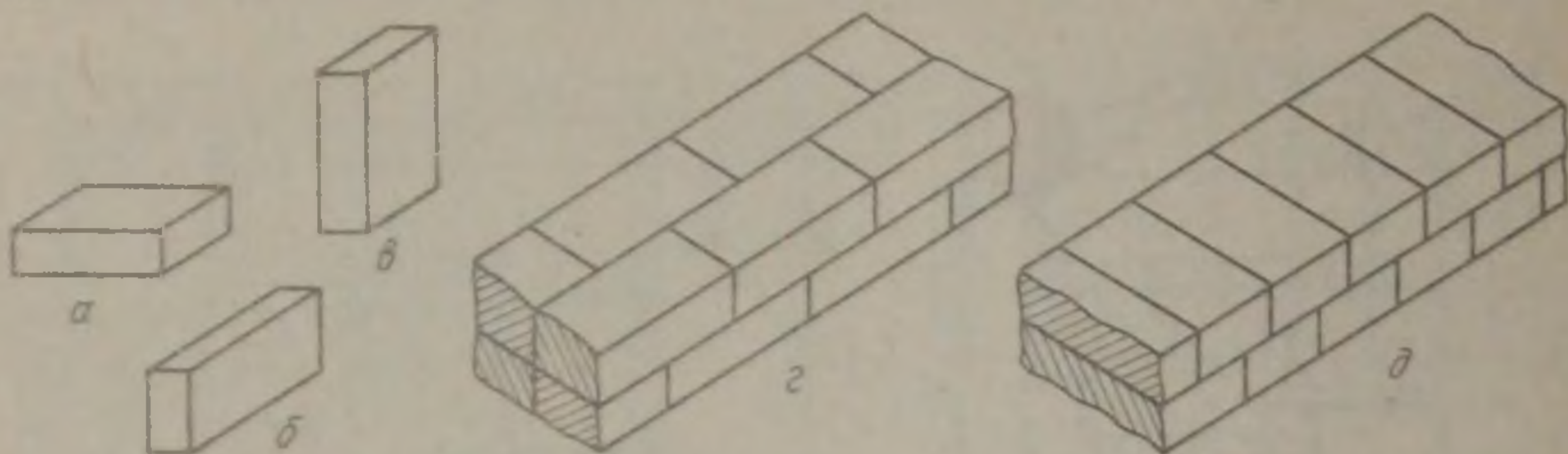


Рис. 11-7. Расположение кирпича в кладке: а — на плашку; б — на ребро; в — на торец; г — ложка́вая кладка; д — тыч-
ко́вая кладка

Под печи

Под печи выкладывают или прямо на фундамент или на стальные листы, опирающиеся на балки. Воздушный зазор, образующийся при этом между подом и фундаментом, предохраняет последний от перегрева.

Под печи часто подвергается механическим ударам загружаемых материалов и химическому действию окислы или жидкого металла, поэтому его всегда

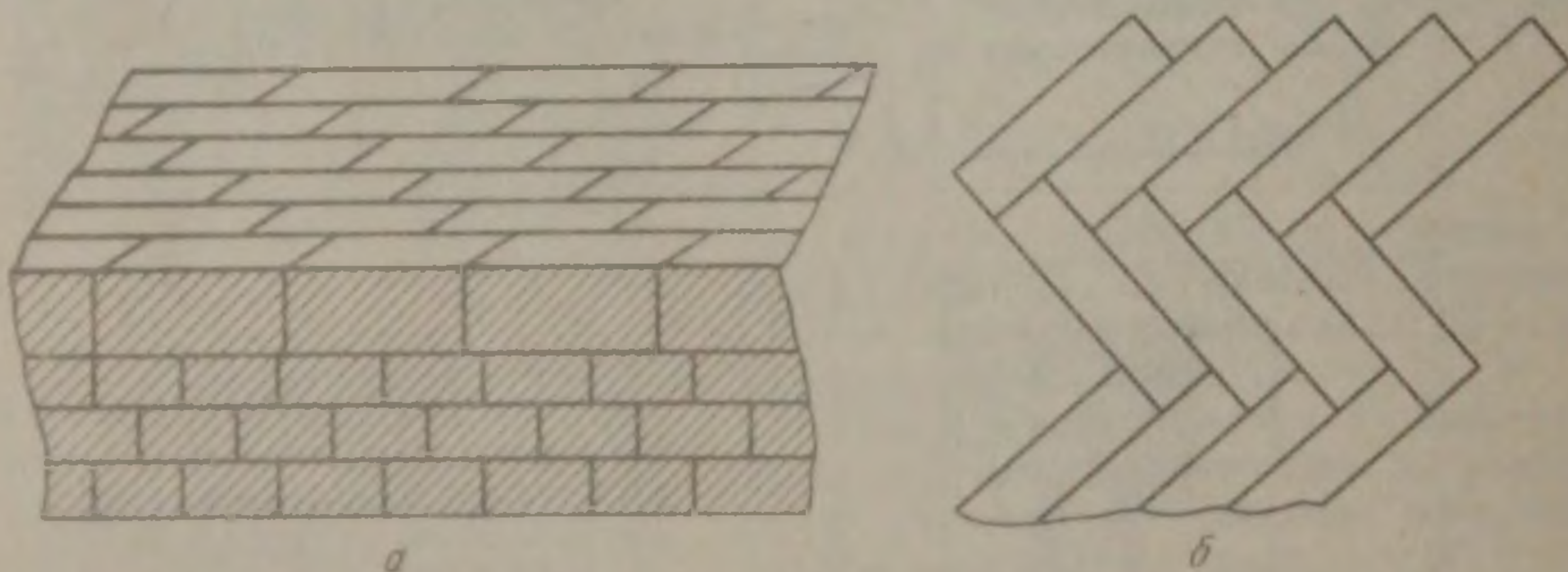


Рис. 11-8. Кладка подины нагревательных печей: а — простая на ребро; б — в елку

выполняют многослойным. Нижние ряды (выстилка) кладут на плашку из теплоизоляционного или красного кирпича. Верхние ряды выполняют из огнеупорных материалов, выбираемых в соответствии с условиями службы. Кладку ведут на ребро или торец с обязательным соблюдением перевязки швов. Иногда верхний ряд пода выкладывают «в елку». В плавильных печах рабочий слой обычно выполняют бесшовным — набивным или наварным. Кладка пода приведена на рис. 11-8.

В доменных печах под (лещадь) выполняют из блоков. Толщина пода термических и нагревательных печей, в зависимости от их размеров и рабочей температуры составляет 230—465 мм. В плавильных печах она достигает 1200 мм, а в доменных печах лещадь кладут толщиной 5 м и более.

Стены печи

Кладку стен ведут, как и пода, с перевязкой швов, для чего меняют положение кирпича, чередуя тычковые и ложка́вые ряды (кирпич, уложенный длинной стороной параллельно плоскости стены, называется ложка́вым, а уложенный перпендикулярно — тычковым).

Кладку стен нагревательных печей ведут строго вертикально, а стены плавильных печей, с целью повышения их стойкости, часто делают наклонными с толщиной, уменьшающейся кверху.

Стены выполняют двух- или трехслойными. Внутренний рабочий слой выкладывают из огнеупорного материала, отвечающего требованиям, зависящим от характера работы печи. Он должен иметь необходимую огнеупорность, химическую и механическую стойкость. Наружный слой делают из теплоизоляционного материала, назначение которого снизить потери тепла через кладку теплопроводностью.

Иногда стену выполняют из нескольких слоев (например, динас—шамот—изоляционный). Каждый слой кладут самостоятельно и только при высоте стен более 2,5—3,0 м огнеупорную кладку для повышения прочности перевязывают с изоляционной через каждые 5—6 рядов. Для повышения стойкости стен большой высоты в ряде случаев применяют анкерное крепление кладки.

Толщина стен нагревательных печей колеблется от 0,345 до 0,565 м, плавильных 0,9—1,1 м; доменных печей 1,1—1,6 м.

В печах периодического действия стены, по возможности, выполняют из легковесных материалов с целью снижения потерь на аккумуляцию тепла кладкой. При выполнении футеровки электрических печей для экономии электрической энергии слой тепловой изоляции делают толще, чем в топливных печах.

Свод печи

Своды печей выполняют арочными, купольными или подвесными.

Арочные своды применяют при ширине пролета до 3 м. Для металлургических печей преимущественно применяют арочные своды с центральным углом 60, 90, 120 и 180° (соответственно рис. 11-9, а—г).

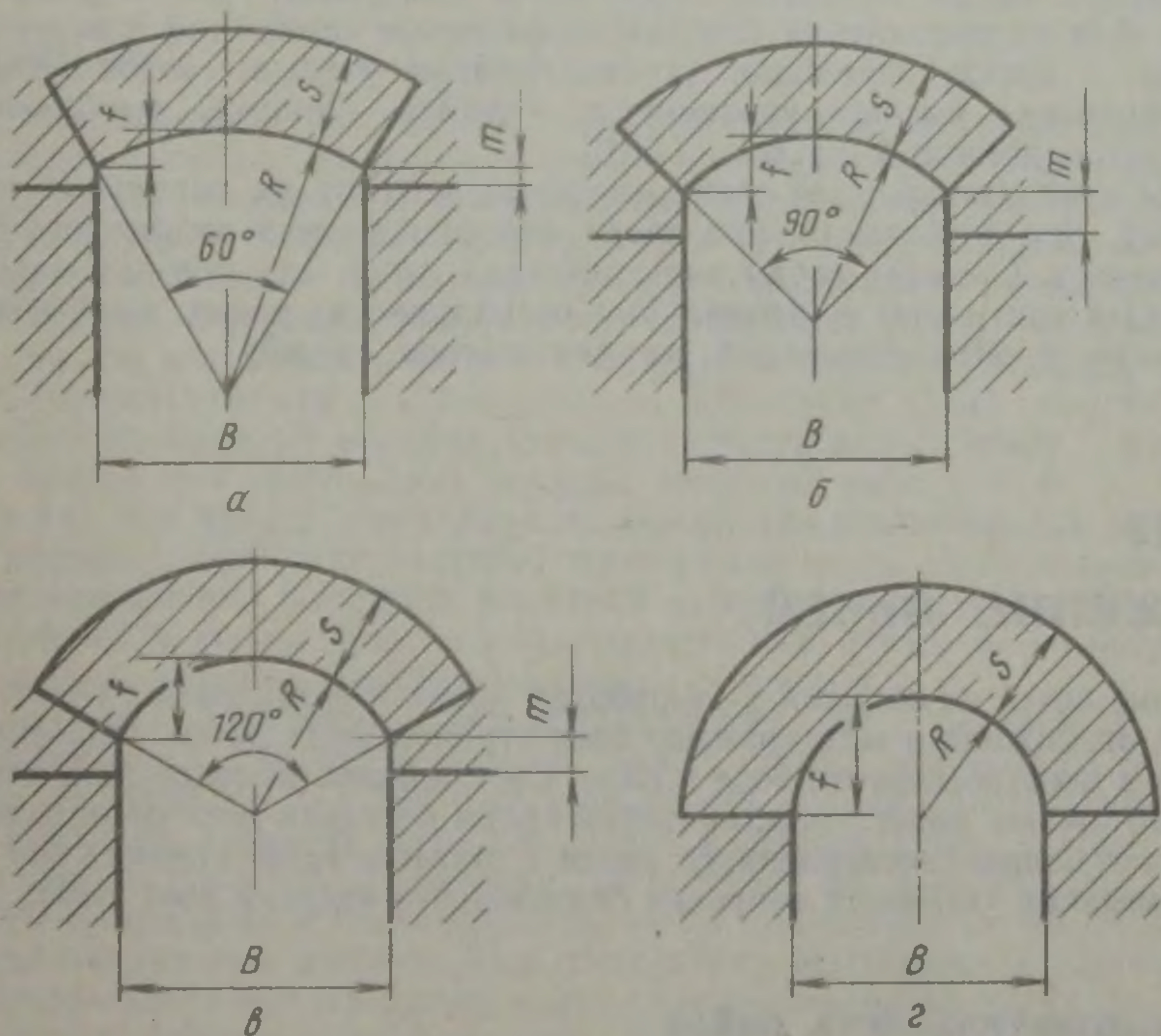


Рис. 11-9. Схемы сводов

На основании практических данных установлены следующие соотношения для определения радиуса R и стрелы свода f :

φ , град	60	90	120	180
R	B	$0,707B$	$0,577B$	$0,5B$
f	$0,134B$	$0,207B$	$0,289B$	$0,5B$

Для печей чаще принимают $R = B$, т. е. радиус равный ширине пролета B , для боровов $R = 0,5B$. Толщина свода S обычно равна длине кирпича — 230, 250 или 300 мм. Если свод выполняют из двух рядов кирпича по толщине, то ряды (акаты) не перевязывают друг с другом. Своды нагревательных печей выполняют с изоляцией, применяя для этого засыпку толщиной 65—230 мм. Своды плавильных печей обычно делают без тепловой изоляции во избежание перегрева и быстрого их износа.

Купольными сводами называются своды круглых печей. Их выполняют целиком из фасонного кирпича.

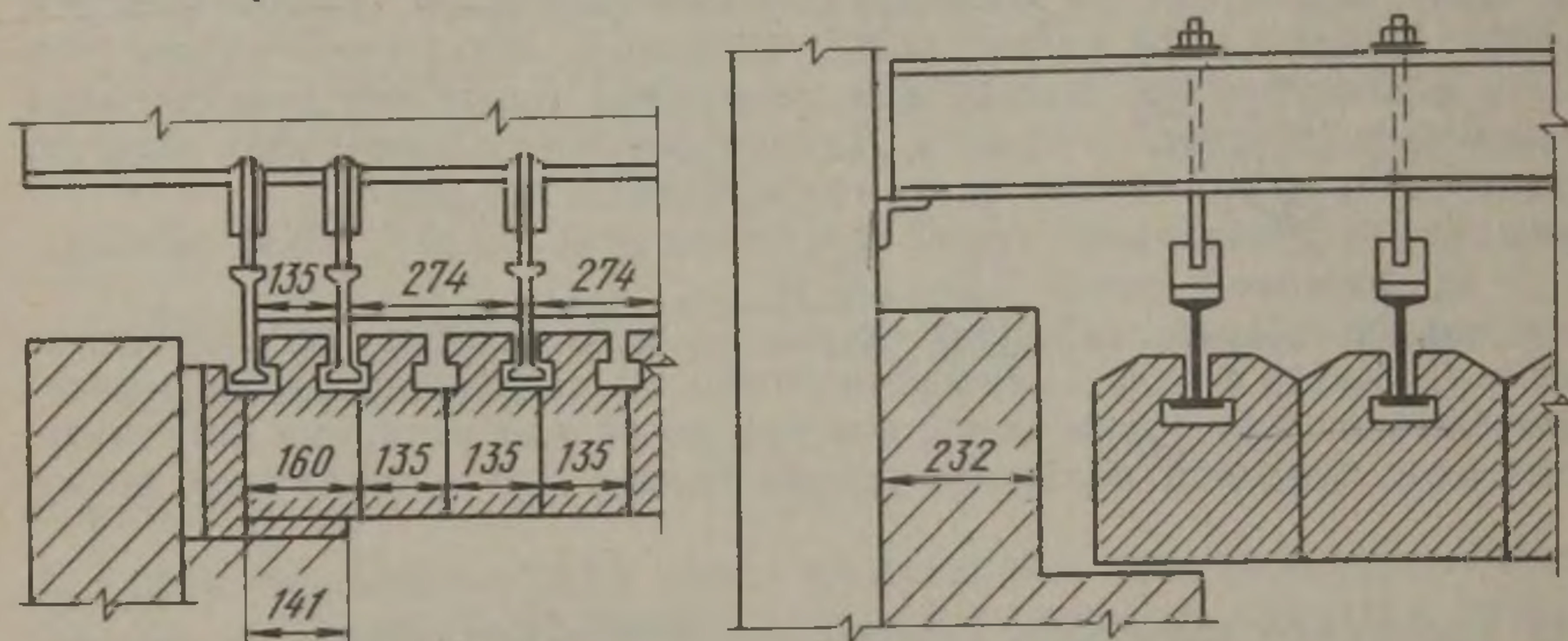


Рис. 11-10. Примеры выполнения подвесных сводов нагревательных печей

Подвесные своды нагревательных печей применяют при ширине пролета более 3 м. Для их выполнения используют фасонные кирпичи из шамота класса А и каолина, в местах пережимов (криволинейные участки сводов методических печей) применяют высокоглиноземистые кирпичи. Примеры выполнения подвесных сводов показаны на рис. 11-10.

Своды плавильных печей очень массивны, поэтому их выполняют распорно-подвесными, при этом часть веса свода передается через подпятовые балки на стойки каркаса. Съемные своды электрических печей или крышки нагревательных колодцев монтируют в специальных металлических рамах, воспринимающих все нагрузки и обеспечивающих их длительную службу.

Глава 12

СООРУЖЕНИЕ ПЕЧЕЙ

Сооружение печей начинается с разработки проекта организации работ, включающего по возможности механизацию всех строительных работ, определение потребности в электроэнергии, воде и паре. Составляется календарный план строительно-монтажных работ, определяющий сроки поставки всех материалов и оборудования с целью своевременного ввода в эксплуатацию строящегося объекта. Особое внимание уделяется вопросам безопасности ведения всех работ.

1. Последовательность работ

Строительство фундамента

Строительство печей начинается с сооружения фундамента, проект которого определяется типом печи и свойствами грунта. На верхней поверхности фундамента размечают все, что необходимо для монтажа каркаса печи: ось печи, углубления для стоек каркаса, места крепления анкерных болтов. Тщательно проверяют вертикальные размеры и горизонтальность поверхности фундамента.

Монтажные работы

После проверки и приемки фундамента печи, оформленной специальным актом, приступают к монтажу каркаса. При сооружении крупных нагревательных (например, нагревательных колодцев) и плавильных (доменных, мартеновских, отражательных) печей одновременно с монтажом стальных конструкций выполняют кладку их футеровок и монтаж оборудования. При сооружении средних по размеру и малых нагревательных печей сначала заканчивают монтаж каркаса, а затем уже начинают кладку футеровки. Сборку отдельных элементов каркаса производят вблизи места монтажа, что сокращает число операций при сборке всего каркаса на месте и, таким образом, сокращает сроки монтажа. Подъем и установку элементов и собранных предварительно узлов каркаса осуществляют с помощью специальных подъемных мачт и кранов. Перед соединением деталей и узлов проверяют правильность их сборки и соответствие их расположения проектному заданию. Элементы стальных конструкций соединяют преимущественно сваркой и реже клепкой. Окончательную проверку смонтированного каркаса крупных печей производят при помощи геодезических инструментов, а небольших печей — с помощью уровня, отвеса и стальной рулетки.

В последнее время для повышения качества монтажных работ и сокращения сроков сооружения и ремонта печей широко используют метод «надвижки». Он заключается в том, что необходимую конструкцию полностью собирают на специальном стенде, расположенном вблизи фундамента с сооружаемой (или ремонтируемой) печи на одном уровне с ним. После окончательной сборки готовую конструкцию с помощью специальных механизмов надвигают на предназначенное для нее место, где и закрепляют при помощи анкерных болтов. При сборке цельнометаллического каркаса (доменной печи, воздухонагревателей) необходима проверка сварных швов на герметичность.

Кладка футеровки

Футеровку выполняют из материалов, предусмотренных проектом и определяемых условиями службы. Стандартный кирпич при выполнении футеровки иногда подвергают резке, обтесыванию или шлифовке. Если необходимо получить кирпич сложной формы его обрабатывают вручную. При резке большого количества кирпича по прямой линии применяют станки. Для шлифовки кирпичей может быть использован шлифовальный станок. Шлифовкой можно корректировать размеры кирпича или блока, добиться наибольшей плотности кладки, получить строго горизонтальные или вертикальные ее положения. Так, например, шлифовке подвергают опорные кирпичи насадок регенеративных камер, торцы углеродистых блоков при выполнении лещади доменной печи и т. п.

Перед тем, как приступить к кладке, определяют рациональный для данной печи тип кладки, допустимую толщину термических швов, расположение кирпичей, места применения фасонных кирпичей — при кладке фурменных отверстий доменных печей, в конвертерах — у сталевыпускного отверстия, в нагревательных колодцах и печах — в местах установки горелок и т. п.

Большую роль при выполнении кладки играют швы, назначение которых, как уже говорилось, соединять кирпичи между собой, выравнивать возможные неточности их размеров и обеспечивать прочность кладки при термическом расширении кирпичей. Толщину швов определяют в зависимости от условий службы кладки и свойств огнеупорных изделий, из которых она выполняется. Температурные швы рассчитывают таким образом, чтобы они полностью компенсировали расширение кладки при нагреве. Для обеспечения необходимого размера швов при их выполнении в кладку между кирпичами закладывают листы соответствующей толщины, которые затем вынимают. В местах, где огнеупорная кладка соприкасается с теплоизоляционной, против температурного шва вместо изоляционного закладывают огнеупорный кирпич. Как термические, так и соединительные швы выполняют так, чтобы при кладке не получалось сквозных швов. Для заполнения соединительных швов подбирают такой мертель, который по свойствам наиболее близок к свойствам материала, из которого выполняется кладка. Толщину швов при выполнении кладки проверяют специальным инструментом — щупом, представляющим собой набор пластинок различной толщины.

Работы по кладке футеровки начинают обычно с нижнего строения печи — дымоходов, регенераторов, пода. Арочный и куполообразный своды выполняют на специальных опалубках, применяя при кладке прямые и клиновые кирпичи. Кладку ведут в порядке очередности слоев от периферии к центру. Последний центральный кирпич (замковый) загоняется в кладку с усилием, обеспечивая ее прочность. Подвесной свод выполняют с помощью специальной металлургической арматуры. Керамические рекуператоры могут быть собраны на отдельной стенде и затем «задвинуты» на подготовленное для них место. В случае выполнения футеровки (или ее элементов) из набивных масс, торкрет-масс или огнеупорного бетона используют специальные шаблоны и опалубки, обеспечивающие необходимые размеры и форму выполняемого элемента.

Сушка и разогрев футеровки

После окончания и тщательной проверки всех монтажных и футеровочных работ печь ставят на сушку. Режим и длительность сушки зависят от материала футеровки, способа ее выполнения, конструкции и размеров. Резкое повышение скорости сушки вызывает появление трещин в мертеле, что снижает его прочность. Футеровка, выполненная из отдельных элементов, сушится и разогревается быстрее, чем монолитная, выполненная из огнеупорного бетона. Сушка производится сжиганием газа в специально установленных горелках или сжиганием костров, сложенных из дров непосредственно на поду печи. Особое внимание уделяется равномерности распределения температуры по всей футеровке печи.

После окончания сушки, не охлаждая печь, начинают постепенный разогрев ее до рабочей температуры. Быстрое повышение температуры приведет к изменению ее распределения по толщине кладки, что может вызвать термическое или механическое растрескивание, т. е. сокращение срока службы печи. При укладке блоков большой толщины (например, лещадь доменной печи) осуществляют ступенчатый нагрев. Излишне медленный нагрев не экономичен, так как приводит к дополнительному расходу тепла и рабочей силы. Поэтому, как сушка, так и нагрев до рабочей температуры ведутся по заранее установленному графику при тщательном наблюдении за температурными швами кладки и за состоянием свода. После вывода печи на рабочий режим и опробовании всех механизмов ее сдают обслуживающему персоналу.

2. Техника безопасности

Сооружение печей можно производить как во вновь строящихся, так и в действующих цехах. В последнем случае при разработке правил безопасной работы необходимо учитывать наличие грузопотоков цеха. Весь персонал, занятый на строительстве, должен пройти специальный инструктаж по технике безопасности с учетом работающих в цехе агрегатов. Строительная площадка или рабочая зона должна быть огорожена, а в местах въезда необходимо иметь сигнальные флаги. Следует выбирать место для размещения источников света и их число с целью обеспечения требуемого по существующим нормам освещения всей площадки.

Все грузоподъемные устройства и механизмы должны быть проверены и иметь соответствующие паспорта. Материалы, необходимые для работы должны доставляться по ходу строительного процесса в складские помещения, обеспечивающие их защиту от дождя и огня. Линии электропередачи по возможности должны быть размещены за зоной монтажа, или находиться под специальным наблюдением.

При монтаже каркаса особое внимание следует уделять соблюдению правил по строповке поднимаемых балок и следить за последовательностью сборки, не допуская даже временной неравномерности его нагрузки. Высокие металлоконструкции, поднятые в вертикальное положение, необходимо поддерживать специальными расчалками до окончательного их закрепления. Все монтажные работы на высоте должны производиться с подмостей и с применением для такелажников-верхолазов предохранительных поясов.

При выполнении работ по кладке футеровки необходимо, чтобы все проходы и лестницы были свободны от мусора и хорошо освещены. Леса, с которых выполняют кладку, должны быть прочные и проверены расчетом. Если работу

ведут на разных по высоте ярусах, то на каждом ярусе над головами рабочих должно быть плотное перекрытие, предохраняющее их от падающих предметов.

Все механизмы и вспомогательные устройства должны иметь ограждения, не допускающие ранение рабочих. Размещение механизмов должно быть таким, чтобы вероятность пересечения грузопотоков была сведена до минимума. При установке группы транспортеров, связанных по работе друг с другом, должен быть предусмотрен главный рубильник для одновременного выключения всей системы.

Полное соблюдение всех мероприятий по технике безопасности обеспечит охрану труда рабочих при сооружении металлургических печей.

Глава 13

СЛУЖБА ОГНЕУПОРОВ И ФУТЕРОВКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

1. Разрушение огнеупорных изделий

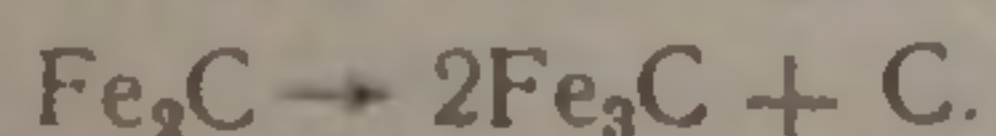
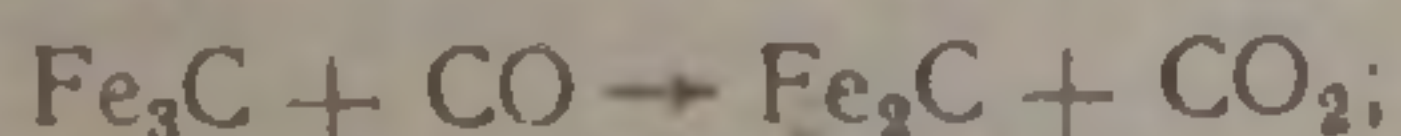
Огнеупорные изделия в процессе службы разрушаются под воздействием высоких температур, резких колебаний температур и возникающих в результате этого внутренних напряжений, химического воздействия атмосферы печи, шлака и металла. Огнеупор подвергается действию как отдельных факторов, так и их комбинаций.

В связи с этим причинами разрушения изделий может быть их деформация под нагрузкой, рост или усадка в связи с полиморфными превращениями, растворение в шлаке, разъедание газами, различные виды растрескивания и др. Для правильного выбора огнеупорных изделий необходимо изучить условия службы, т. е. определить требования, предъявляемые к огнеупорам и знать их рабочие свойства. При анализе причин разрушения огнеупоров желательно уметь визуально определить их признаки. Так, например, гладкая поверхность огнеупора говорит о растворении его в шлаке, шероховатая — показывает на наличие истирающего воздействия среды на огнеупор, посечки на поверхности получаются при структурном растворении, отбитость углов и ребер имеет место при сжатии кирпича в кладке (следствие механического растрескивания). Трещины, расположенные параллельно рабочей поверхности, свидетельствуют о химическом воздействии среды на огнеупор. Выпучивание частей стенки или подины говорит о термическом расширении огнеупора, а выпадение отдельных кирпичей и увеличение швов кладки показывает на наличие дополнительной усадки.

Одной из основных причин разрушения футеровки является деформация огнеупора под нагрузкой и усадка, которые определяют верхний температурный предел службы футеровки. Однако влияние этих показателей зависит от условий службы огнеупора — температуры, нагрузки, продолжительности, непрерывности и периодичности работы.

Разрушение огнеупоров газами

Механизм разрушения огнеупоров газами заключается в проникновении газов в поры изделий и их физическом и химическом взаимодействии с огнеупорами. Так, причиной разрушения футеровки доменной печи является проникновение в поры изделия газа CO, который распадается с образованием углерода $2CO \rightarrow CO_2 + C$. Оксиды железа, входящие в состав огнеупоров, служат катализаторами этого процесса. Причем, наибольшей интенсивности процесс достигает при температуре 450—600 °С. Осаждение углерода идет и по следующим реакциям:



В связи с этим очень важно при производстве огнеупорных изделий связать металлические примеси в неактивный фаялит ($2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$) или герцинит ($\text{FeO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$). В этом случае изделие значительно лучше противостоит воздействию газа CO .

Накопление углерода в порах приводит к растрескиванию огнеупора.

Влияние газов на огнеупорные изделия, таким образом, в большей мере зависит от их пористости и газопроницаемости.

Углеводороды — метан, этан и природный газ в присутствии катализаторов в широком диапазоне температур разлагаются, в результате чего углерод осаждается в порах огнеупорных изделий.

Периклазовые и известковопериклазовые футеровки разрушаются в результате гидратации поглощаемыми парами воды. На ряд огнеупоров разрушительное действие оказывают щелочи, содержащиеся в шихте и переходящие в газообразное состояние; их влияние приводит к разбуханию кладки.

Водородная среда вызывает разрушение всех огнеупоров, содержащих SiO_2 и примеси типа Na_2O , MgO и др. Кварц переходит в кристобалит, что сопровождается уменьшением прочности изделия.

Аналогично водороду влияет и хлор. При длительном контакте с ним теряется прочность огнеупоров, в результате образования хлоридов, имеющих низкую температуру плавления.

Влияние газовой среды выражается также в окисляющем действии ее на огнеупор. Окислению подвергаются все углеродсодержащие огнеупоры.

Растрескивание огнеупоров

Под растрескиванием огнеупоров понимают отслаивание поверхностного слоя изделия или появление различного размера трещин и посечек как в огнеупорных изделиях, так и в футеровке в целом.

Различают следующие виды растрескивания: термическое, механическое и структурное.

Термическое растрескивание вызывается напряжением, возникающим при различном термическом расширении по толщине изделия. Причиной этого явления может служить высокий длительно действующий температурный градиент или резкие смены температур. Разрушение выражается в скалывании углов или отслаивании части поверхности (при резком нагреве), или в образовании трещин, расположенных по нормали к поверхности изделия (при резком охлаждении). Термическое растрескивание огнеупоров зависит от их теплопроводности, теплоемкости, плотности и термического расширения.

Изделия, изготовленные полусухим прессованием под высоким давлением, меньше подвергаются растрескиванию, чем изделия, изготовленные из влажной массы пластичным формованием. Добавки в шамотные изделия Li_2O , а в периклазовые изделия глинозема предотвращают образование трещин.

При службе огнеупорных изделий необходимо принимать меры к устранению резких теплосмен (постепенно повышать температуру, при охлаждении закрывать шибер, чтобы избегать засасывания холодного воздуха и т.д.).

Механическое растрескивание имеет место при воздействии на огнеупор механических усилий, причины возникновения которых следующие:

интенсивное образование паров при быстром нагреве влажных изделий; напряжения, возникающие при термическом расширении огнеупоров и недостаточном размере оставленных термических швов;

неравномерный нагрев огнеупора арочного свода, вследствие которого происходит скалывание углов кирпича на рабочей поверхности свода.

Для предотвращения механического растрескивания следует избегать резкого подъема температур, применять изделия с небольшим коэффициентом термического расширения и, по возможности, конструкцию сводов выполнять подвешенной.

Структурное растрескивание огнеупора связано с образованием новых соединений во внутреннем слое футеровки вследствие проникновения в него пыли шихты, капель металла или шлака. Метаморфизованный слой может давать

усадку или разбухать, что в равной степени приводит к шелушению, растрескиванию или скалыванию этого слоя огнеупора.

Структурное растрескивание часто наблюдается при высокой газопроницаемости изделий и при использовании изделий с высокой дополнительной усадкой.

Механический износ истиранием

Разрушение огнеупоров в результате истирания имеет место при воздействии на футеровку шихты (шахтная печь) или газов, несущих твердые частицы. Износостойкость зависит от зернового состава и структуры материала, пористости изделия, применяемой связки. Повышение стойкости изделий достигается прессованием их под высоким давлением или литьем из расплава, высокотемпературным обжигом, применением специальных добавок и химических связующих веществ. В условиях службы при высоких температурах к истиранию огнеупора добавляется его химическое разъедание.

2. Выбор огнеупоров для футеровки печей

При выборе огнеупорных изделий для футеровки необходимо провести подробный анализ условий службы, на основе которого сформулировать требования, предъявляемые к огнеупорам в данной промышленной печи. После чего следует ото-

Т а б л и ц а 13-1. Характеристика службы огнеупоров

Наименование печей	Применяемые огнеупоры	Причины разрушения футеровки	Участки наибольшего износа
Доменные печи	Муллитокремнеземистые, муллитовые	Износ, истирание	Фурменная зона, летка чугунная, желоб для выпуска чугуна
Мартеновские печи	Углеродистые, графитизированные блоки Периклазохромитовые, периклазоизвестковые	Высокое давление при интенсивном разогреве Износ, растрескивание	Горя, лещады Своды, стены, шлаковый пояс
Кислородные конвертеры	Смолодоломитовые, периклазохромитовые	Износ, размывание	Шлаковый пояс, летка для выпуска стали
Коксовые печи	Динасовые	Истирание, растрескивание	Камеры коксования, двери
Электросталеплавильные печи	Динасовые, периклазохромитовые	Износ, растрескивание	Своды, шлаковый пояс
Нагревательные колодцы	Муллитокремнеземистые, динасовые, хромитопериклазовые, набивные массы	Растрескивание, износ	Крышки, горелочные камни, подина
Отражательные печи цветной металлургии	Динасовые, периклазохромитовые, муллитокремнеземистые	Растрескивание, износ	Своды, участок горелок, шлаковый пояс
Конвертеры в производстве никеля	Известковопериклазовые доломитовые	Износ, вспучивание	Шлаковый пояс

брать необходимые свойства полностью соответствующие условиям службы и режиму работы печи.

Таким образом при выборе огнеупоров для плавильных печей необходимо знать составы металла и шлака, уровень рабочей температуры, расположение горелочных устройств и режим их работы, периодичность или непрерывность работы печи, запыленность печной среды, предельный уровень всплесков жидкого металла или шлака и т. п.

Следует произвести расчет распределения температуры по толщине стен, определить температуру рабочего и изоляционного слоев, а также кожуха печи. Изучить свойства расплавляемой шихты или нагреваемых тел, способ их перемещения внутри печи и возможные механические нагрузки на кладку. Оценить и выбирать рациональную форму огнеупорного изделия, размер швов кладки и материал для их заполнения. При выборе формы изделий следует исходить прежде всего из условий службы, но необходимо обязательно учитывать технологию производства огнеупоров, стоимость и трудности, связанные с их транспортировкой. Оптимальным вариантом является использование стандартных изделий или неформованных огнеупоров. В последнем случае необходимо применять меры защиты против их расширения и размывания, а для бетонов — учесть скорость схватывания и твердения.

В табл. 13-1 приведены рекомендуемые огнеупоры, причины разрушения футеровки и участки наибольшего износа для металлургических печей некоторых типов.

С целью уменьшения трудовых затрат и повышения плотности футеровки увеличивают размеры изделий, расширяют стандартизацию форм и использование неформованных огнеупоров.

3. Футеровка плавильных печей

Доменные печи

Современная доменная печь — крупное сооружение общей высотой около 30 м и массой (с шихтой) до 44 т. Основными конструктивными элементами печи являются колошник, шахта, распар, заплечики, горн и лещади. Конструкцию доменной печи выполняют с максимальной точностью, без малейшего перекаса и с минимальной неравномерностью осадки. Железобетонный фундамент имеет многогранную форму и состоит из двух частей: подошвы (нижней части), представляющей монолитную плиту, заглубленную на 6—7 м, и пня (верхней части), выступающего над уровнем земли на высоту 4—5 м. Пень имеет меньшие поперечные размеры, чем подошва, и строится из жароупорного бетона, имеющего огнеупорность 1100—1200 °С при допуске для несущей части фундамента 250 °С. Применяемое в настоящее время охлаждение низа лещади воздухом или водой полностью решает вопрос защиты фундамента от термического разрушения, поддерживая температуру на поверхности фундамента не выше 150 °С. Нижняя часть футеровки и металлических конструкций опирается непосредственно на фундамент, верхняя, от распара до колошника имеет опору на фундамент через колонны, поддерживающие мораторное кольцо, или непосредственно через кожух. На пне фундамента устанавливают специальные плиты с каналами для воздушного охлаждения лещади и пня фундамента (подлещадные холодильники). На них выполняют набойку из углеродной массы для герметизации и выравнивания горизонтального уровня поверхности, на которую укладывают лист (30—40 мм), служащий основанием огнеупорной кладки — лещади.

При выборе огнеупорного материала для футеровки учитывают, что главными причинами разрушения футеровки являются: длительное абразивное воздействие шихтовых материалов и газового потока, насыщенного щелочами и оксидом цинка, снижающими огнеупорные свойства кладки; отложение сажистого углерода в порах огнеупора; большое давление вышележащих слоев кладки; механические нагрузки, возникающие при загрузке шихты, и напряжение, вызванное высоким температурным режимом и воздействием шлаковых расплавов. При анализе работ футеровки следует иметь в виду, что тепловое и химиче-

ское воздействие на нее возрастает от верха печи к низу, а механические нагрузки, наоборот, преобладают в верхних 2/3 высоты, что связано с ударным действием шихтовых материалов при загрузке.

Интенсификация работы доменной печи путем применения природного газа, повышения температуры дутья и обогащения его кислородом, офлюсования агломерата и повышения давления газа под колошником повысила требования к стойкости футеровки.

Огнеупором для изготовления лещади служат высокоглиноземистые и углеродистые графитированные блоки. Общая высота лещади около 5 м. Кладка лещади представляет собой углеродистый стакан (рис. 13-1) с вертикальным рядом графитированных блоков 1 в основании, имеющих наибольшую теплопроводность, угольно-коксовыми блоками 2 по периферии, уложенными горизонтально на всю высоту лещади, и с высокоглиноземистыми блоками 3 в центре лещади, содержащими более 60 % Al_2O_3 . Кладку из углеродистых блоков ведут с заполнением швов углеродистой пастой, наносимой в нагретом состоянии. Периферия лещади на всю высоту облицована водяными холодильниками.

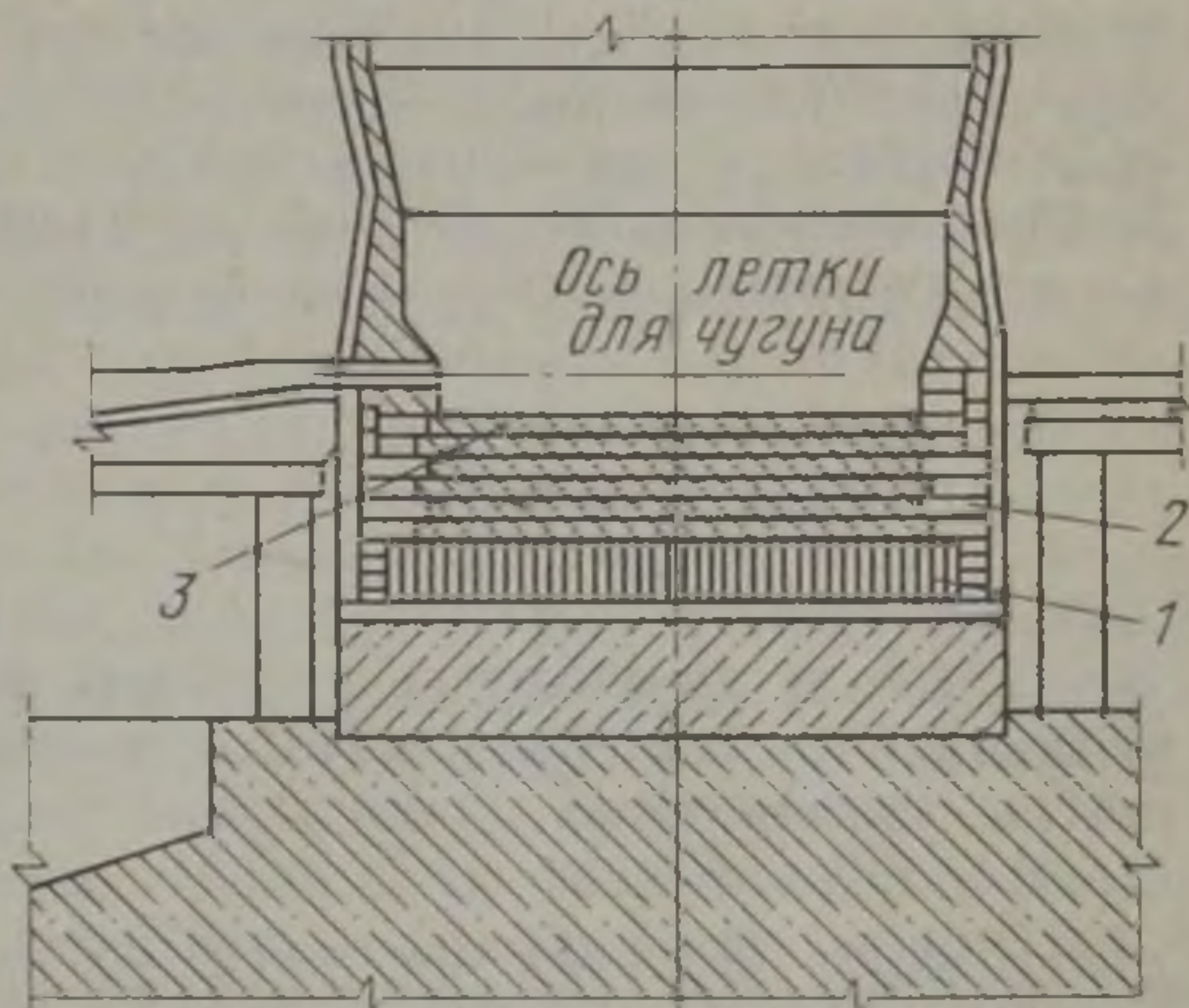


Рис. 13-1. Кладка лещади доменной печи

углеродистыми огнеупорами в области металлоприемника до фурменной зоны.

Фурменные проемы, чугунные и шлаковые летки выкладывают шамотными кирпичами, так как углеродистые блоки в этих местах футеровки могут подвергаться окислению кислородом дутья, водяными парами и диоксидом углерода. Внутренняя поверхность углеродистых блоков при задувке должна защищаться от окисления слоем шамотного кирпича.

Зазоры между кладкой и холодильниками заполняют углеродистой массой. Футеровку запечников выполняют из шамотного доменного кирпича класса ША с притеской к периферийным холодильникам и заполнением зазоров между кладкой, холодильниками и кожухом раствором, на котором ведется кладка.

Шахты доменных печей нередко являются наименее стойкой частью футеровки и обуславливают длительность кампании. В практике применяют футеровки шахт трех типов: толстостенные (800—1200 мм); среднестенные (600—1050 мм), тонкостенные (250—700 мм). Кладка заключена в металлический кожух и охлаждается с помощью горизонтальных или вертикальных холодильников.

Футеровку шахты и распара производят шамотным доменным кирпичом класса ША, многошамотным или муллитокремнеземистым на связке из шамотных мертелей. Все швы (радиальные, вертикальные и кольцевые) в смежных рядах выполняют вразбежку. Зазор в области распара и шахты между холодильниками и кладкой заполняют углеродистой набойкой.

Кислородные конвертеры

Основными причинами износа рабочего слоя футеровки конвертеров является химическое разъедание ее шлаком и механическое разрушение вследствие напряжения, вызванного загрузкой шихты и интенсивной циркуляцией расплава. Наибольшему износу подвергается цилиндрическая часть футеровки в зоне опорного кольца, особенно в области цапф, и отдельные участки футеровки горловины, определяемые эксплуатационными условиями загрузки шихты и слива металла. Износ футеровки, помимо основных причин, зависит от ряда одновре-

менно воздействующих факторов. Так на стойкость футеровки отрицательно влияет повышенное содержание кремния в жидком чугуне и оксидов железа и фосфора в шлаке, а также перегрев металла в конце процесса продувки. Значительному износу подвергается футеровка горловины вследствие разрушающего воздействия на нее пыли, выносимой конвертерными газами, и выбросов расплава при продувке. Большое влияние на службу футеровки горловины оказывает утечка воды из фурмы и камина. Увеличение емкости конвертеров привело к изменению их конструкции. Для больших конвертеров создают жесткую конструкцию корпуса, выполненную из сварных стальных листов толщиной до 100 мм с ребрами жесткости.

Футеровку конвертеров выполняют двухслойной. Постоянный (арматурный) слой толщиной 230—250 мм делают из хромитопериклазового огнеупора. Зазоры между ним и кожухом заполняют смолодоломитовой набивкой. Рабочий (внутренний) слой футеровки имеет толщину 700—800 мм и выполняется из необожженного смолодоломитопериклазового или смолодоломитового кирпича. Обжиг рабочего слоя происходит непосредственно в конвертере при температуре 1100—1200 °С. При коксовании смолы, входящей в состав огнеупора, кладка упрочняется, благодаря образованию при высоких температурах коксового сростка. Образующийся при нагреве огнеупора оксид углерода СО препятствует проникновению шлака в поры огнеупора. Кладку рабочего слоя выполняют в перевязку, а по толщине она сбалансирована по скорости износа, т. е. в местах наибольшего износа кладку выполняют большей толщины. Участки футеровки, подверженные интенсивному механическому износу (верх горловины и днище), выполняют из периклазошпинельного огнеупора.

Мартеновские печи

Конструкция мартеновских печей зависит от емкости печи, вида процесса, применяемого топлива. Увеличение емкости печей и интенсификации процесса путем применения кислорода повысили требования к стойкости футеровки печей.

Мартеновская печь состоит из верхнего и нижнего строений. К верхнему строению относятся — рабочее пространство печи, головки и вертикальные каналы; к нижнему — шлаковики, регенераторы, борова. Наиболее ответственной частью является рабочее пространство, в котором развиваются высокие температуры (1600—1800 °С) и совершается технологический процесс.

Футеровка рабочего пространства состоит из кладки пода, передней и задней стенок и свода.

Основными причинами износа футеровки являются высокая температура, химическое воздействие на кладку шлака и запыленной газовой среды, термические удары при загрузке холодной шихты.

Подину печи делают многослойной. На нижний (опорный) металлический лист (20—30 мм) кладут листы асбеста (30—50 мм). Затем (на малых печах) — 1—2 ряда шамотного кирпича и несколько рядов магнезиальнопериклазовой кладки (сначала на ребро и последние ряды — на торец). В крупных печах на асбест сразу выкладывают периклазовую кладку. Периклазовый огнеупор кладут насухо с просыпкой швов порошком. При кладке обязательно предусматривают температурные швы. Рабочий слой подины делают монолитным путем наварки или набивки его магнезитовым порошком. Толщина этого слоя 200—300 мм. Общая толщина пода 1000—1200 мм. Под имеет наклон к средней части как в продольном, так и в поперечном сечении. Под и откосы образуют ванну. Задняя и передняя стенки служат в тяжелых условиях, так как они испытывают воздействие шлака, факела и воздуха, проникающего в печь через рабочие окна. Для повышения стойкости и облегчения их заправки стены выполнены с наклоном в сторону рабочей площадки — передняя на 10—15°, задняя на 45—50°. Передняя стенка ослаблена наличием рабочих окон. Простенки между ними (столбики) выкладывают из периклазового и периклазохромитового кирпича с интенсивным испарительным охлаждением. Задняя стенка для уменьшения потерь тепла частично изолирована легковесным шамотным кирпичом.

Свод печи — одна из наиболее ответственных частей футеровки. Его стойкость часто определяет длительность кампании печи. Свод выкладывают из специального периклазохромитового (ПХС) или периклазошпинелидного (ПШСП)

кирпича. В процессе службы в кирпиче образуются зоны, имеющие различные физические свойства, вследствие чего возникают напряжения, приводящие к разрушению кирпича.

Для улучшения службы свода применяется конструкция распорно-подвесного свода. Между кирпичами ставят прокладки (железные пластины толщиной 0,5—1,5 мм), кирпичи соединяют штырями. Прокладки и штыри, свариваясь с кирпичами свода, образуют монолит. Блоки кирпичей свода подвешивают к металлическим угольникам, которые в свою очередь тягами подвешиваются к каркасу печи. У передней и задней стенок свод опирается на водоохлаждаемые подпятовые балки. Головки и вертикальные каналы выкладывают из периклазохромитового кирпича. Им же футеруют и стенки шлаковиков. Снаружи шлаковики имеют динасовую кладку. Надземная часть шлаковиков и регенераторов заключена в стальной кожух (5—6 мм). Верхние ряды насадок выкладывают из динасового, форстеритового, термостойкого периклазошпинелидного или муллитокремнеземистого кирпича. Средние и нижние ряды — из шамотного кирпича. В боровых температура продуктов сгорания обычно не превышает 700 °С, поэтому для их футеровки применяют шамотный огнеупор с наружной облицовкой из красного кирпича.

Электрические дуговые печи

Отдельные части футеровки — подина, стены, свод, работают в различных условиях. В наиболее тяжелых условиях находятся свод и стенки печи. Футеровка свода и верхней части стен подвергается значительному перегреву за счет лучистой энергии дуги, химическому воздействию печных газов, содержащих оксиды железа и шихтовую пыль, а также резким колебаниям температуры при загрузке шихты. Подина и шлаковый пояс испытывают механическое напряжение и химическое воздействие расплавленного металла и шлака. Подину основной печи выполняют трехслойной. Внутренний, рабочий, слой монолитный изготавливают набивкой из периклазового порошка. Толщина 150—180 мм. Далее идет периклазовая кладка 4—5 рядов, общей толщиной 460—575 мм. За периклазом выполнена кладка из двух рядов на плашку шамотного кирпича, общей толщиной 130 мм, покоящегося на слое шамотной засыпки толщиной 20 мм. Под засыпкой на металлический кожух печи уложен асбестовый картон толщиной 20 мм. Общая толщина подины около 900 мм. Стойкость подины зависит от размера печей и колеблется в пределах 1500—5000 плавов.

Стены выполняют из большемерного периклазохромитового кирпича. Стойкость стен 100—200 плавов. Свод для основных печей набирают из термостойкого периклазохромитового кирпича толщиной 300 мм. Отношение стрелы подъема к диаметру свода 1 : 7. Стойкость свода 75—150 плавов.

Иногда для кладки верха свода дуговых печей применяют муллитокремнеземистую массу, а периферийные кольца кладут из безобжиговых хромитопериклазовых изделий.

Отражательные печи

Отражательная печь для плавки медных руд представляет собой прямоугольную горизонтальную камеру, футерованную в зависимости от состава шихты кислыми или основными огнеупорными материалами. На одном торце печи установлены горелки, работающие на природном газе, газо-мазутном топливе или на угольной пыли. Загрузка шихты (концентрата) производится через свод на откосы печи. При расплавлении шихты происходит расплавление жидкой ванны на два слоя. Нижний слой — штейн, содержащий сульфиды железа FeS и меди Cu₂S. Кроме них, содержатся сульфиды цинка, свинца, никеля, оксиды железа и другие соединения. Верхний слой — шлаки, содержащие оксиды железа, кальция, алюминия и кремния, имеющие температуру плавления 1100—1250 °С. Атмосфера в рабочем пространстве слабоокислительная. Температура газов в середине печи 1400—1350 °С, вблизи горелок 1500—1650 °С и в конце печи 1250—1300 °С. Наибольшему износу подвергается футеровка в районе шлакового пояса и кладка свода вблизи горелок.

На бетонном фундаменте печи выполняют кладку в несколько рядов из ди-насового или шамотного кирпича. По ней, на толщину 1—2 м, набивают кремне-земистый или магнезиально-периклазовый под. Или выполняют периклазовую кладку на толщину около 1 м, а затем делают набивку из периклазовой или периклазохромитовой массы на толщину 300—400 мм. Боковые стены футеруют периклазохромитовым кирпичом. В нижней части стены значительно толще, чем вверху, у свода. В районе шлакового пояса стены иногда покрывают защитной обмазкой. Выше уровня шлака стены футеруют периклазохромитовым огнеупо-ром. Отверстия в кладке для выпуска шлака и штейна футеруют специальными периклазовыми или периклазохромитовыми изделиями. Своды делают подвесной конструкции из основных периклазохромитовых изделий.

4. Футеровка нагревательных печей

Нагревательные колодцы

Причиной разрушения футеровки нагревательных колодцев является высокая температура (1300—1400 °С), химическое воздействие окалины и механический износ при загрузке слитков. Крышка и верхняя часть стен испытывают термиче-скую нагрузку, связанную с резкими сменами температур при загрузке и вы-грузке слитков. Большое влияние на работу рекуперативного нагревательного колодца оказывает служба керамических рекуператоров, основным недостатком которых является их низкая герметичность и засорение верхних рядов запылен-ными газами, вследствие чего происходит образование внутри труб нефелина ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), а также деформация верхних рядов и растрескивание тру-бок, из-за различного термического расширения деформированного и недефор-мированного слоев. Каркас нагревательных колодцев стоечного типа с облицов-кой, выполненной из листа толщиной 6—8 мм. Подина опирается на лист, покоя-щийся на двутаврах, что обеспечивает свободную циркуляцию воздуха и повы-шает таким образом, срок службы пода. Подину выкладывают обычно в три слоя, не считая асбеста, положенного на металлический лист. Рабочий слой выполняют из периклазовых или хромитопериклазовых блоков; вторым слоем кладут шамот-ный кирпич, внешний теплоизоляционный слой выполняют из диатомитового кирпича или шамотного легковеса.

При жидком шлакоудалении подину выкладывают с уклоном к шлаковой летке. При сухом шлакоудалении на рабочий хромитопериклазовый слой насы-пают слой мелкого коксика толщиной 200—250 мм, который впитывает окалину и через 5—6 всадов удаляется вместе с ней через специальные отверстия в поду колодца.

Внутреннюю поверхность стен рабочего пространства, исходя из условий стойкости, делают выпуклой наружу. Стрела прогиба выбирается в зависимости от длины стен и равна 150 мм на 5 м длины. Стены, также как и под, выполняют трехслойными. Рабочий слой в нижней части, в связи с возможным разрушением окалиной (на высоту около 1 м от пода), делают из хромитопериклазовых блоков. Среднюю и верхнюю части стен футеруют динасовыми блоками. Замена кладки из динасового кирпича на кладку из динасовых блоков увеличила стойкость стен более чем в два раза. Второй слой выполняют из шамотного огнеупора, а третий, теплоизоляционный — из диатомитового кирпича. Интенсивнее всего стены изна-шиваются на том уровне, где опираются слитки. В связи с этим выполняют вы-ступ кладки, т. е. делают утолщение. Выступ выкладывают из динаса, хромито-периклаза или муллитокремнеземистого огнеупора.

Крышки применяют с арочной футеровкой или с подвесным сводом. Футе-ровку выполняют из муллитокремнеземистого кирпича, обладающего стойкостью к растрескиванию. В последние годы футеровку часто делают из огнеупорного бетона. В керамических рекуператорах верхние и нижние ряды набирают из карбо-шамотных трубок, обладающих высокой огнеупорностью, строи-тельной прочностью и термостойкостью, остальные ряды — из шамотных трубок.

✓ Проходные нагревательные печи

Выбор огнеупоров для футеровки нагревательных печей зависит от температуры нагрева, количества образующейся окалины, механического воздействия нагреваемого металла.

Футеровку стен и свода выполняют из шамота высокого класса. Стены делают двухслойными. Наружный изоляционный слой из диатомитового кирпича. Свод при ширине печи более 4 м делают подвесным из специального фасонного огнеупора. Рабочий слой монолитного пода и пода в томильной зоне футеруют огнеупором, не взаимодействующим с окалиной, — тальковым, периклазовым или хромитопериклазовым. Вторым слоем кладут шамотный огнеупор и затем слой тепловой изоляции — легковесный шамот.

Глава 14

МЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ПЕЧЕЙ

1. Печные шагающие конвейеры

В печах с шагающим конвейером нагреваемые изделия перемещаются за счет периодического переключивания или перекатывания их подвижными балками. Различают три способа перемещений (рис. 14-1).

Первый и наиболее распространенный способ (рис. 14-1, а) состоит в том, что нагреваемые изделия 1 транспортируют через печи с помощью одной или нескольких подвижных балок 2, перемещаемых относительно стационарного пода печи или неподвижных балок 3. Подвижные балки перемещаются в вертикальной плоскости по траектории в виде прямоугольника.

Длительность цикла $t_{ц}$ перемещения изделия в печи на один шаг S равна сумме времени перемещения подвижных балок

$$t_{ц} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_{п},$$

где t_1 — время перемещения подвижных балок вверх до уровня выше неподвижных балок с подхватом нагреваемых изделий; t_2 — время передвижения подвижных балок вместе с нагреваемыми изделиями вперед на один шаг S ; t_3 — время опускания подвижных балок до уровня ниже неподвижных балок с оставлением на них нагреваемых изделий; t_4 — время передвижения подвижных балок назад на один шаг S к исходному положению; $t_{п}$ — длительность паузы между циклами. При такой схеме перемещения нагреваемых изделий ритм выдачи превышает 20 с.

Второй способ (рис. 14-1, б) заключается в том, что перемещение нагреваемых изделий через печь происходит при помощи двух групп I и II подвижных балок. Обе группы балок перемещаются в вертикальных плоскостях по прямоугольным траекториям, но сдвинуты по фазе на 180° . Если I группа балок движется с нагреваемыми изделиями вниз, то II группа движется навстречу вверх и на полпути происходит переключивание нагреваемых изделий в балок I группы на балки II группы. Затем балки рас-

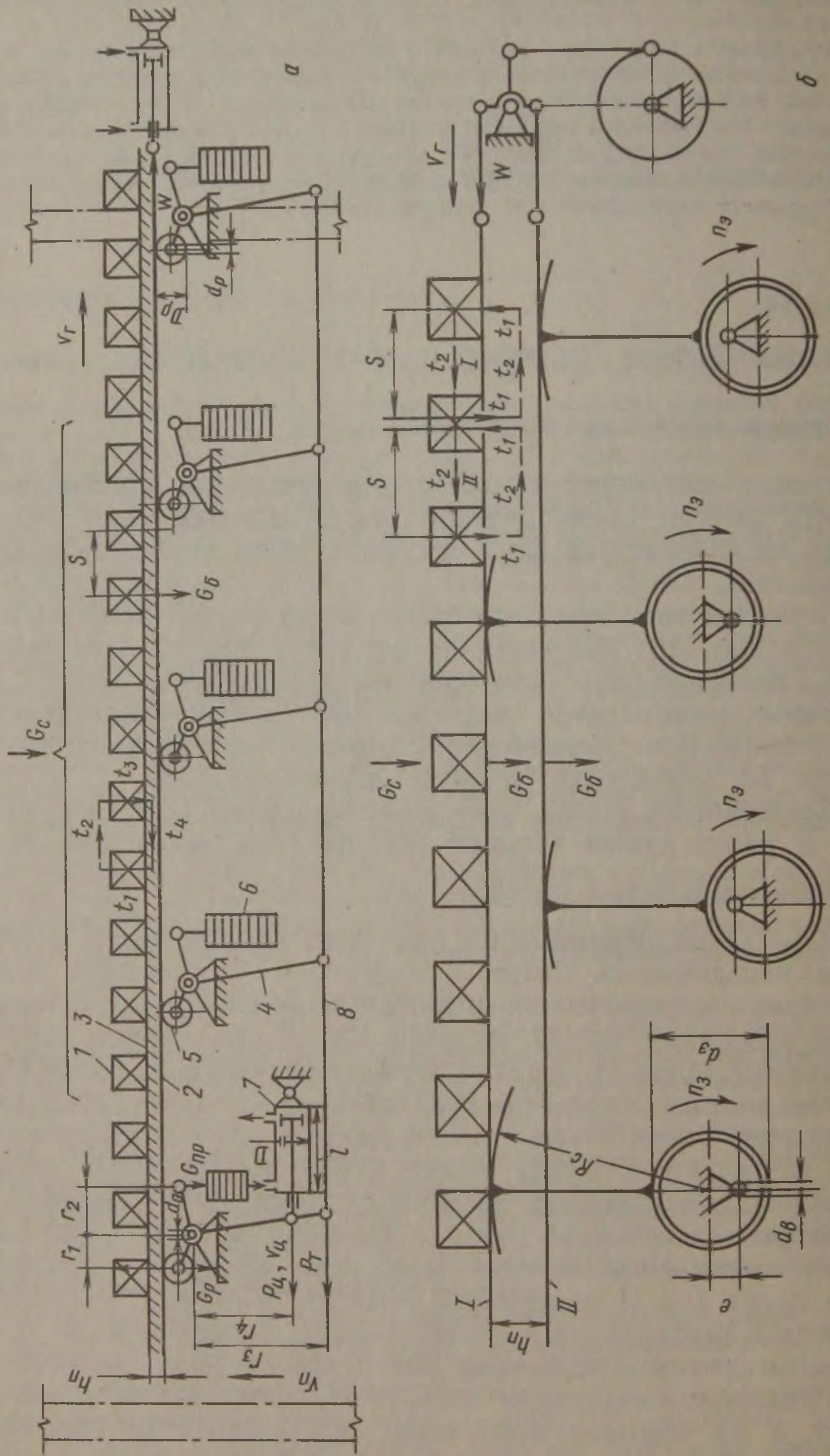


Рис. 14-1. Печные шагающие конвейеры для вагонок прямоугольного сечения:
 а — с одной группой подвижных балок; б — с двумя группами подвижных балок

ходятся и достигают крайних положений; II группа с изделиями — наивысшего, I — наинизшего. После этого балкам сообщают горизонтальные перемещения; группе II с изделиями справа налево на один шаг S , группе I — слева направо на один шаг. Затем балки снова начинают перемещения по вертикали навстречу друг другу, в результате чего изделия перекладываются с балок II группы на балки I группы и цикл на этом завершается.

При таком способе транспортирования длительность цикла

$$t_{\text{ц}} = t_1 + t_2 + t_{\text{п}},$$

где t_1 — время перемещения балок в вертикальном направлении; t_2 — то же, в горизонтальном; $t_{\text{п}}$ — длительность паузы между циклами. Перемещение нагреваемых изделий по второму способу позволяет сократить ритм выдачи (< 20 с), т. е. повысить производительность печи.

Третий способ применяют в печах для нагрева круглых заготовок (рис. 14-2), где печной шагающий конвейер состоит из двух групп профильных балок: неподвижных I и подвижных 2, которые перемещаются в вертикальной плоскости по эллиптической траектории при помощи двух эксцентрико-кулисных приводов 3 и перекладывают круглые заготовки из одного ручья в другой на величину шага S .

Полный ход подвижных балок по вертикали обычно принимают в пределах 70—200 мм в зависимости от длины печи и изделий. Ход 70 мм выбирают для печей длиной 10—15 м и коротких изделий, когда не происходит их значительного коробления. Ход 200 мм принимают в печах длиной 20 м и более и при нагреве изделий длиной несколько метров, когда возможно влияние на ход изделий их коробления и неточности монтажа балок. Превышение подвижных балок уровня неподвижных обычно составляет соответственно 40 и 100 мм. Скорость перемещения балок по вертикали 0,01—0,03 м/с.

Ход балок по горизонтали принимают в зависимости от размеров изделий и их раскладки в печи. В печах с обычным режимом горизонтальный ход балок не превышает 600 мм, но иногда он бывает и несколько больше — до 850 мм. В тех случаях, когда необходимо быстро загрузить всю садку в печь и так же быстро ее выгрузить из печи, горизонтальный ход балок может быть значительным — 3,5—5,5 м. Скорость горизонтального перемещения балок составляет 0,025—0,060 м/с при ходе до 850 мм и 0,25 м/с—0,5 м/с при ходе 3,5—5,5 м.

Для механизмов подъема и передвижения балок применяют электрический или гидравлический привод, чаще индивидуальный на каждый механизм и реже — один общий. Конструктивно механизмы подъема выполняют по трем схемам: рычажные, эксцентриковые и клиновые.

Рычажные и эксцентриковые механизмы подъема применяют в печах с вертикальным ходом балок до 200 мм и при уравни-

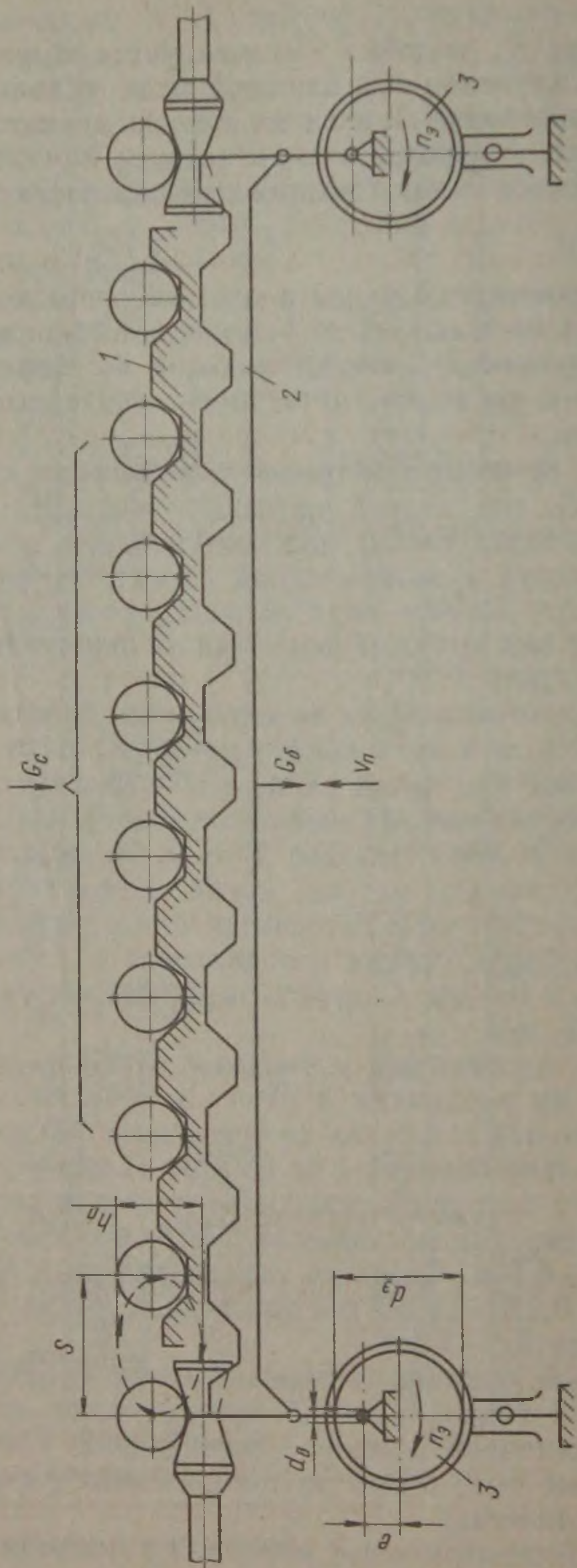


Рис. 14-2. Печной шагающий конвейер для заготовок круглого сечения

шивании системы балки—садка с помощью противовеса, что позволяет снизить мощность привода и обеспечить более равномерную его работу.

Клиновой механизм подъема рекомендуется применять при большой массе садки изделий в случае, когда уравновешивание системы не предусмотрено. Привод клинового механизма выполняют от электродвигателя с ременной передачей или от гидропривода. Преимущество клинового механизма — постоянство скорости подъема и расхода энергии.

Рычажный механизм подъема (см. рис. 14-1, а) одной подвижной балки включает несколько рычажных подъемников, каждый из которых состоит из трехплечего рычага 4, на одном плече которого находится ролик 5, воспринимающий вес балки и садки, на другом — противовес 6, на третье плечо воздействует усилие гидроцилиндра 7 через тягу 8. Суммарный момент (Н·м) такого механизма относительно оси рычагов определяется уравнением

$$\sum M = (G_c/z + G_6 + z_1 G_p) r_1 + (G_6 + G_c/z + G_{пр} z_1) \mu d_0/2 - z_1 G_{пр} r_2,$$

где G_6 , G_c , G_p , $G_{пр}$ — соответственно веса балки, садки, ролика и противовеса, Н; r_1 , r_2 — соответственно плечи рычагов ролика, балки и садки, противовеса, м; d_0 — диаметр цапфы оси трехплечего рычага, м; $\mu = 0,01$ — коэффициент трения в подшипниках оси трехплечего рычага; z , z_1 — соответственно число подвижных балок и рычажных подъемников.

Усилия P_T на тяге механизма подъема и $P_ц$ на штоке гидроцилиндра:

$$P_T = \sum M / r_3 \eta_p \text{ и } P_ц = P_T r_3 / r_4,$$

где r_3 , r_4 — плечи рычагов и гидроцилиндра; η_p — к. п. д. рычажного механизма подъема.

Скорость $v_ц$ и ход l штока гидроцилиндра находят из соотношений

$$v_ц = v_{пр} r_4 / r_1 \text{ и } l = h_{пр} r_4 / r_1,$$

где $v_{пр}$ — выбранная скорость подъема балок, м/с; $h_{пр}$ — выбранный ход подъема балок, м.

По усилию $P_ц$ и ходу l выбирают гидроцилиндр, внутренний диаметр которого определяется зависимостью

$$D = \sqrt{4000 P_ц / \pi [\rho]} = 35,6 \sqrt{P_ц / [\rho]},$$

где $[\rho]$ — давление рабочей жидкости, развиваемое насосом, Па.

Производительность насоса (м³/с) зависит от площади и скорости движения поршня, которую несколько увеличивают с учетом неизбежных утечек, сжатия жидкости и упругости гидравлической системы $Q_{нас} = 1,2 v_ц \pi D^2 / 4$.

По величинам $Q_{\text{нас}}$ и $[p]$ подбирают тип насоса. По конструкции рабочего органа насосы разделяют на шестеренные, шиберные (лопастные) и поршневые. Последние в свою очередь делят на аксиально-поршневые, радиально-поршневые и поршневые эксцентрикковые.

Шестеренные и шиберные насосы применяют для рабочих давлений 12—14 МПа; аксиально- и радиально-поршневые — для давлений 20—30 МПа и поршневые эксцентрикковые — для давлений 50 МПа и выше. В качестве рабочих жидкостей и гидроприводах используют минеральные масла с вязкостью при 50 °С от $1 \cdot 10^{-6}$ до $2,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Мощность (кВт), необходимая для привода насосов всех подвижных балок z ,

$$N = z [p] Q_{\text{нас}} / 1000 \eta_{\text{н}} = z P_{\text{ц}} v_{\text{ц}} / 1000 \eta_{\text{р}} \eta_{\text{тр}} \eta_{\text{г}} \eta_{\text{н}},$$

где $Q_{\text{нас}}$ — производительность насоса, м³/с; $[p]$ — давление, Па; $P_{\text{ц}}$ — усилие гидроцилиндра, Н; $v_{\text{ц}}$ — скорость перемещения штока гидроцилиндра, м/с; $\eta_{\text{р}}$ — к. п. д. гидрораспределителя; $\eta_{\text{тр}}$ — к. п. д. трубопроводов от насоса до гидроцилиндра; $\eta_{\text{г}}$ — к. п. д. гидроцилиндра, равный примерно 0,95; $\eta_{\text{н}}$ — полный к. п. д. насоса, равный произведению объемного ($\eta_{\text{об}} \approx 0,9$) и механического ($\eta_{\text{мех}} \approx 0,8$) к. п. д.

В эксцентрикковом механизме подъема без уравнивания балок и садки суммарный момент на валу эксцентриков (см. рис. 14-2), Н·м

$$\sum M = (zG_{\text{б}} + G_{\text{с}}) e + \mu (zG_{\text{б}} + G_{\text{с}}) (d_{\text{в}} + d_{\text{э}}) / 2,$$

при полном уравнивании веса балок (см. рис. 14-1, б)

$$\sum M = G_{\text{с}} e + \mu (zG_{\text{б}} + G_{\text{с}}) (d_{\text{в}} + d_{\text{э}}) / 2,$$

где $G_{\text{б}}$, $G_{\text{с}}$ — соответственно вес одной подвижной балки и всей садки, Н; z — число подвижных балок; e — эксцентриситет эксцентрика, м; $d_{\text{в}}$, $d_{\text{э}}$ — соответственно диаметры вала и эксцентрика, м; $\mu = 0,01$ — коэффициент трения в подшипниках качения вала и эксцентрика.

Частота вращения эксцентрика, об/мин

$$n_{\text{э}} = 60 h_{\text{ц}} / v_{\text{ц}} = 2 \cdot 60 e / v_{\text{ц}},$$

где $h_{\text{ц}} = 2e$ — ход балок по вертикали, равный удвоенному эксцентриситету e , м; $v_{\text{ц}}$ — средняя скорость подъема, м/с.

Тогда расчетная мощность электродвигателей привода механизма подъема будет равна, кВт:

$$N_{\text{р}} = \sum M n_{\text{э}} / 1000 \eta_{\text{м}},$$

где $\eta_{\text{м}}$ — к. п. д. механических передач от электродвигателя до эксцентриков.

В клиновом механизме подъема (рис. 14-3) подвижная балка l с садкой, лежащей на выступах 4, перемещается на катках 5

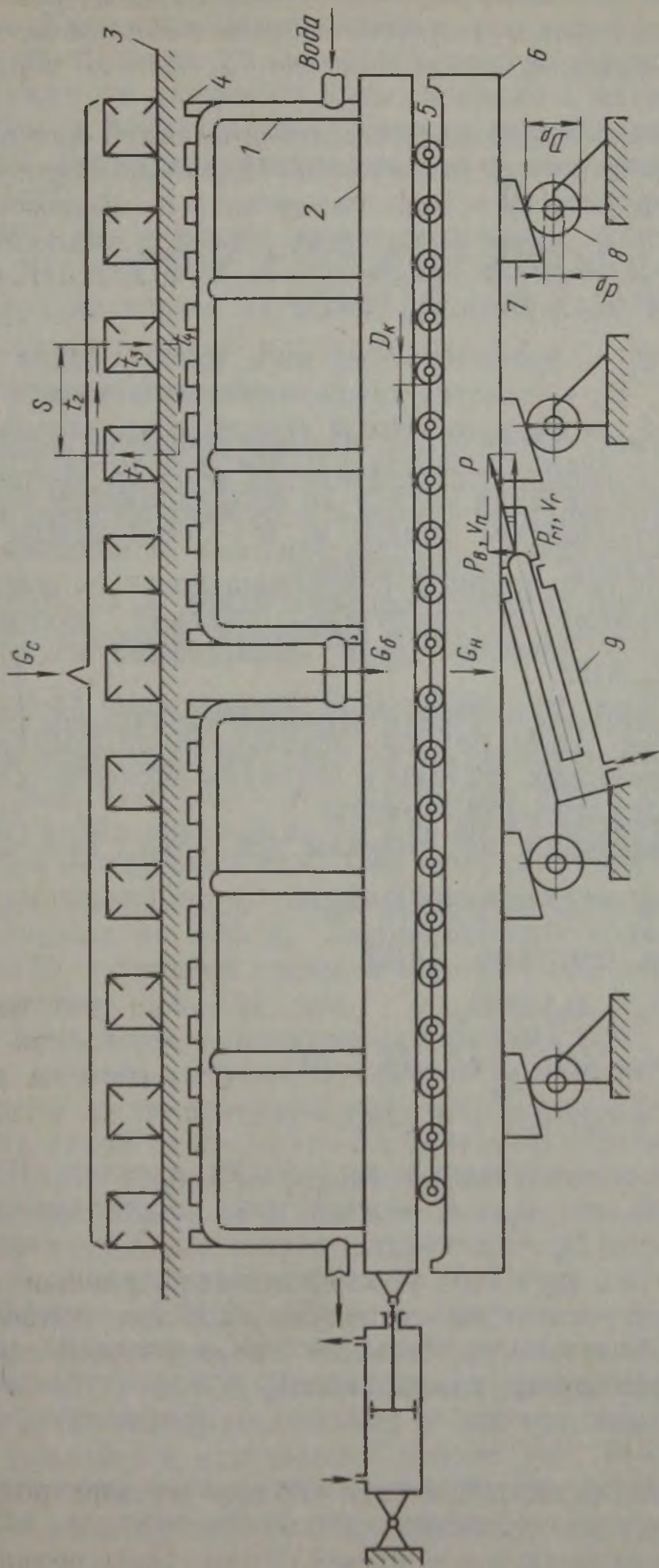


Рис. 14.3. Печной шагающий конвейер с двухсторонним нагревом изделий

по нижней раме 6, которая опирается клиньями 7 на стационарные ролики 8. Для подъема балки на нижнюю раму действует горизонтальное усилие плунжерного гидроцилиндра 9, которое преодолевает следующие сопротивления: от горизонтального перемещения основания 2 балки и садки на катках по нижней раме, от перекатывания клиньев нижней рамы с балкой и садкой по стационарным роликам и от подъема составляющей веса всей системы. Это усилие равно, Н

$$P_r = (zG_b + G_c) 2f/D_k + (zG_b + G_c + G_n) (\mu d_p + 2f)/D_p + (G_b + G_c + G_n) \operatorname{tg} \alpha,$$

где G_b , G_c , G_n — соответственно веса балки, садки и нижней рамы, Н; D_k , D_p — соответственно диаметры катков и опорных роликов, м; d_p — диаметр цапфы подшипника качения опорного ролика, м; z — число подвижных балок; $f = (8-10) 10^{-4}$ — коэффициент трения качения катков по направляющим нижней рамы и клиньев по опорным рамам, м; α — угол между наклонной плоскостью клина и горизонталью.

При заданной скорости подъема балок v_n ее горизонтальная составляющая $v_r = v_n \operatorname{ctg} \alpha$ и расчетная мощность привода $N = P_r v_r / 1000 \eta_m$ кВт.

В механизмах горизонтального перемещения балок различают следующие три схемы работы: перекатывание подвижных балок с садкой по роликам, каткам и секторам эксцентрика, при которых силы сопротивления равны:

при перемещении по роликам (см. рис. 14-1, а)

$$W = \beta (zG_b + G_c) (\mu d_p + 2f)/D_p,$$

по каткам (см. рис. 14-3)

$$W = \beta (zG_b + G_c) 2f/D_p$$

и по секторам (см. рис. 14-1, б)

$$W = (zG_b + G_c) (\mu d_a + 2f)/2R_c,$$

где G_b , G_c — соответственно веса балки и садки, Н; z — число подвижных балок; d_p , d_a — диаметры подшипников ролика и эксцентрика, м; D_p — диаметр ролика, м; R_c — радиус сектора эксцентрика, м; $\mu = 0,01$ — коэффициент трения в подшипниках роликов и эксцентрика; $f = (8 \div 10) 10^{-4}$ — коэффициент трения качения балок по роликам, каткам и секторам, м; $\beta = 2,5 \div 3,5$ — коэффициент, учитывающий дополнительные сопротивления от трения катков и роликов о направляющие элементы балок.

По выбранной скорости горизонтального перемещения балок с садкой v_r находят расчетную мощность привода, кВт

$$N_p = W v_r / 1000 \eta_m.$$

Установочную мощность электродвигателей принимают в зависимости от режимов работы: для механизмов подъема $N_y = N_p$, для механизмов передвижения и поворота $N_y = k_p N_p$, где $k_p = 2,25; 1,6$ и $1,25$ соответственно для режимов Л и С; Т, ВТ.

Для привода механизмов шагающих подов печей принимают крановые электродвигатели переменного тока с фазовым ротором серии МТ, МТВ, МТМ и с короткозамкнутым ротором серии МТК, МТКВ и МТКМ, а также электродвигатели постоянного тока серии МП, ДП и КПДН. В отдельных случаях возможна установка электродвигателей из единой серии АОС и АОП.

2. Печные цепные конвейеры

Печной цепной конвейер состоит из цепного тягового и грузонесущего органа (рис. 14-4), который с помощью приводной 4 и натяжной 5 станции движется вместе с нагреваемыми изделиями по направляющим в горизонтальных и вертикальных печах. В зависимости от положения цепей относительно пода или свода печи различают печные конвейеры с подовыми цепями (рис. 14-4, а), с подподовыми (рис. 14-4, б) и надсводовыми (рис. 14-4, в).

В печных конвейерах подовые цепи 1 с лежащими на них изделиями 2 в один или несколько рядов перемещаются по направляющим 3 пода печи (рис. 14-4, а). Число цепей может быть от двух для коротких изделий до 14 для длинных изделий (рельсы) с расстоянием между ними от 420 мм (сутунки, пакеты) до 1750 мм (рельсы) при температуре нагрева коротких изделий до 800—900 °С и длинных до 600 °С. Длина цепного конвейера составляет от 5 до 23 м с массой садки от 5 до 90 т при скорости движения в пределах 0,4—0,1 м/с.

Печные конвейеры с подподовыми цепями (рис. 14-4, б) применяют для нагрева сутунок и пакетов при полистной горячей прокатке листа до температуры 900—950 °С при длине конвейера до 25 м. При такой температуре нагреваемые изделия 2 лежат не на цепи 1, а на стойках б, прикрепленных к звеньям двух цепей, движущихся под подом печи. Стойки выведены в высокотемпературную зону печи через узкую щель в полу и возвышаются над уровнем кладки пода печи на 135—150 мм. При шаге цепи 150 мм шаг стоек составляет 300 мм, расстояние между цепями 420 мм, что позволяет размещать на стойках сутунки длиной и пакеты шириной 700—750 мм. Скорости перемещения подподовых цепей принимают в тех же пределах, что и для подовых цепей.

Печной конвейер с надсводовой цепью (рис. 14-4, в) представляет собою подвесную конструкцию. Перемещаемые изделия 2 размещаются на подвесках 3, подвешенных к кареткам б, движущимся по подвесному пути 7. Каретки с подвесками для изделий прикреплены к тяговой цепи 1 и вместе с нею движутся по посто-

янной трассе подвесных путей, часть которых проходит над сводом печи. Через узкую щель в своде печи подвески с изделиями вводятся в печи и также выводятся из нее. Для снижения потерь тепла узкая щель закрывается сверху уплотняющей чешуйчатой лентой из стали 1Х18Н9, которая движется вместе с цепью. Такие печи применяют для отжига эмали при температуре 950 °С. Скорость движения цепи с изделиями регулируют в пределах 0,015—0,06 м/с.

Мощность привода цепного печного конвейера находят методом тягового расчета, согласно которому контур конвейера разбивают точками на прямолинейные и криволинейные участки. Разбивку начинают от точки *a* (см. рис. 14-4, б) сбегания цепи с приводной звездочки и продолжают по ее ходу на обратном участке, затем переходят на рабочий участок и заканчивают в точке *d* набегания цепи на приводную звездочку.

Подробный тяговый расчет по отдельным участкам конвейера при числе цепей $z_{ц}$ и рядов нагреваемых заготовок $z_{р}$, погонных массах цепей $q_{ц}$ и нагреваемого металла $q_{м}$, коэффициентах сопротивления движению цепи на рабочем участке ω' и на холостом ω'' сводится к составлению и решению следующих уравнений:

$$S_a = z_{ц} R_{min};$$

$$S_b = S_a + W_{a-b} = S_a + z_{ц} q_{ц} L \omega'';$$

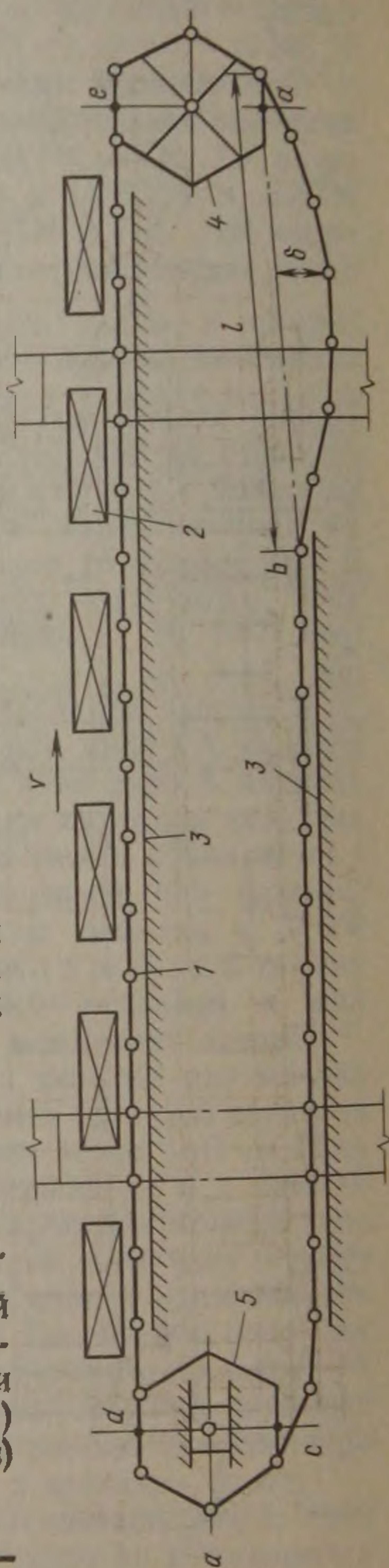
$$S_c = S_b + W_{b-c} = k S_b;$$

$$S_d = S_c + W_{c-d} = S_c + (z_{ц} q_{ц} + z_{р} q_{м}) L \omega'.$$

В расчетах принимают натяжение одной цепи в точке сбегания с приводной звездочки $S_{min} = 0,5—1$ кН, а при наличии провисающего участка это натяжение (Н) определяют по формуле (см. рис. 14-4, а)

$$S_a = S_b = q_{ц} l^2 / 8\delta,$$

где $q_{ц}$ — погонный вес цепи, Н/м; δ — стрела провисания цепи, м; l — длина провисающего участка, м.



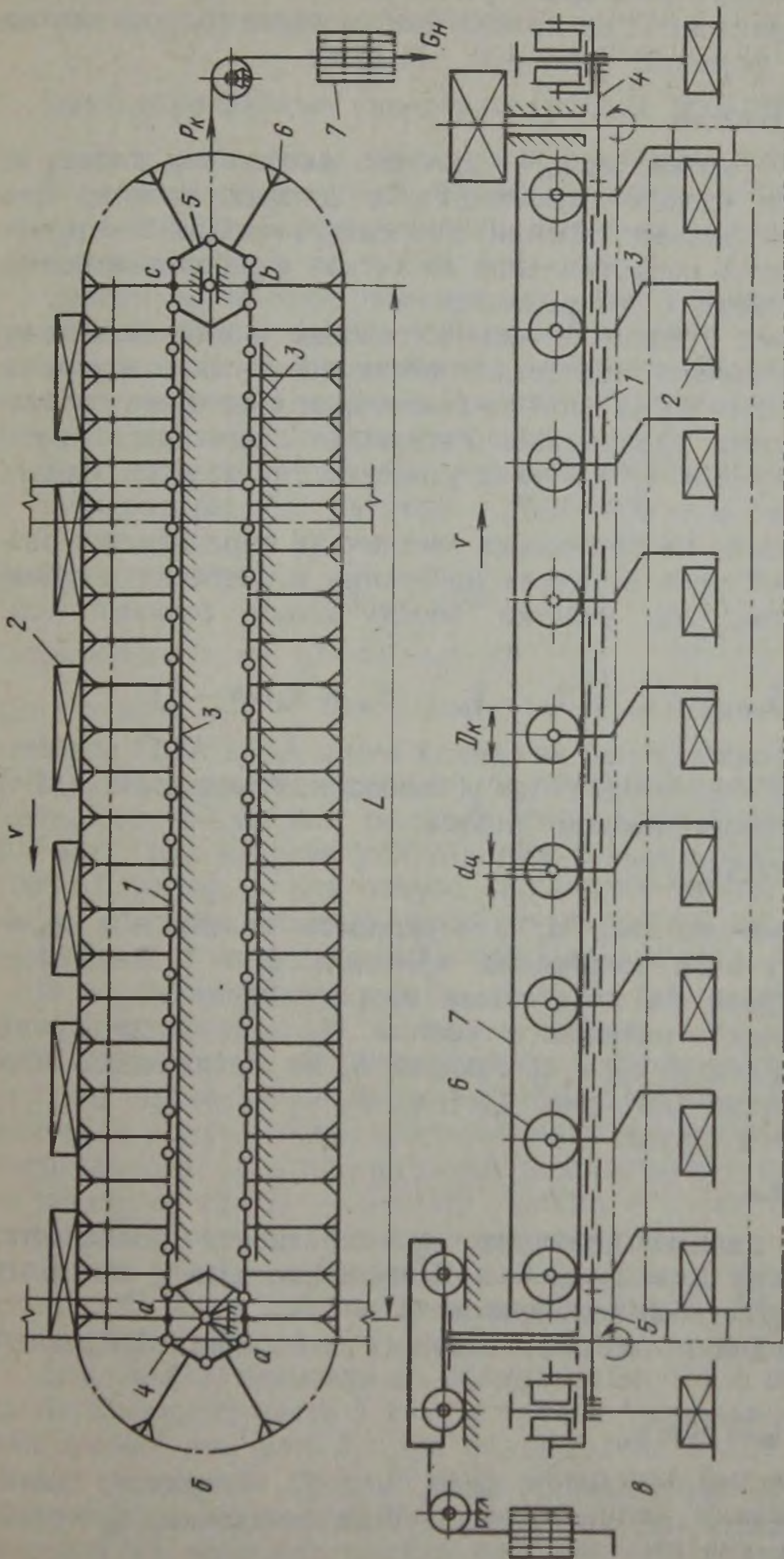


Рис. 14-4. Печные целные конвейеры

В случае перемещения цепи скольжением с коэффициентом трения μ коэффициент сопротивления будет равен для холодной цепи $\omega = \mu = 0,15 \div 0,25$ и для горячей цепи $\omega = \mu_1 = 0,3 \div 0,5$.

При перемещении цепи на катках коэффициент сопротивления определяют по формуле (см. рис. 14-4, а):

$$\omega = c(\mu d_{\text{ц}} + 2f)/D_{\text{к}},$$

где $D_{\text{к}}$ — диаметр катка, м; $d_{\text{ц}}$ — диаметр цапфы оси катка, м; μ — коэффициент трения скольжения в цапфах катков; $f = 0,001$ м — коэффициент трения качения; $c = 1,5 \div 2$ — коэффициент добавочного сопротивления на катках с ребордами вследствие трения реборд о направляющие.

На поворотных пунктах в виде натяжных и направляющих звездочек сопротивление вследствие жесткости тягового элемента при изгибе и выпрямлении цепи на звездочках и от трения в подшипниках звездочек увеличивает натяжение сбегающего конца цепи на величину $k = 1,05 \div 1,1$ в зависимости от угла обхвата звездочки цепью $\alpha = 90^\circ - 180^\circ$.

Тяговое усилие на приводных звездочках определяется разностью натяжений цепи в точках набегания и сбегающего в сумме с сопротивлениями на участке между этими точками (см. рис. 14-4, б)

$$W_0 = S_{\text{вб}} - S_{\text{об}} + W_{\text{пр}} = S_{\text{д}} - S_{\text{с}} + (S_{\text{д}} + S_{\text{с}})(k - 1).$$

Выбор электродвигателей из единой серии АО и АОП для печных конвейеров производят по установочной мощности (кВт) с некоторым коэффициентом запаса

$$N_{\text{г}} = k_{\text{з}} W_0 v / 1000 \eta_{\text{м}},$$

где W_0 — тяговое усилие, Н; v — скорость цепей, м/с; $\eta_{\text{м}}$ — к. д. п. передаточного механизма привода; $k_{\text{з}} = 1,15 \div 1,25$ — коэффициент запаса на неучтенные сопротивления.

Величина общего натяжного усилия $P_{\text{н}}$ составляет сумму натяжений набегающей $S_{\text{б}}$ и сбегающей $S_{\text{с}}$ на натяженные звездочки ветвей цепи (см. рис. 14-4, б) $P_{\text{н}} = S_{\text{б}} + S_{\text{с}}$.

Вес натяжного груза

$$G_{\text{н}} = P_{\text{н}} / z_{\text{ц}} i_{\text{п}} \eta_{\text{п}},$$

где $z_{\text{ц}}$ — число цепных контуров; $i_{\text{п}}$ — кратность полиспаста; при его отсутствии $i_{\text{п}} = 1$; $\eta_{\text{п}}$ — к. п. д. полиспаста и отводных блоков; при отсутствии полиспаста $\eta_{\text{п}} = 0,95$.

Частоту вращения (об/мин) ведущих звездочек определяют по формуле

$$n_{\text{зв}} = 60v / \pi D_0 = 60v / z t_{\text{ц}},$$

где v — скорость перемещения цепи, м/с; D_0 — диаметр делительной окружности, м; z — число зубьев звездочки; $t_{\text{ц}}$ — шаг цепи.

По частоте вращения вала выбранного электродвигателя n_m находят общее передаточное число привода $i_{\text{общ}} = n_m/n_{\text{зв}}$, а по нему принимают из справочника редуктор, после чего производят компоновку привода конвейера.

3. Печные роликовые конвейеры (печные рольганги)

В печах с роликовым конвейером нагреваемые изделия перемещаются качением по стационарным роликам. Ролики приводятся во вращение двигателем и сообщают движение лежащим на них изделиям трением.

Основными параметрами печных роликовых конвейеров являются (рис. 14-5, а): шаг между роликами t , диаметр роликов D_p , длина печи L_p и скорость перемещения изделий v . Шаг между роликами зависит от длины нагреваемых изделий, их массы и прочности, а также от температуры нагрева.

При нагреве листов шаг роликов зависит от толщины листов и температуры их нагрева:

Температура нагрева, °С	1000	1000	1000	1000—1200	1000—1200	1000—1200
Толщина δ листа, мм	1,5—4,0	4,0—8,0	8,0—12,0	2,0—6,0	6,0—10,0	≥ 10
Шаг t роликов, мм	400	450	600	400	450	≥ 500

При нагреве под термическую обработку прутков и труб диаметром 10—60 мм шаг роликов принимают соответственно 400—600 мм. При нагреве рельсов под закалку шаг роликов равен 1000—1200 мм, а под отпуск 1500—1800 мм. В зависимости от массы и длины изделий, уложенных на поддоны, шаг роликов принимают в пределах 400—1000 мм.

В секционных печах (рис. 14-5, б), где температура нагрева составляет 1300—1500 °С, длина секции $L_c = 1500 \div 1750$ мм и длина тамбура L_t (промежутка между секциями) 350 мм, шаг роликов может быть в пределах 1150—2100 мм. При этом шаг роликов не должен быть кратным шагу винтообразного движения нагреваемого изделия, который подсчитывают по формуле $S = \pi D \operatorname{ctg} \alpha$, где D — диаметр ролика в точке соприкосновения с изделием; α — угол установки роликов.

Длина печей с небольшой массой садки из легких изделий достигает 30—50 м при числе роликов в них 50—80 и шагом между ними 400—1000 мм.

Основными элементами ролика (рис. 14-5, г) являются его цилиндрическая часть 1 в виде трубы, называемой бочкой, опорные цапфы или вал 2. Для большинства изделий, поверхность бочки выполняют гладкой цилиндрической по всей длине. При перемещении по роликам сортового проката, труб, рельсов или изделий на поддонах ролики снабжают по краям ограничитель-

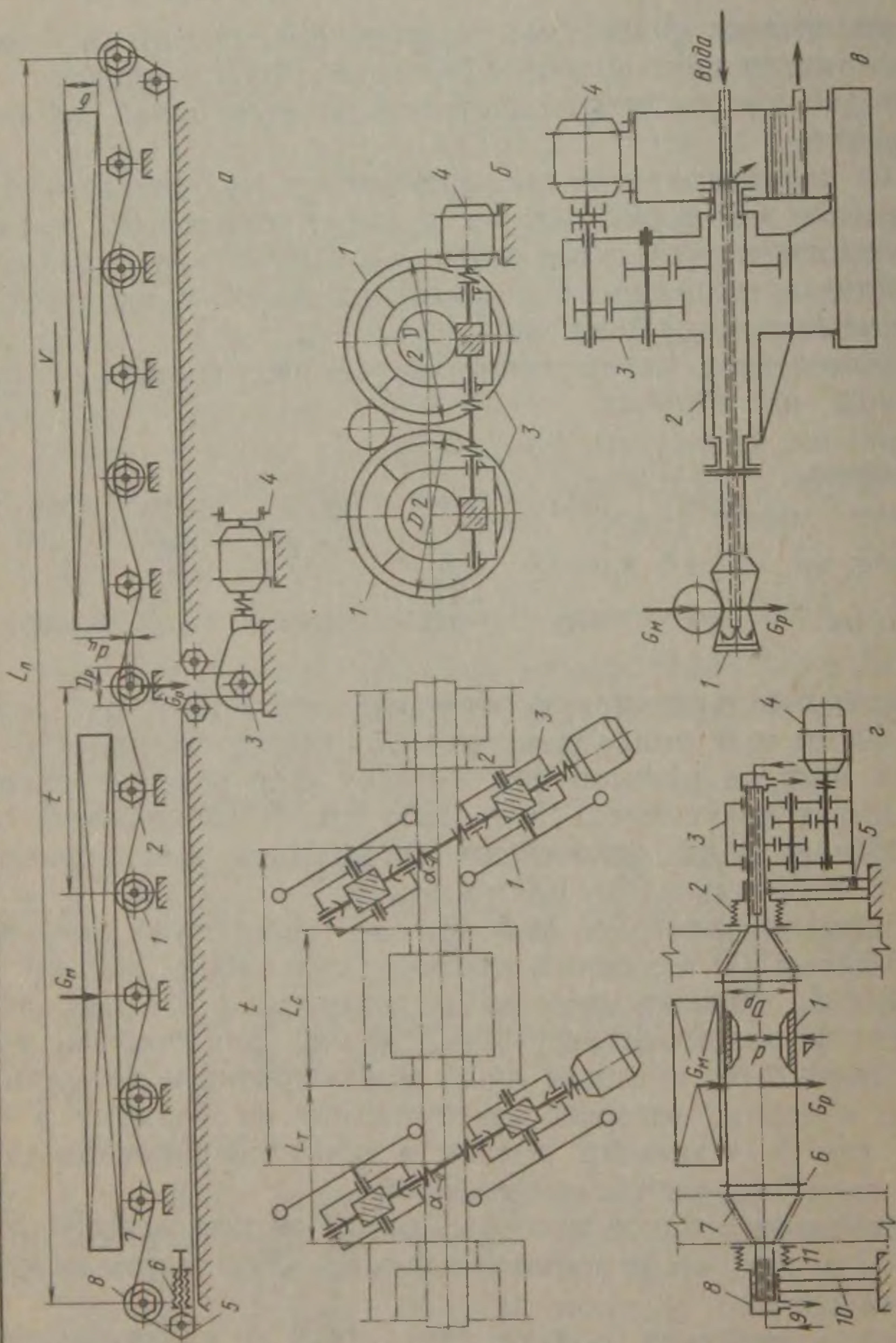


Рис. 14-5. Печные роликовые и дисковые конвейеры: а — с групповым приводом роликов; б — с индивидуальным приводом ролика; в — с индивидуальным навесным приводом ролика; г — с индивидуальным приводом дисков; д — с индивидуальным приводом ролика

ными кольцами 6, препятствующими задеванию изделий за стены печи.

При температуре нагрева не свыше 900—950 °С применяют ролики с неохлажденной бочкой и приваренными на ее торцах цапфами, которые начинают охлаждать с температуры нагрева 600 °С и выше. Для охлаждения цапф водой в них сверлят тупиковые каналы, в которые вводят водоподводящие трубки 8, закрепленные вне ролика. По трубкам вода поступает самотеком внутрь цапфы и, возвращаясь к торцу цапфы, омывает вращающиеся стенки канала. Для сокращения потерь тепла охлаждаемую часть цапфы изолируют от раскаленной внутренней поверхности бочки экранами, приваренными внутри переходной 7 части цапфы.

При температуре нагрева изделий от 900—950 до 1150—1200 °С при большой ширине печи и перемещения тяжелых изделий применяют ролики с охлаждаемым валом. Охлаждение вала ролика производят водой, испарительным охлаждением и воздухом. При охлаждении вала водой ее подводят с одного конца и отводят с другого или подвод и отвод воды осуществляется с одной стороны (рис. 14-5, в), что сложнее конструктивно, но удобно для размещения водного хозяйства с одной стороны печи. Кольцевой зазор между валом и трубой должен быть не более 5—10 мм, что приводит иногда к случайным пережигам сечения зазора и разрывам струи воды. В связи с этим при значительных потоках тепла к водоохлаждаемому валу переходят от безнапорной подачи воды к подаче ее под давлением для надежного заполнения вала водой. Для этого на конце вала устанавливают узел подвода и отвода воды под давлением к вращающемуся ролику от стационарных труб, называемый вертлюгом 9 (рис. 14-5, г). Температура отходящей воды во всех системах охлаждения цапф, валов и бочек не должна превышать 50 °С.

Подшипники роликов размещают в литых корпусах двух типов: разъемных и неразъемных фланцевых. Разъемные корпуса подшипников устанавливают на балках 10 (рис. 14-5, г) и кронштейнах каркаса печи, неразъемные — на металлической обшивке печи. В последнем случае меньше вероятность заклинивания роликов в проемах печи из-за разницы в температурной деформации каркаса и обшивки печи, но необходимо предохранять корпус подшипника от перегрева, размещая на корпусе ребра для увеличения поверхности теплоотдачи или выполняя корпус с водяной рубашкой, экранирующей внутреннюю полость корпуса.

Для герметизации подшипникового узла в печах со взрывоопасной атмосферой корпус подшипника соединяют с каркасом печи сильфоном 11 (рис. 14-5, г). Выходы вала из корпуса подшипника тщательно уплотняют. Во внутреннюю полость корпуса подшипника заливают масло, которое поступает из бочки централизованной системы по принципу сообщающихся сосудов. Уровень смазки в каждом подшипнике контролируется маслоуказателем, установленным на корпусе подшипника.

В печных роликовых конвейерах ролики выполняют приводными от группового (рис. 14-5, а) или индивидуального привода (см. рис. 14-5, в). При этом скорости перемещения изделий роликами подразделяются на технологические и транспортные. Технологические скорости (0,1—0,01 м/с) определяются скоростью нагрева или длительностью цикла термической обработки, транспортные (1,0—2,0 м/с) — скоростью загрузки и выгрузки печи. Отношение между ними составляет 1 : 10, 1 : 20 и даже 1 : 100. По этой причине работа печных рольгангов происходит по следующим режимам: непрерывное вращение роликов в печи в одну сторону с одной скоростью и разными скоростями, прерывистое вращение роликов в одну сторону с остановками и с покачиванием роликов в обе стороны на 1,5—2,5 оборота. Последнее применяют для исключения захлаживания изделия по линии соприкосновения изделия с роликом и для исключения вероятности остаточного прогиба бочки ролика под влиянием длительно действующей односторонней нагрузки. При непрерывном вращении роликов в одну сторону переключают с транспортной скорости на «ползучую» технологическую скорость.

В качестве группового привода роликов 1 применяют цепной привод (рис. 14-5, а), состоящий из приводной цепи 2, охватывающей приводные 3, натяжные 5, отклоняющие 7 и ведомые 8 звездочки роликов. Отклоняющие ролики предназначены для увеличения угла обхвата цепью ведомых звездочек до 180°. Одна цепь может охватывать ведомые звездочки 50—80 роликов при небольшой массе садки из легких изделий. В печах с реверсивным вращением роликов приводной цепью соединяют попарно два соседних ролика, для чего на консольном валу всех роликов насажены по две ведомые звездочки. Приводные цепи втулочно-роликовые одно-, двух- и трехрядные принимают по ГОСТ 10945—74, в случае тяжело нагруженных приводов—цепи грузовые пластинчатые по ГОСТ 191—82.

Натяжение приводных цепей производят натяжными звездочками с помощью винтовых, пружинно-винтовых и грузовых натяжных устройств 6. Последнее из-за громоздкости применяют редко. Предварительное натяжение цепного контура составляет 5—10 % от максимально допустимого для выбранной цепи.

Приводная звездочка цепного контура вращается от электродвигателя постоянного тока или двухскоростного переменного тока через стандартный редуктор с цилиндрическими зубчатыми колесами. Для точной остановки изделия в печи на электродвигателе устанавливают тормоз 4.

Индивидуальный привод роликов применяют в печах для нагрева весьма тяжелых изделий при реверсивном вращении роликов по зонам печи с различными режимами и при условии сохранения поверхности изделия от повреждения. Наиболее распространены конструкции индивидуальных приводов ролика 1 (см. рис. 14-5, в) и диска (см. рис. 14-5, в), в которых редуктор 3 ци-

цилиндрический или червячный при помощи полого выходного вала насаживается на конец вала 2 ролика, а электродвигатель 4 таким же способом насаживается на входной вал редуктора или крепится консольно на корпусе редуктора при помощи фланцев (рис. 14-5, г). Привод удерживается от вращения реактивным моментом упором-фиксатором 5, установленным на балке подшипника ролика. При небольшом шаге роликов не удастся разместить рядом индивидуальные приводы, тогда их устанавливают в шахматном порядке по обе стороны печи.

Мощность электродвигателя группового или индивидуального привода роликов печного рольганга должна быть рассчитана на преодоление статических сопротивлений, возникающий в результате трения в опорах роликов и трения роликов о металл при буксовании, а также динамических сопротивлений от разгона нагреваемых изделий и самих роликов.

Момент от статических сопротивлений на оси роликов, Н·м:

$$M_{ст} = (G_m + zG_p) \mu d_{ц}/2 + G_m \mu_1 D_p/2,$$

где G_m — вес транспортируемых изделий, приходящийся на несколько роликов при групповом приводе и на один ролик при индивидуальном приводе, Н; G_p — вес вращающихся частей ролика, Н; z — число приводных роликов; D_p — диаметр ролика, м; $d_{ц}$ — диаметр подшипника ролика, м; $\mu = 0,01$ — коэффициент трения в подшипниках ролика; μ_1 — коэффициент трения ролика по металлу при буксовании; для горячего металла $\mu_1 = 0,3$; для холодного $\mu_1 = 0,15$.

Момент от динамических сопротивлений на оси роликов, Н·м:

$$M_{дин} = \varepsilon_p (zGD_p^2 + GD_m^2)/3750,$$

где GD_p^2 — маховый момент ролика, Н·м²; GD_m^2 — маховый момент поступательно движущихся изделий относительно оси ролика (принимают, что вес изделий приложен по окружности ролика), Н·м².

Наибольшее угловое ускорение ролика при условии отсутствия проскальзывания роликов под изделиями, рад/с²

$$\varepsilon_p = 2\mu_0 g/D_p,$$

где $\mu_0 = 0,2$ — коэффициент трения покоя изделия по роликам; $g = 9,8$ м/с² — ускорение силы тяжести.

Расчетная мощность привода печного рольганга, кВт:

$$N_p = (M_{ст} + M_{дин}) n_p/9750\eta,$$

где n_p — частота вращения ролика, об/мин; η — к. п. д. привода; при групповом цепном приводе в зависимости от числа роликов $\eta = 0,5 \div 0,7$; при трансмиссионном приводе $\eta = 0,8 \div 0,9$; при индивидуальном приводе $\eta = 0,9$.

На групповом приводе печного рольганга устанавливают упомянутые выше крановые электродвигатели постоянного и пере-

менного тока, а на индивидуальном приводе ролика—электродвигатели рольгангового типа АР. Установочная мощность электродвигателя $N_y = k_a N_p$, где $k_a = 1,15 \div 1,25$ — коэффициент запаса на неучтенные сопротивления.

Определяем частоту вращения ролика, об/мин:

$$n_p = 60v/\pi D_p,$$

где v — транспортная скорость движения изделий по роликам, м/с; D_p — диаметр ролика, м.

Находим общее передаточное число группового привода и осуществляем его разбивку по отдельным передачам

$$i_{\text{общ}} = n_m/n_p = i_{\text{ред}} \cdot i_{\text{цеп}},$$

где n_m — частота вращения вала электродвигателя, об/мин; $i_{\text{ред}}$, $i_{\text{цеп}}$ — соответственно передаточное число редуктора и цепной передачи.

4. Вращающиеся поды печей

Вращающиеся поды встречаются в печах двух типов: карусельных и кольцевых.

Карусельные печи (рис. 14-6, а) имеют под 1 в форме диска диаметром по 3—3,5 м и с общей массой садки и пода до 10 т. Диск под опорным кольцом 2 опирается на три равнорасположенных стационарных конических ролика 3, один из которых является приводным 6 от электродвигателя 10 с тормозом 9 через редуктор 8. Под удерживается на роликах центральной цапфой 4, прикрепленной снизу к раме пода и вращающейся в подшипнике 5, размещенном в стационарном корпусе. Щель между вращающимся подом и стенами печи уплотнена с помощью водяного затвора 7. Применяют карусельные печи главным образом в машиностроительной промышленности.

Кольцевые печи (рис. 14-6, б) имеют под 1 в форме кольца. Вращение пода осуществляется от одного или двух приводов, каждый из которых состоит из электродвигателя 10 с тормозом 9, редуктора 8, открытой конической зубчатой передачи в виде зубчатого венца 6 на раме пода и конической шестерни 7 на раме привода. Все соединения выполняются при помощи зубчатых муфт с промежуточными валами.

При центрировании с помощью горизонтальных роликов 2 под кольцевой печи имеет диаметр 14—30 м при ширине до 4 м и общей массе садки и подвижных частей до 300—350 т. Под опирается через круговые рельсы 4 на два ряда роликов 5 при ширине пода до 4 м и на три — при большей ширине. Расстояние между рядами роликов принимают около 1500 мм, а угловой шаг 18—20°. Центрирующие ролики установлены в подпружиненных опорах на фундаменте и упираются в круговой рельс 3 на раме кольцевого пода 1.

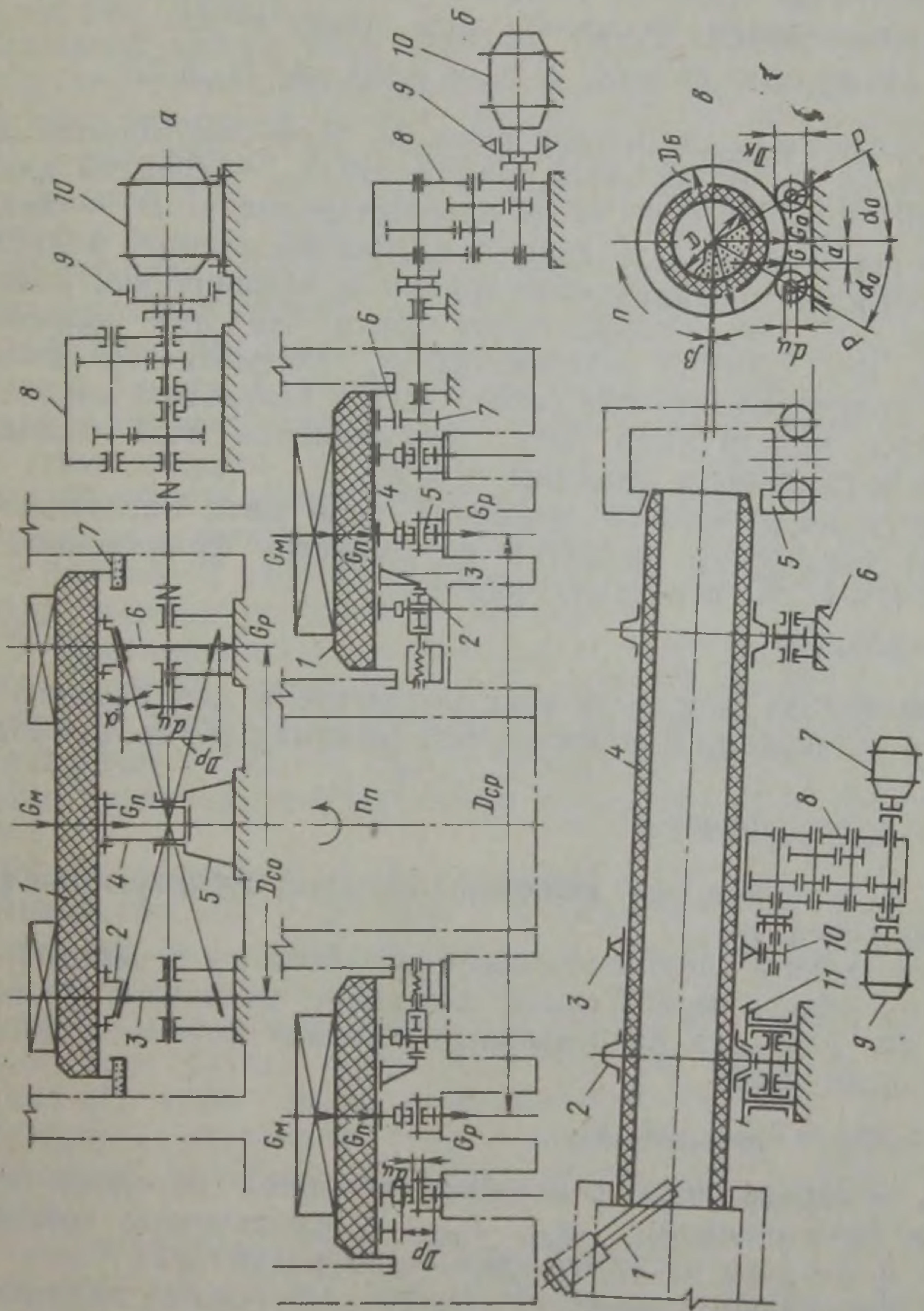


Рис. 14-6. Вращающаяся печь

В зависимости от массы садки и пода на одной печи устанавливаются два или три привода. Окружную скорость на зубчатом коническом венце принимают в пределах 0,05—0,4 м/с.

При вращении карусельного и кольцевого подов печи (см. рис. 14-7, а, б) возникает сила трения в опорах вертикальных и горизонтальных роликов, сила трения качения опорных рельсов и направляющей шины по соответствующим роликам. Общий момент сопротивления вращения пода печи, Н·м:

$$M_{\Pi} = [2(G_{\Pi} + G_{\text{М}})f + (G_{\Pi} + G_{\text{М}} + z_{\text{р}}G_{\text{р}}) \mu d_{\text{ц}}] D_{\text{ср}} \beta / 2D_{\text{р}},$$

где G_{Π} — вес кольцевого пода печи, Н; $G_{\text{М}}$ — вес металла (заготовок), Н; $G_{\text{р}}$ — вес опорного ролика, Н; $D_{\text{ср}}$ — средний диаметр кольцевого пода, м; $z_{\text{р}}$ — число опорных роликов; $D_{\text{р}}$ — диаметр опорных роликов, м; $d_{\text{ц}}$ — диаметр цапфы подшипника ролика, м; $\mu = 0,01 \div 0,03$ — коэффициент трения в подшипниках роликов; $f = (8-10) 10^{-4}$ м — коэффициент трения качения роликов по рельсам; $\beta = 2,5 \div 3,5$ — коэффициент, учитывающий дополнительные сопротивления при работе печи в результате коробления и перекоса конструкции пода, заклинивания пода обломками кирпича и скопления окалины и т. п.

Частоту непрерывного вращения пода печи определяют по заданной окружности скорости $v_{\text{в}}$, диаметру фрикционной $D_{\text{ср}}$ или зубчатой $D_{\text{к}}$ передачи, об/мин:

$$n_{\Pi} = 60v_{\text{в}} / \pi D_{\text{к}}.$$

Установочная мощность электродвигателя для каждого привода при их числе z_{Π} и коэффициенте режима работы $k_{\text{р}}$ составит, кВт:

$$N_{\text{у}} = k_{\text{р}} M_{\Pi} n_{\Pi} / 9750 z \eta,$$

где η — к. п. д. привода, включая открытую зубчатую или фрикционную передачу.

После выбора электродвигателя по каталогу с частотой вращения $n_{\text{м}}$ общее передаточное отношение механизма вращения пода и его разбивку на отдельные передачи можно представить в следующем виде:

$$i = n_{\text{м}} / n_{\Pi} = i_{\text{отк}} i_{\text{ред 1}} i_{\text{ред 2}},$$

где $i_{\text{отк}}$ — передаточное отношение открытой передачи (зубчатой или фрикционной); $i_{\text{ред 1}}$, $i_{\text{ред 2}}$ — передаточное отношение первого и второго от электродвигателя редуктора.

Для фрикционной передачи механизма вращения карусельной печи производят проверку на силу сцепления между опорным кольцом пода и приводным коническим роликом по уравнению

$$P_{\text{сд}} = (G_{\Pi} + G_{\text{М}}) f \cos \alpha / 3 > P_{\text{ок}} = 2M_{\Pi} / D_{\text{ср}},$$

где $1/3$ — коэффициент, определяющий долю суммарного веса пода и садки, приходящейся на приводной ролик; $f = 0,2$ — коэф-

коэффициент сцепления между опорным кольцом и приводным роликом; α — угол конусности приводного ролика; $P_{ок}$ — окружное усилие фрикционной передачи. Если это условие не выполняется и $P_{сд} < P_{ок}$, то переходят на зубчатую передачу.

В зависимости от назначения трубчатые, вращающиеся печи разделяют на вельц-печи, сушильные и обжиговые, а по числу опор на двух-, трех- и многоопорные. Схема одной из них показана на рис. 14-6, в.

Основной частью печи является вращающийся корпус 4 (барабан), внутренняя поверхность которого по всей длине футерована огнеупорным кирпичом. В зависимости от производительности и назначения печи диаметр корпуса колеблется от 1,6 до 3,8 м, а длина от 16 до 150 м. Для перемещения перерабатываемого материала внутри печи барабан наклонен в направлении движения материала под углом 3—5°. Загрузку материала производят через крутонаклоненную воронку 1 верхней неподвижной осадительной (дымовой) камеры. Разгружают материал через нижнюю откатную камеру 5, в которой установлены топочные форсунки и куда поступает воздух. Для предотвращения подсоса воздуха печь герметизируют, устанавливая на ее концах между вращающимся барабаном и неподвижными головками уплотнения. Печь загружается и разгружается непрерывно. Вращение печи происходит с небольшой частотой (0,5—1 об/мин) и осуществляется при помощи опорных устройств и привода.

На барабане с помощью башмаков и усиливающих обечаек закреплены жестко (приварены) или свободно насажены стальные бандажи 2, которые опираются на поддерживающие (опорные) вертикальные ролики 6. Для контроля положения бандажей на опорных роликах предусмотрены горизонтальные упорные ролики 11.

Привод печи состоит из основного 7 и вспомогательного 9 электродвигателей, редуктора 8 и открытой зубчатой передачи с шестерней 10 и зубчатым венцом 3. Назначение вспомогательного (аварийного) электродвигателя — продолжать вращение печи при внезапных и продолжительных отключениях электроэнергии. В противном случае произойдет прогиб барабана, так как верхняя его часть охлаждается быстрее нижней, наполненной раскаленным материалом. Аварийный привод должен иметь независимый источник энергии, обычно от аккумуляторных батарей.

Если не учитывать действия центробежной силы от материала и окружной силы в зубчатом зацеплении открытой передачи, то давления на опорные ролики будут одинаковы с обеих сторон и в сумме равны:

$$2P = (G + G_0) / \cos \alpha_0,$$

где G и G_0 — вес материала в печи и корпуса, Н; α_0 — половина центрального угла расположения опорных роликов.

Вращающий момент на оси печи (Н·м) преодолевает сопротивление от трения в опорных роликах и силу тяжести при подъеме пересыпающегося внутри печи материала

$$M = P (\mu d_{\text{ц}} + 2f) D_{\text{б}}/D_{\text{р}} + Ga,$$

где μ и f — коэффициенты трения в подшипниках роликов и трения качения бандажей по роликам; $D_{\text{б}}$, $D_{\text{р}}$, $d_{\text{ц}}$ — диаметры бандажей, роликов и цапф роликов; a — расстояние центра тяжести слоя материала от вертикали, проходящей через ось печи: принимают равным четверти внутреннего диаметра печи ($a \approx 0,25D$).

Тогда мощность основного электродвигателя привода будет равна, кВт

$$N = Mn/9750\eta_{\text{м}},$$

где n — частота вращения печи, об/мин; $\eta_{\text{м}}$ — к. п. д. передаточного механизма.

5. Выкатные поды печей

Печи с выкатным подом применяют для нагрева под ковку слитков и крупных заготовок, для нагрева под термообработку поковок и отливок и для высушивания различных материалов и изделий.

Загрузка и разгрузка металла осуществляется мостовыми кранами на выдвинутую из рабочей камеры печи подину. В зависимости от массы садки или грузоподъемности пода его выдвигают по рельсам на колесах или на катках.

На рис. 14-7, а изображена схема выкатного пода на колесах. Под печи представляет собой тележку 1, которая на колесах 3 передвигается по рельсам 2 канатом 4 лебедки, состоящей из барабана 5, редуктора 6, соединительной муфты 7 с тормом и электродвигателя 8. В крайних положениях тележка останавливается концевыми выключателями.

Схема выкатного пода на катках представлена на рис. 14-7, б. Рама 1, на которой смонтирована подина и передняя стенка печи, опирается рельсами 2 на отрезки пластинчатой катковой цепи 4. Снизу на раме закреплена цевочная рейка 5, которая передвигает подину в обе стороны с помощью тяговой звездочки 6. При движении пода катки цепей передвигаются по рельсам 3 на полу цеха.

При установившемся движении пода печи возникают силы трения: в опорах вала колеса, качения колеса по рельсу, реборд колеса о рельс и торцов ступиц колеса о прилежащие детали. Общее усилие сопротивления передвижного пода печи составляет H : на колесах (рис. 14-7, а)

$$Z = (G_{\text{п}} + G_{\text{м}}) (\mu d_{\text{ц}} + 2f) \beta / D_{\text{к}};$$

на катках (рис. 14-7, б)

$$Z = 2 (G_{\text{п}} + G_{\text{м}}) f \beta / D_{\text{к}},$$

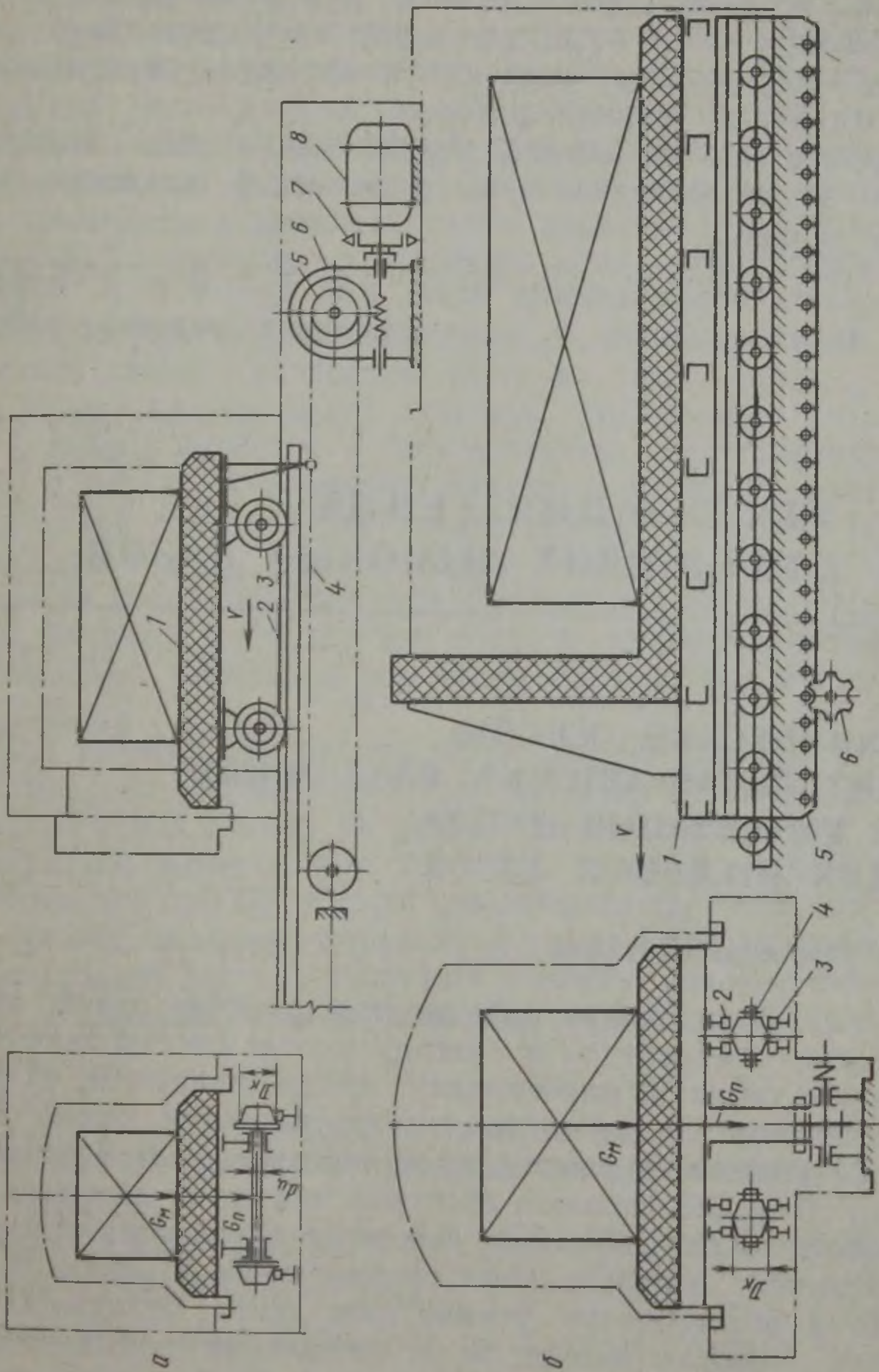


Рис. 14-7. Выкатные поды печей

где G_n — вес пода печи, Н; G_m — вес металла (садки), Н; D_k — диаметр колес (катков); м; $d_{ц}$ — диаметр цапфы колеса, м; μ — коэффициент трения на оси колеса на подшипниках качения, равный 0,01—0,03; на подшипниках скольжения $\mu = 0,15 \div 0,25$; f — коэффициент трения качения колеса по рельсу, равный $(8-10) \cdot 10^{-4}$ м; β — коэффициент, учитывающий сопротивление трения реборд ходовых колес о рельсы; для колес на подшипниках скольжения $\beta = 1,5 \div 2,0$; для колес на подшипниках качения $\beta = 2,0 \div 3,5$; большие значения коэффициентов принимают для более тяжелых условий работы.

Электродвигатель механизма передвижения пода выбирают по каталогу электродвигателей по статической мощности, кВт:

$$N_{ст} = k_p Z v / 1000 \eta,$$

где v — скорость передвижения пода, м/с; η — к. п. д. привода механизма передвижения; k_p — коэффициент режима работы.

Раздел IV УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛА ОТХОДЯЩИХ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

Глава 15

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ОТХОДЯЩИХ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

1. Методы утилизации тепла

Дымовые газы, покидающие рабочее пространство печей, имеют весьма высокую температуру и поэтому уносят с собой значительное количество тепла. В мартеновских печах, например, из рабочего пространства с дымовыми газами уносится около 80 % всего тепла поданного в рабочее пространство, в нагревательных печах около 60 %. Из рабочего пространства печей дымовые газы уносят с собой тем больше тепла, чем выше их температура и чем ниже коэффициент использования тепла в печи. В связи с этим целесообразно обеспечивать утилизацию тепла отходящих дымовых газов, которая может быть выполнена принципиально двумя методами: с возвратом части тепла, отобранного у дымовых газов, обратно в печь и без возврата этого тепла в печь. Для осуществления первого метода необходимо тепло, отобранное у дыма, передать идущим в печь газу и воздуху (или только воздуху). Для достижения этой цели широко используют теплообменники

рекуперативного и регенеративного типов, применение которых позволяет повысить к. п. д. печного агрегата, увеличить температуру горения и сэкономить топливо. При втором методе утилизации тепло отходящих дымовых газов используется в теплосиловых котельных и турбинных установках, чем достигается существенная экономия топлива.

В отдельных случаях оба описанных метода утилизации тепла отходящих дымовых газов используются одновременно. Это делается тогда, когда температура дымовых газов после теплообменников регенеративного или рекуперативного типа остается достаточно высокой и целесообразна дальнейшая утилизация тепла в теплосиловых установках. Так, например, в мартеновских печах температура дымовых газов после регенераторов составляет 750—800 °С, поэтому их повторно используют в котлах-утилизаторах.

Рассмотрим подробнее вопрос утилизации тепла отходящих дымовых газов с возвратом части их тепла в печь.

Следует прежде всего отметить, что единица тепла, отобранная у дыма и вносимая в печь воздухом или газом (единица физического тепла), оказывается значительно ценнее единицы тепла, полученной в печи в результате сгорания топлива (единицы химического тепла), так как тепло подогретого воздуха (газа) не влечет за собой потерь тепла с дымовыми газами. Ценность единицы физического тепла тем больше, чем ниже коэффициент использования топлива и чем выше температура отходящих дымовых газов.

Для нормальной работы печи следует каждый час в рабочее пространство подавать необходимое количество тепла. В это количество тепла входит не только тепло топлива Q_x , но и тепло подогретого воздуха или газа Q_ϕ , т. е. $Q_\Sigma = Q_x + Q_\phi$.

Ясно, что при $Q_\Sigma = \text{const}$ увеличение Q_ϕ позволит уменьшить Q_x . Иными словами, утилизация тепла отходящих дымовых газов позволяет достичь экономии топлива, которая зависит от степени утилизации тепла дымовых газов

$$R = I_B/I_D,$$

где I_B , I_D — соответственно энтальпия подогретого воздуха и отходящих из рабочего пространства дымовых газов, кВт, или кДж/период.

Степень утилизации тепла может быть также названа к. п. д. рекуператора (регенератора), %

$$\text{к.п.д.}_p = (I_B/I_D) 100\%.$$

Зная величину степени утилизации тепла, можно определить экономию топлива по следующему выражению:

$$\eta = \frac{I_B/I'_D}{1 - I_D/I'_D (1 - R)} 100\%,$$

где I_d^* , I_d — соответственно энтальпия дымовых газов при температуре горения и покидающих печь.

Снижение расхода топлива в результате использования тепла отходящих дымовых газов обычно дает значительный экономический эффект и является одним из путей снижения затрат на нагрев металла в промышленных печах.

Кроме экономии топлива, применение подогрева воздуха (газа) сопровождается увеличением калориметрической температуры горения T_k , что может являться основной целью рекуперации при отоплении печей топливом с низкой теплотой сгорания.

Повышение Q_{ϕ} при $Q_H^P = \text{const}$ приводит к увеличению температуры горения. Если необходимо обеспечить определенную величину T_k , то повышение температуры подогрева воздуха (газа), приводит к уменьшению величины Q_H^P , т. е. к снижению доли в топливной смеси газа с высокой теплотой сгорания.

Поскольку утилизация тепла позволяет значительно экономить топливо, целесообразно стремиться к максимально возможной, экономически оправданной степени утилизации. Однако необходимо сразу заметить, что утилизация не может быть полной, т. е. всегда $R < 1$. Это объясняется тем, что увеличение поверхности нагрева рационально только до определенных пределов, после которых оно уже приводит к очень незначительному выигрышу в экономии тепла.

2. Характеристика теплообменных устройств

Как уже указывалось, утилизацию тепла отходящих дымовых газов с возвратом их в печь можно осуществить в теплообменных устройствах регенеративного и рекуперативного типов. Регенеративные теплообменники работают при нестационарном тепловом состоянии, рекуперативные — при стационарном.

Теплообменники регенеративного типа имеют следующие основные недостатки:

1) не могут обеспечить постоянную температуру подогрева воздуха или газа, которая падает по мере остывания кирпичей насадки, что ограничивает возможность применения автоматического регулирования печи;

2) прекращение питания печи теплом при перекидке клапанов;

3) при подогреве топлива имеет место вынос газа через дымовую трубу, величина которого достигает 5—6 % полного расхода;

4) весьма большие объем и масса регенераторов;

5) неудобно расположены — располагают керамические регенераторы всегда под печами. Исключение составляют только кауперы, помещаемые около доменных печей.

Однако, несмотря на очень серьезные недостатки, регенеративные теплообменники иногда еще применяют на высокотемпературных печах (мертеновских и доменных печах, в нагревательных

колодцах). Это объясняется тем, что регенераторы могут работать при весьма высокой температуре дымовых газов (1500—1600 °С). При такой температуре рекуператоры работают устойчиво пока не могут.

Рекуперативный принцип утилизации тепла отходящих дымовых газов более прогрессивен и совершенен. Рекуператоры обеспечивают постоянную температуру подогрева воздуха или газа и не требуют никаких перекидных устройств — это обеспечивает более ровный ход печи и большую возможность для автоматизации и контроля ее тепловой работы. В рекуператорах отсутствует вынос газа в дымовую трубу, они меньшего объема и массы. Однако рекуператорам свойственны и некоторые недостатки, основными из которых являются низкая огнестойкость (металлических рекуператоров) и низкая газоплотность (керамических рекуператоров).

Глава 16

РЕГЕНЕРАТИВНЫЕ ТЕПЛОБМЕННИКИ

1. Общие сведения

Регенератор, обычно применяемый в металлургических печах, представляет собой камеру, заполненную многорядной решеткой (насадкой), выложенной из огнеупорных кирпичей. Сначала через регенератор пропускают дым, а затем в обратном направлении — воздух или газообразное топливо. В этот период регенеративная насадка отдает воздуху (газу) ранее аккумулярованное тепло. Существует оптимальное в теплотехническом отношении время между перекидкой клапанов, т. е. между следующими друг за другом изменениями поступления газообразных сред. У воздухонагревателей доменных печей длительность воздушного $t_{\text{в}}$ и дымового $t_{\text{д}}$ периодов связана следующим образом:

$$t_{\text{в}} = (t_{\text{д}} + t_{\text{к}})/(n - 1), \quad (16-1)$$

где $t_{\text{к}}$ — длительность перекидки клапанов; n — число воздухонагревателей на одну печь.

Для мартеновских и нагревательных печей $t_{\text{д}} = t_{\text{в}}$, причем и в том и другом случае продолжительность периодов лежит чаще всего в пределах от 5 до 15 мин и определяется особенностями работы регенеративной насадки в целом и каждого кирпича в отдельности. В начале дымового периода температура насадки относительно мала и перепад температур между дымовыми газами и кирпичами насадки значительный. Постепенно насадка нагревается, перепад температур уменьшается и наступает такой момент, когда необходима перекидка клапанов. К этому времени насадка настолько нагревается, что температура ее может находиться на пределе стойкости кирпича. Изменение температуры подогрева

воздуха (газа) вызвано постепенным охлаждением насадки в течение воздушного (газового) периода. Наиболее высокая температура подогрева воздуха наблюдается в начале воздушного периода, когда температура насадки максимальна.

Требования теплового режима печи в работе регенераторов обусловлены тем, что понижение температуры подогрева воздуха или газа приводит к снижению температуры горения и неблагоприятно влияет на температуру в печи. Поэтому, когда необходимо поддержать температуру в печи достаточно высокой, следует часто делать перекидку клапанов.

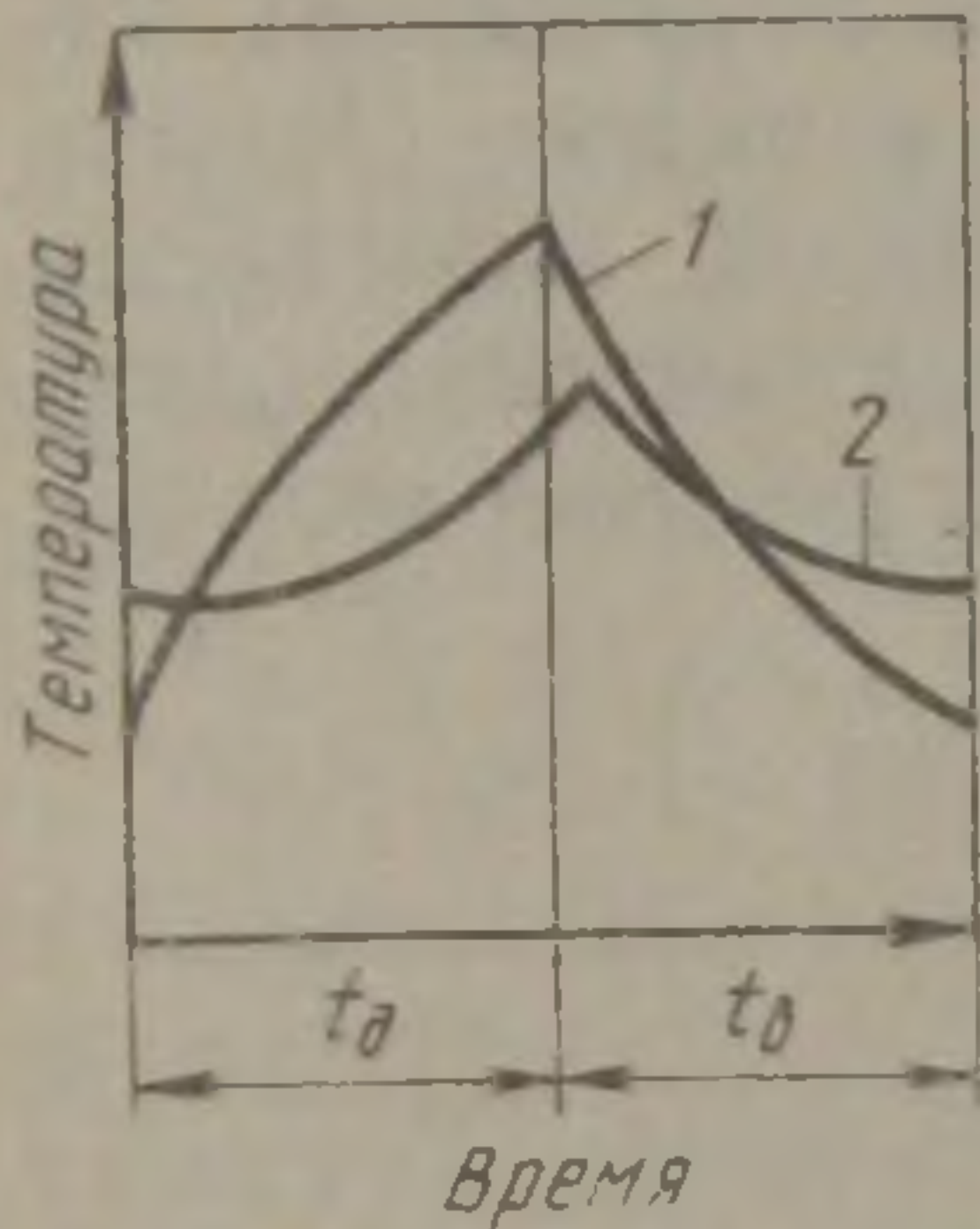


Рис. 16-1. Изменение температуры поверхности 1 и середины 2 регенеративного кирпича во времени

Кирпич аккумулирует тепло дымовых газов и передает его нагреваемому воздуху, выполняя тем самым роль посредника в теплообмене между дымом и воздухом. Изменение температуры кирпича в течение дымового и воздушного периодов показано на рис. 16-1, из которого видно, что в течение дымового периода температура поверхности кирпича интенсивно повышается, а температура центра сначала даже несколько понижается, а потом начинает расти. Это объясняется тем, что к концу воздушного периода температура поверхности кирпича становится ниже температуры его центра. При этом наблюдается отток тепла от середины к поверхности кирпича.

В начале дымового периода процесс передачи тепла от центра к поверхности также имеет место до тех пор, пока температура поверхности кирпича не превзойдет температуры его центра.

Количество тепла $+\Delta q$, которое кирпич аккумулирует в дымовой период, равно количеству тепла $-\Delta q$, которое кирпич отдает воздуху в воздушный период. Внутренние слои кирпича претерпевают значительно меньшие температурные колебания, чем наружные. Поэтому масса кирпича, с точки зрения его теплоаккумулирующей и теплоотдающей способности, работает неодинаково.

К насадке предъявляют следующие требования, определяющие ее экономичность и эксплуатационные качества:
 высокий общий коэффициент теплопередачи;
 минимальные аэродинамическое сопротивление;
 максимальная удельная поверхность нагрева;
 минимальная опасность засорения;
 необходимая строительная устойчивость.

Материал, из которого выполняют насадку, должен характеризоваться соответствующей огнеупорностью, термостойкостью и обладать определенным сопротивлением деформации под нагрузкой при повышенных температурах. В мартеновских печах крайне

важное значение имеет способность кирпича насадки выдерживать воздействие железистых шлаков.

Ячейкой регенеративной насадки называется сечение, свободное для прохода газов (рис. 16-2). Размер ячейки определяется

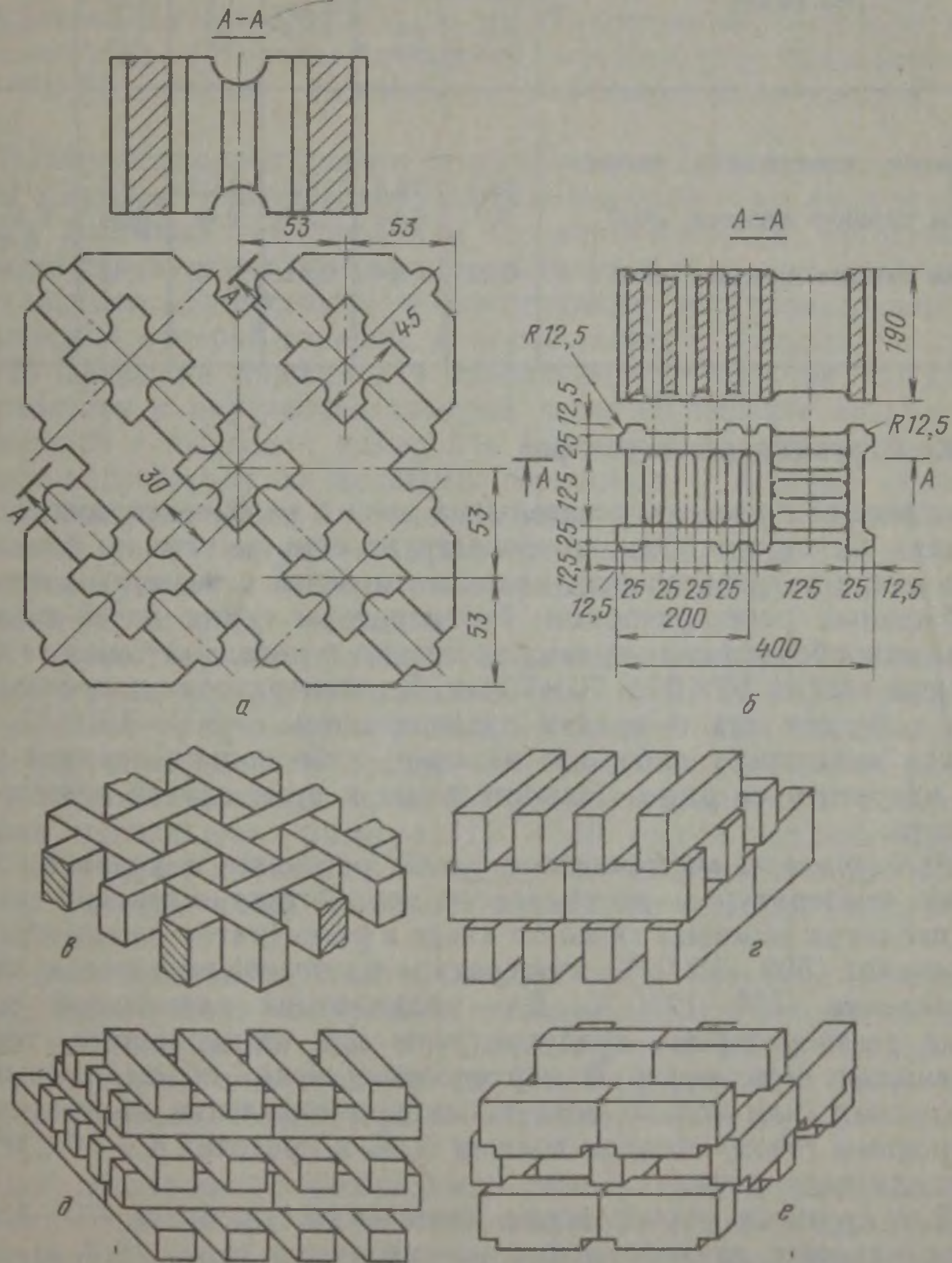


Рис. 16-2. Виды регенеративной насадки:

а и б — блочная для доменных воздухонагревателей; в — Каупера; г — Сименса; д — брусковая; е — Петерсона

видом и назначением насадки. Наибольшее распространение получили насадки, представленные на рис. 16-2. Их сравнительные характеристики приведены в табл. 16-1.

Т а б л и ц а 16-1. Характеристика регенеративных насадок

Показатели	Тип насадки					
	блочная		Кау-пера	Ся-мен-са	бру-ско-вая	Петер-сова
	рис. 16-2, а	рис. 16-2, б				
Удельная поверхность нагрева, $\text{м}^2/\text{м}^3$	38,1	36,8	13,5	13,5	16,5	14,5
Объем кирпича насадки, $\text{м}^3/\text{м}^3$	0,7	0,58	0,54	0,31	0,31	0,35— 0,43
Живое сечение насадки, $\text{м}^2/\text{м}^3$	0,29	0,386	0,48	0,42	0,42	0,46

2. Конструкции регенераторов

В настоящее время нагревательные печи с регенераторами практически не строят. Однако существует еще достаточно большое количество нагревательных колодцев и печей с выкатным подом, снабженных регенераторами. Регенераторы таких печей выполнены однооборотными, преимущественно с насадкой Сименса при размере ячейки 50×50 и 70×70 мм. В регенераторах нагревательных колодцев газ и воздух подогреваются до $800\text{—}1000^\circ\text{C}$. Из динаса выполняют либо всю насадку, либо только верхние (более нагретые) ее ряды. Нижние ряды в этом случае делают из шамота.

Регенераторы мартеновских печей работают в условиях высоких температур и интенсивного воздействия шлаковой пыли. Температура дымовых газов на входе в регенератор лежит обычно в пределах $1500\text{—}1600^\circ\text{C}$, температура подогрева газа и воздуха — в пределах $1100\text{—}1250^\circ\text{C}$. Для улавливания плавиальной пыли перед регенераторами предусмотрены как стационарные, так и выдвижные шлаковики. В мартеновских печах объем газовых и воздушных (или только воздушных при отоплении мазутом или природным газом) насадок должен быть в пределах $4,0\text{—}5,0 \text{ м}^3/\text{м}^2$ площади пода печи.

Для крупных мартеновских печей емкостью более $400\text{—}450$ т устанавливают двухоборотные регенераторы (рис. 16-3, а), так как увеличение высоты насадки более 7 м сопряжено со значительными затратами, поскольку для мартеновских печей это связано с расположением регенераторов ниже уровня земли. В однооборотных регенераторах (рис. 16-3, б) верхние 20 рядов обычно выполняют из форстерита, хорошо сопротивляющегося воздействию оксидов железа, а нижние — из шамота. Первую по ходу дыма (горячую) камеру двухоборотных регенераторов изготавливают из форстерита, вторую — из шамота. В однооборотных реге-

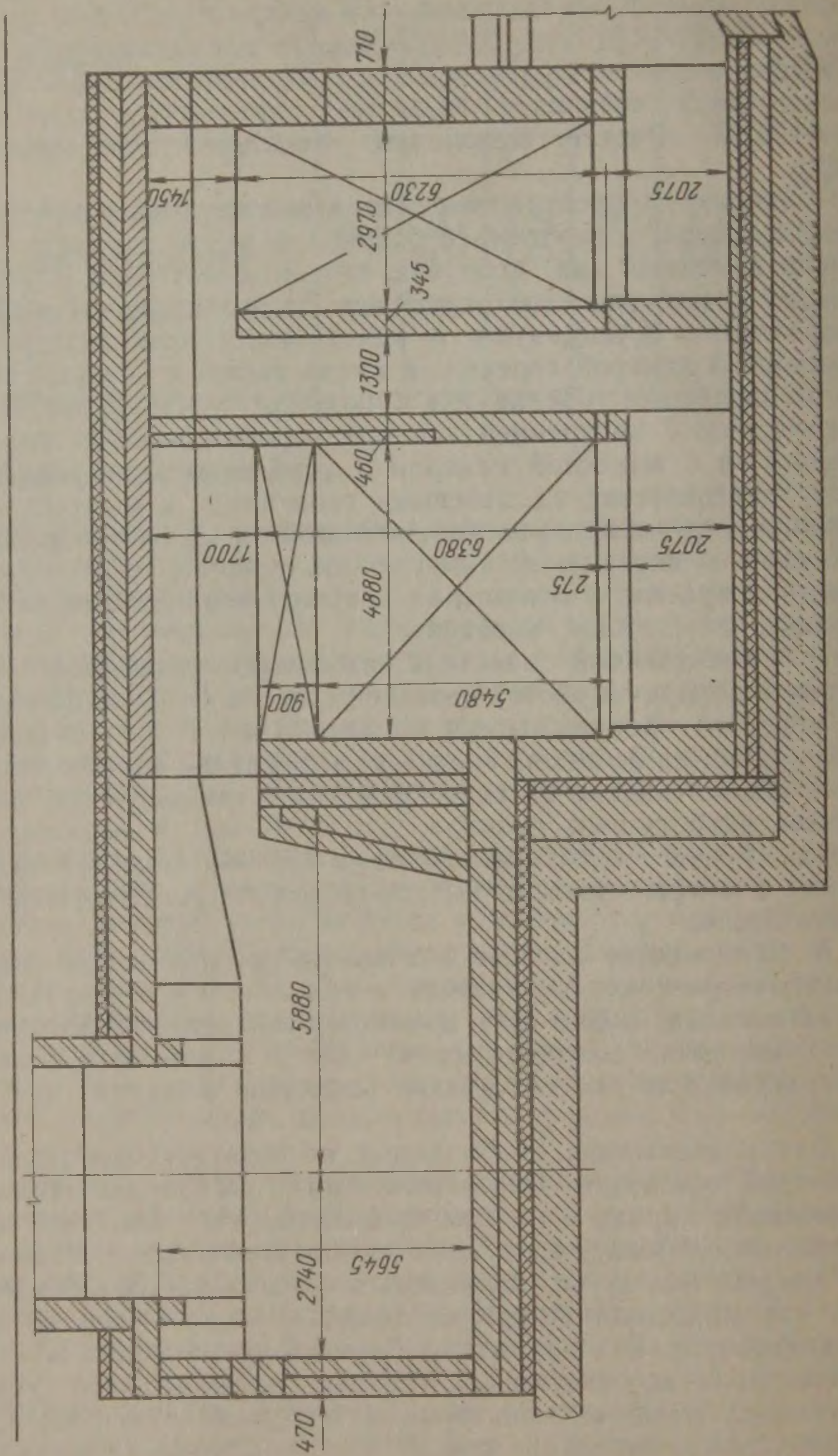
нераторах обычно применяют насадку Симсена с ячейками размерами 150×150 и 180×180 мм. В двухоборотных регенераторах горячую камеру выкладывают по Кауперу с ячейками размерами $230 \times 230 \div 270 \times 270$ мм. Вторую камеру выкладывают по Сименсу с ячейками $140 \times 140 \div 190 \times 190$ мм. Применение двухоборотного регенератора позволяет повысить температуру подогрева на $50\text{—}100^\circ\text{C}$. Расчет выполняют отдельно для каждой камеры.

Наиболее распространены доменные воздухонагреватели (аппараты Каупера) с внутренней боковой камерой горения, где сжигается доменный газ, продукты сгорания которого, проходя по насадке сверху вниз, нагревают ее. Воздух проходит в обратном направлении. Существуют и конструкции воздухонагревателей с выносной камерой горения, а также такие, в которых газ сжигается щелевыми горелками в купольном пространстве. Воздухонагреватели с внутренней камерой горения дешевле воздухонагревателей с выносной камерой и удобнее в эксплуатации, чем воздухонагреватели со щелевыми горелками, у которых горелки и клапаны размещены на большой высоте. Однако воздухонагревателями с внутренней камерой свойственны свои недостатки: перегрев купола и отклонение в процессе эксплуатации камеры горения в сторону насадки.

В отечественной практике применяют воздухонагреватели с трех- и четырехъярусной насадкой (рис. 16-4). Температура дыма по мере его продвижения в насадке падает. Для поддержания теплоотдачи на должном уровне целесообразно постепенно уменьшить живое сечение насадки. Поэтому в трехъярусных насадках ячейки наибольшего размера (110×110 мм) в верхнем ярусе; ячейки среднего яруса имеют размер 130×45 , нижнего 45×45 мм иногда размеры ячеек по высоте воздухонагревателя выполняют одинаковыми.

В большинстве случаев в отечественной практике доменные воздухонагреватели сооружены с применением в кладке купола, верха насадки, верха стен и камеры горения высокоглиноземистого кирпича, содержащего $45\text{—}62\%$ глинозема. Такие воздухонагреватели обеспечивают подогрев воздуха до $1150\text{—}1200^\circ\text{C}$.

Для поддержания необходимой температуры фурменных зон требуется обеспечить соответствующую генерацию тепла. При применении наряду с коксом природного газа или мазута необходимо использовать воздушное дутье с более высокой температурой нагрева или дутье, обогащенное кислородом. Это объясняется тем, что энтальпия продуктов сгорания кокса выше энтальпии продуктов сгорания природного газа в 5 раз, а мазута в 1,6 раза. Для достижения повышенной температуры воздушного дутья перспективной является конструкция воздухонагревателей с четырехъярусной насадкой (см. рис. 16-4) из специальных блоков типа, изображенных на рис. 16-2. Верхний, наиболее высокотемператур-



0

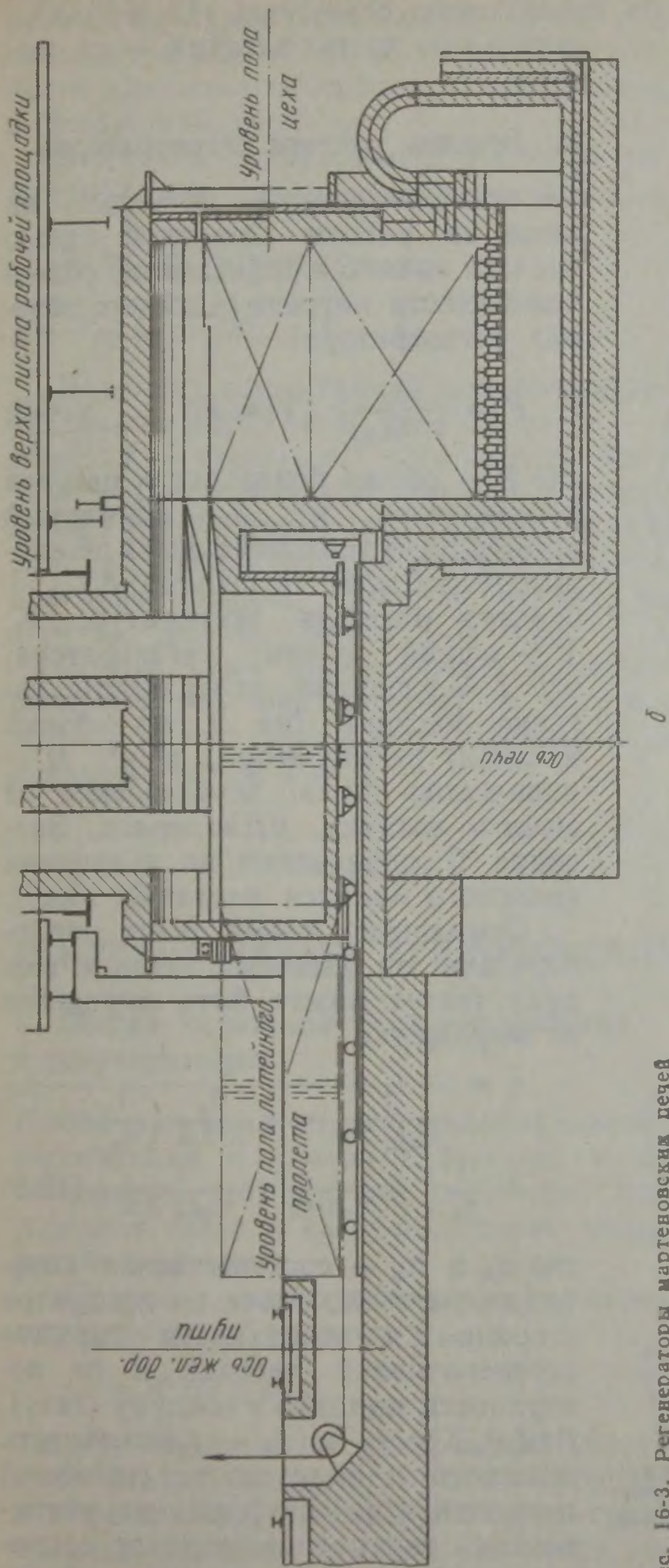


Рис. 16-3. Регенераторы мартеновских печей

ный ярус насадки выполняют из малоразрыхляющегося динаса, второй ярус сверху — из каолинового огнеупора (42 % Al_2O_3), остальную часть насадки — из шамота.

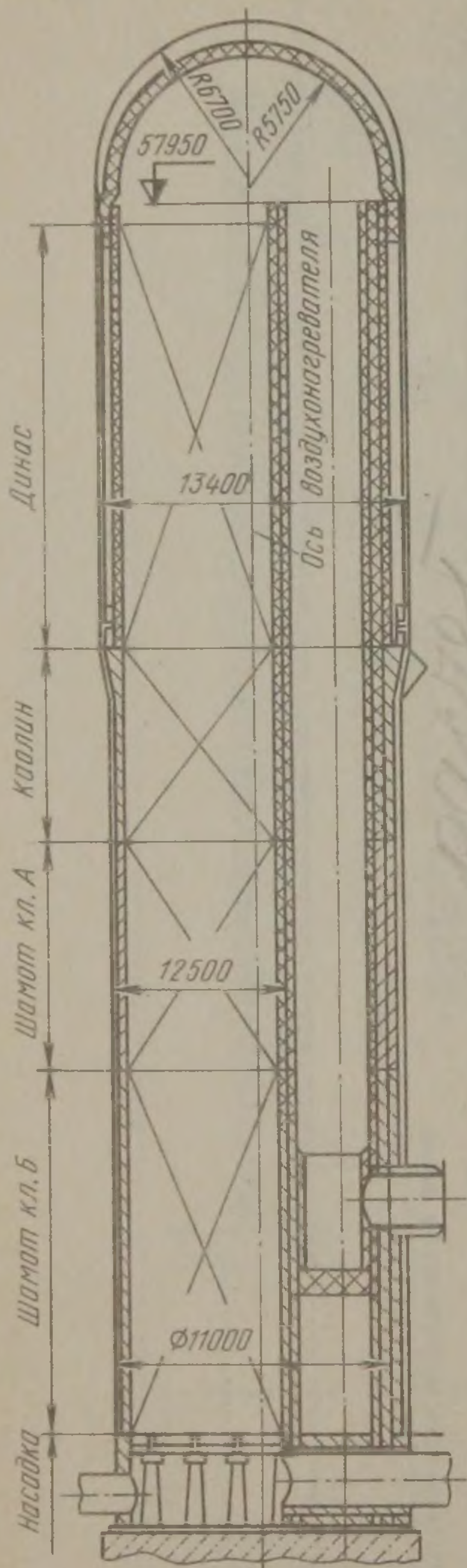


Рис. 16-4. Доменный воздухонагреватель с четырехъярусной насадкой:
1 — насадка; 2 — камера горения;
3 — горелка

3. Основы расчета регенераторов

Расчет регенерации проводят на цикл их работы. Основной целью расчета является определение общей поверхности нагрева (и общего объема) регенератора:

$$F = \frac{Q}{\alpha \Delta T_{\text{ср}}}; \quad V = F/f, \quad (16-2)$$

где F — общая поверхность нагрева регенератора, m^2 ; χ — суммарный коэффициент теплопередачи в регенераторе, $kJ/(m^2 \cdot K \cdot \text{период})$; $\Delta T_{\text{ср}}$ — средняя разность температур, K ; V — общий объем регенератора, m^3 ; f — удельная поверхность нагрева насадки (на $1 m^3$ объема насадки) регенератора, m^2/m^3 ; Q — количество тепла, передаваемое от дыма к воздуху, $kJ/\text{период}$. Значение Q определяют из уравнения теплового баланса насадки.

Суммарный коэффициент теплопередачи от дымовых газов к воздуху (газу) может быть определен из выражения

$$\chi = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_d t_d \cdot 3,6} + \psi \frac{S_b}{\lambda \cdot 3,6} \left(\frac{1}{t_d} + \frac{1}{t_b} \right) + \frac{1}{S_{op} \cdot c_{\xi}} + \frac{1}{\alpha_b t_b \cdot 3,6}}, \quad (16-3)$$

где α_d и α_b — соответственно коэффициенты теплоотдачи от продуктов сгорания к поверхности кирпича регенеративной насадки и от поверхности кирпича к воздуху (газу), $W/(m^2 \cdot K)$; t_d и t_b — длительность дымового и воздушного (газового) периодов, ч; ψ — коэффициент, учитывающий внутреннее тепловое сопротивление насадки при реальных циклических условиях ее работы;

S_b — эффективная полутолщина кирпича, м; λ — коэффициент

теплопроводности материала кирпича, Вт/(м·К); ρ — объемная плотность кирпича насадки, кг/м³; c — теплоемкость кирпича насадки, кДж/(кг·К), ξ — коэффициент, зависящий от интенсивности изменения температуры насадки средней по массе в дымовой и воздушной периоды.

Величина коэффициента ψ зависит от значения коэффициента аккумуляции тепла в кирпиче насадки

$$\eta_k = \frac{1}{1 + 4/3 + 1/F_{0\Sigma}},$$

где $F_{0\Sigma} = at_{\Sigma}/S_0^2$, а $t_{\Sigma} = t_d + t_b$.

Величина эффективной полутолщины кирпича S_0 может быть найдена из выражения $S_0 = v/f$, где v — удельный объем насадки, м³/м³; f — удельная поверхность нагрева насадки, м²/м³.

В теплотехническом отношении целесообразно, чтобы вся толщина кирпича принимала участие в процессе аккумуляции тепла. Для достижения этого необходимо, чтобы $\eta_k > 1/3$. При $\eta_k > 1/3$ для всех насадок, кроме брусковой, рекомендуется принимать $\psi = 1/3$, для брусковой $\psi = 1/4$.

Специальные исследования позволили установить, что для регенераторов мартеновских и нагревательных печей коэффициент ξ может быть принят равным 10, для воздухонагревателей доменных печей $\xi \ll 5$.

Глава 17

РЕКУПЕРАТИВНЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ

1. Общая характеристика теплообмена в рекуператорах

Любой рекуператор представляет собой теплообменный аппарат, работающий в условиях близких к стационарному тепловому состоянию, когда тепло постоянно передается от остывающих дымовых газов к нагреваемому воздуху (газу) через разделительную стенку.

Полное количество тепла, Вт, переданного в рекуператоре, определяют по уравнению

$$Q = K \Delta T_{\text{ср}} F, \quad (17-1)$$

где K — суммарный коэффициент теплопередачи от дыма к воздуху (газу), характеризующий общий уровень теплопередачи в рекуператоре, Вт/(м²·К); $\Delta T_{\text{ср}}$ — средняя (по всей поверхности нагрева) разность температур между дымовыми газами и воздухом (газом), К; F — поверхность нагрева, через которую происходит передача тепла от дымовых газов к воздуху (газу), м².

Передача тепла в рекуператорах осуществляется в три ступени: а) от дымовых газов к стенкам рекуперативных элементов; б) через разделительную стенку; в) от стенки к нагреваемому воздуху или газу.

На дымовой стороне рекуператора тепло от дымовых газов к стенке передается конвекцией и излучением. Следовательно, коэффициент теплоотдачи на дымовой стороне

$$\alpha_d = \alpha_d^k + \alpha_d^{изл},$$

где α_d^k — коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к стенке конвекцией, Вт/(м²·К); $\alpha_d^{изл}$ — коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к стенке излучением, Вт/(м²·К).

Передача тепла через разделительную стенку зависит от теплового сопротивления стенки $R = S/\lambda$ и состояния ее поверхности.

На воздушной стороне рекуператора при нагреве воздуха тепло от стенки к воздуху передается только конвекцией, при нагреве газа — конвекцией и излучением. Таким образом, при нагреве воздуха теплоотдача определяется локальным коэффициентом теплоотдачи конвекцией $\alpha_b = \alpha_b^k$; если нагревается газ, то коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_r = \alpha_r^k + \alpha_r^{изл}.$$

Все отмеченные локальные коэффициенты теплоотдачи объединены в суммарном коэффициенте теплопередачи, Вт/(м²·К)

$$K = \frac{1}{1/\alpha_d + S/\lambda + 1/\alpha_b}. \quad (17-2)$$

В трубчатых рекуператорах суммарный коэффициент теплопередачи следует определять для цилиндрической стенки, Вт/(м·К)

$$K = \frac{2\pi}{1/\alpha_1 r_1 + 1/\lambda \ln \frac{r_2}{r_1} + 1/\alpha_2 r_2}. \quad (17-3)$$

Коэффициент K называется коэффициентом теплопередачи трубы. Если же необходимо отнести количество тепла к площади внутренней или наружной поверхности трубы, то суммарные коэффициенты теплопередачи, Вт/(м²·К), можно определить следующим образом:

$$K_1 = \frac{K}{2\pi r_1} \quad \text{и} \quad K_2 = \frac{K}{2\pi r_2},$$

где α_1, α_2 — коэффициент теплопередачи на внутренней и наружной сторонах трубы, Вт/(м²·К); r_1 и r_2 — соответственно радиусы внутренней и наружной поверхностей трубы, м.

В металлических рекуператорах, в которых толщина стенки S мала, а λ весьма велико, можно пренебречь величиной теплового сопротивления стенки S/λ , и тогда суммарный коэффициент

теплопередачи, Вт/(м²·К), можно записать в следующем виде:

$$K = \alpha_{\text{д}}\alpha_{\text{в}}/(\alpha_{\text{д}} + \alpha_{\text{в}}). \quad (17-4)$$

Все локальные коэффициенты теплоотдачи, необходимые для определения величины K , можно получить на основании законов теплообмена конвекцией и изучением, рассмотренных в томе I этой книги.

Поскольку между воздушной и дымовой сторонами рекуператора всегда есть перепад давлений, наличие неплотностей в насадке керамических рекуператоров приводит к утечке воздуха, достигающей иногда 40—50 %. Прососы резко снижают эффективность рекуперативных установок; чем больше прососанного воздуха, тем меньше доля тепла, полезно использованного в керамическом рекуператоре. Ниже приведена эта зависимость:

Утечка, % от количества воздуха, поданного в рекуператор	0	25	50
Температура дымовых газов на выходе из рекуператора, °С	660	615	570
Температура подогрева воздуха, °С	895	820	770

Утечка воздуха влияет на величину локальных коэффициентов теплоотдачи, причем воздух, попавший в дымовые газы, не только снижает их температуру, но и уменьшает процентное содержание CO₂ и H₂O, вследствие чего ухудшается излучательная способность газов.

Как при абсолютно газоплотном рекуператоре, так и при утечке локальные коэффициенты теплоотдачи изменяются по поверхности нагрева, поэтому при расчете рекуператоров определяют отдельно величины локальных коэффициентов теплоотдачи для верха и низа и затем уже по усредненному значению находят суммарный коэффициент теплопередачи.

2. Температурное поле рекуператора

В рекуператорах движение газообразной среды может быть противоточным, перекрестным и прямоточным. График, характеризующий изменение температуры по поверхности нагрева при противоточной и прямоточной схеме движения, приведен на рис. 17-1. Следует отметить, что схему движения принято рассматривать по ходу дыма.

Из приведенного графика видно, что при противоточном движении конечная температура воздуха $T_{\text{в}}^{\text{к}}$ (иначе говоря, температура подогрева воздуха) может быть выше конечной температуры дымовых газов $T_{\text{д}}^{\text{к}}$, чего никогда не может быть при прямоточной схеме движения. Вместе с тем при противотоке температура стенки рекуператора может быть значительно выше, чем при прямотоке. Поэтому более эффективную противоточную схему используют в керамических и металлических рекуператорах при относительно невысоких температурах отходящих дымовых га-

зов. Прямоточную схему применяют для металлических рекуператоров в том случае, если температура дымовых газов настолько велика, что возникает опасность в отношении стойкости материала рекуператора.

Как при противотоке, так и при прямотоке температура дымовых газов и воздуха изменяется по поверхности нагрева, что обуславливает изменение разности температур дымовых газов и воздуха. Поэтому характерной является средняя разность температур по всей поверхности нагрева $\Delta T_{\text{ср}}$.

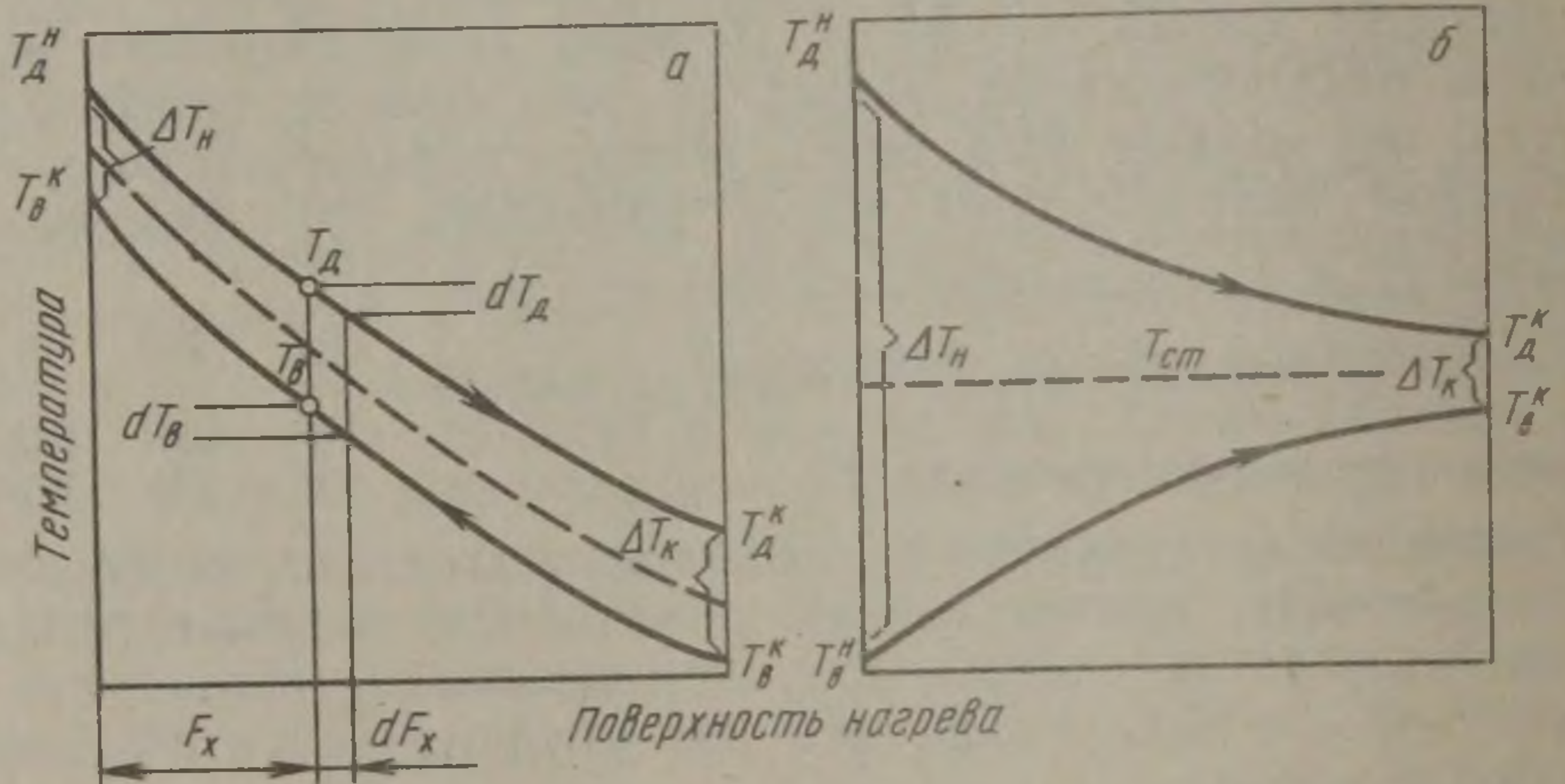


Рис. 17-1. Изменение температуры при противоточной а и прямоточной б схемах движения газовых сред в теплообменниках рекуперативного типа

Проанализируем изменение температуры газообразных сред на примере противоточного рекуператора (см. рис. 17-1, а) при постоянном (среднем) для всей поверхности нагрева суммарном коэффициенте теплопередачи K , пренебрегая потерями тепла в окружающую среду. Выберем малый участок поверхности нагрева dF_x . Количество тепла, передаваемое на этом участке поверхности, будет равно

$$dQ = K dF_x (T_d - T_b),$$

где T_d и T_b — температуры дымовых газов и воздуха после прохождения части поверхности.

Это же количество тепла будут терять дымовые газы и приобретать воздух. Считая по ходу более нагретой среды, получим

$$dQ = -W_d dT_d; \quad dQ = -W_b dT_b,$$

где $W_d = c_d G_d$ и $W_b = c_b G_b$ — произведения количества среды на ее теплоемкость.

Знак «минус» показывает, что величины T_d и T_b убывают по ходу дымовых газов. Из уравнений следует, что

$$dT_d = -dQ/W_d \quad \text{и} \quad dT_b = -dQ/W_b.$$

Вычтя из первого второе, получим

$$dT_d - dT_b = -dQ \left(\frac{1}{W_d} - \frac{1}{W_b} \right)$$

или $d(T_d - T_b) = -dQ \left(\frac{1}{W_d} - \frac{1}{W_b} \right)$,

но $dQ = K dF_x (T_d - T_b)$,

поэтому

$$d(T_d - T_b) = -K dF_x (T_d - T_b) \left(\frac{1}{W_d} - \frac{1}{W_b} \right)$$

или

$$\frac{d(T_d - T_b)}{T_d - T_b} = -K dF_x \left(\frac{1}{W_d} - \frac{1}{W_b} \right).$$

После интегрирования получим

$$\ln(T_d - T_b) = KF_x \left(\frac{1}{W_d} - \frac{1}{W_b} \right) + c,$$

где F_x — поверхность нагрева, пройденная дымовыми газами до достижения температуры T_d .

Найдем постоянную интегрирования c . Для начала поверхности ($F_x = 0$)

$$T_d - T_b = T_d^H - T_b^K,$$

следовательно $c = \ln(T_d^H - T_b^K)$.

Подставив это значение для c в предыдущую формулу, получим

$$\ln \frac{T_d - T_b}{T_d^H - T_b^K} = -KF_x \left(\frac{1}{W_d} - \frac{1}{W_b} \right), \quad (17-5)$$

но при $F_x = F$ значение $T_d - T_b = T_d^K - T_b^H$

$$\text{и } \ln \frac{T_d^K - T_b^H}{T_d^H - T_b^K} = -KF \left(\frac{1}{W_d} - \frac{1}{W_b} \right). \quad (17-6)$$

Чтобы найти $\Delta T_{\text{ср}}$, входящую в уравнение (17-1), будем рассуждать следующим образом:

$$Q = KF \Delta T_{\text{ср}} \text{ или } KF = Q / \Delta T_{\text{ср}}.$$

Подставив значение K в формулу (17-6), получим

$$\ln \frac{T_d^K - T_b^H}{T_d^H - T_b^K} = -\frac{Q}{\Delta T_{\text{ср}}} \left(\frac{1}{W_d} - \frac{1}{W_b} \right),$$

откуда

$$\Delta T_{\text{ср}} = \left(\frac{Q}{W_b} + \frac{Q}{W_d} \right) / \left(\ln \frac{T_d^K - T_b^H}{T_d^H - T_b^K} \right),$$

но $Q = W_d (T_d^H - T_d^K)$ и $Q = W_b (T_b^K - T_b^H)$

следовательно

$$Q/W_d = T_d^H - T_d^K \text{ и } Q/W_b = T_b^K - T_b^H.$$

Выполнив соответствующую подстановку, получим

$$\Delta T_{\text{ср}} = \frac{T_b^K - T_b^H - T_d^K + T_d^H}{\ln \frac{T_d^K - T_b^H}{T_d^H - T_b^K}} = \frac{(T_d^K - T_b^H) - (T_d^H - T_b^K)}{\ln \frac{T_d^K - T_b^H}{T_d^H - T_b^K}}.$$

но $T_d^K - T_b^H = \Delta T_{\text{кон}}$ и $T_d^H - T_b^K = \Delta T_{\text{нач}}$,

тогда

$$\Delta T_{\text{ср}} = \frac{\Delta T_{\text{к}} - \Delta T_{\text{н}}}{\ln (\Delta T_{\text{н}}/\Delta T_{\text{к}})} = \frac{\Delta T_{\text{к}} - \Delta T_{\text{н}}}{2,3 \lg (\Delta T_{\text{к}}/\Delta T_{\text{н}})}. \quad (17-7)$$

Температура потока в любой точке поверхности нагрева может быть получена из уравнения (17-5):

$$\frac{T_d - T_b}{T_d^H - T_b^K} = e^{-KF_x (1/W_d - 1/W_b)} \quad (17-8)$$

или

$$T_d - T_b = (T_d^H - T_b^K) e^{-KF_x (1/W_d - 1/W_b)}. \quad (17-9)$$

Охлаждаясь до T_d , дымовые газы теряют $Q_d = W_d (T_d^H - T_d)$, а воздух приобретает $Q_b = W_b (T_b^K - T_b)$.

Из равенства Q_d и Q_b получим

$$T_b = T_b^K - \frac{W_d}{W_b} (T_d^H - T_d).$$

Подставив это значение T_b в основное уравнение (17-9), получим

$$T_d = T_d^K - \frac{W_d}{W_b} (T_d^H - T_d) + (T_d^H - T_b^K) e^{-KF_x (1/W_d - 1/W_b)}. \quad (17-10)$$

Решая это уравнение относительно T_d , получим

$$T_d = \frac{W_b T_b^K - W_d T_d^H + W_b (T_d^H - T_b^K) e^{-KF_x (1/W_d - 1/W_b)}}{W_b - W_d}. \quad (17-11)$$

Из этого уравнения можно определить конечные температуры дымовых газов и воздуха. Так, температуру T_d^K можно определить, если рассмотреть температуру дыма на выходе из рекуператора, т. е. при $F_x = F$

$$T_d^K = \frac{W_b T_b^K - W_d T_d^H + W_b (T_d^H - T_b^K) e^{-KF (1/W_d - 1/W_b)}}{W_b - W_d}.$$

Температуру воздуха на выходе из рекуператора $T_{\text{д}}^{\text{к}}$ можно определить из равенства

$$W_{\text{д}} (T_{\text{д}}^{\text{н}} - T_{\text{д}}^{\text{к}}) = W_{\text{в}} (T_{\text{в}}^{\text{к}} - T_{\text{в}}^{\text{н}}),$$

которое после подстановки значения для $T_{\text{д}}^{\text{к}}$ станет уравнением с одним неизвестным $T_{\text{в}}^{\text{к}}$.

При перекрестной схеме движения среднюю разность температур обычно определяют по выражению

$$\Delta T_{\text{ср}} = f \Delta T_{\text{ср. пр}}, \quad (17-12)$$

где $\Delta T_{\text{ср. пр}}$ — средняя разность температур при противотоке; f — поправочный множитель, зависящий от величин

$$R = \frac{T_{\text{д}}^{\text{н}} - T_{\text{д}}^{\text{к}}}{T_{\text{в}}^{\text{к}} - T_{\text{в}}^{\text{н}}} \quad \text{и} \quad P = \frac{T_{\text{в}}^{\text{к}} - T_{\text{в}}^{\text{н}}}{T_{\text{д}}^{\text{н}} - T_{\text{в}}^{\text{н}}}.$$

Функциональная зависимость $f = \Phi(R \text{ и } P)$ весьма сложна, поэтому для рекуператоров ее определяют по номограмме, представленной на рис. 17-2, которая получена для одноходового перекрестного движения.

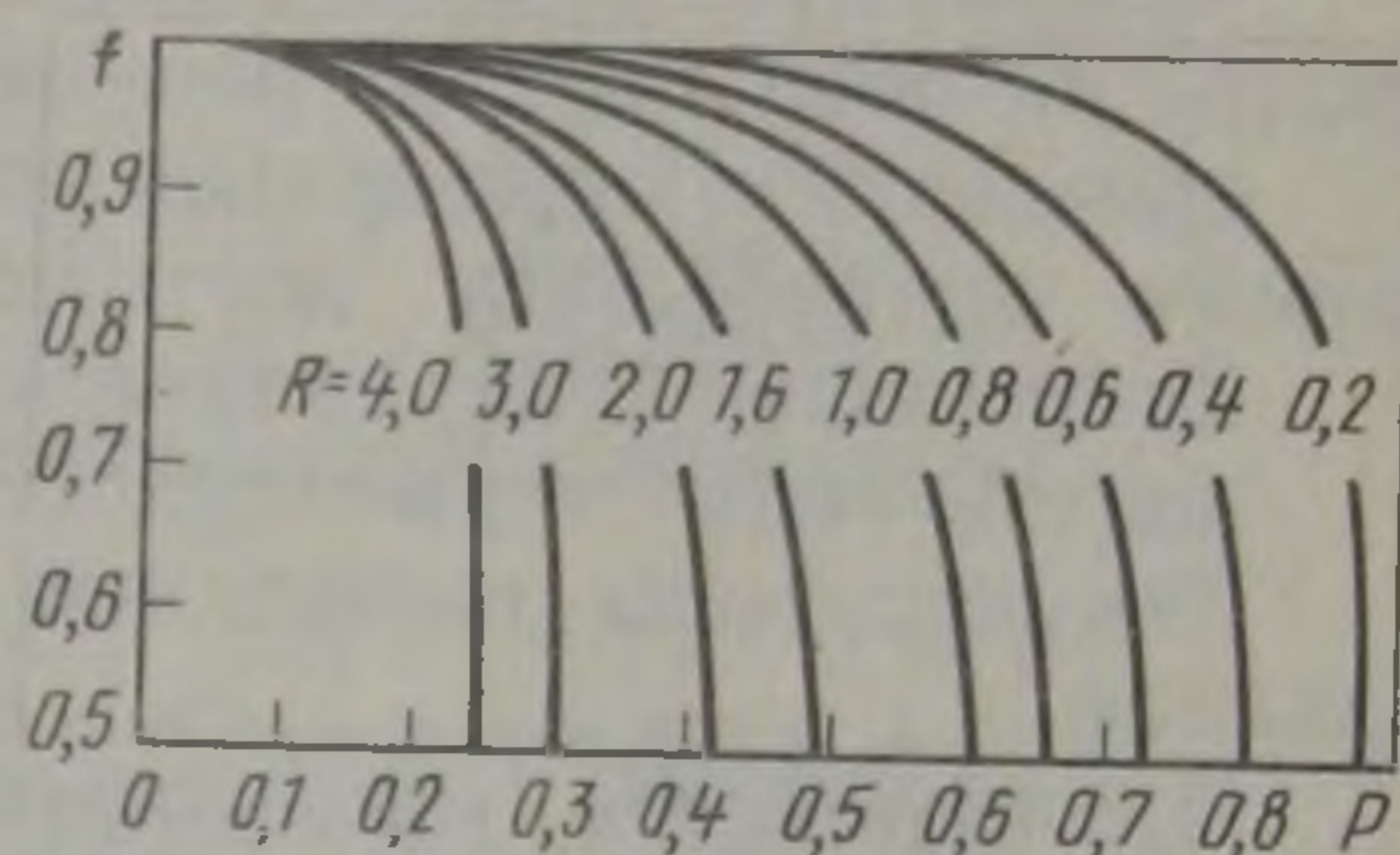


Рис. 17-2. Номограмма для определения множителя $f = \Phi(R, P)$

С увеличением числа ходов при перекрестном противотоке разность температур $\Delta T_{\text{ср}}$ приближается к разности температур при противотоке, причем если число противоточных ходов больше двух, то среднюю разность температур можно определять как для противоточного рекуператора.

Величины $\Delta T_{\text{н}}$ и $\Delta T_{\text{к}}$ означают соответственно большую и меньшую по абсолютной величине разность температур между газами и воздухом на входе в рекуператор и на выходе из него, т. е. разности при противотоке $T_{\text{д}}^{\text{н}} - T_{\text{в}}^{\text{к}}$ и $T_{\text{д}}^{\text{к}} - T_{\text{в}}^{\text{н}}$ и при прямотоке $T_{\text{д}}^{\text{н}} - T_{\text{в}}^{\text{н}}$ и $T_{\text{д}}^{\text{к}} - T_{\text{в}}^{\text{к}}$.

Таким образом, полученные выражения при известных начальной температуре дымовых газов (определяемой условиями работы печи) и воздуха (температуре атмосферы) позволяет найти температуру и разность температур в любой точке рекуператора, что необходимо, например для определения температуры стенки рекуператора. Температура стенки со стороны дымовых газов

$$T_{\text{д. ст}} = T_{\text{д}} - K (T_{\text{д}} - T_{\text{в}}) / \alpha_{\text{д}},$$

а со стороны воздуха

$$T_{\text{в. ст}} = T_{\text{в}} - K (T_{\text{д}} - T_{\text{в}}) / \alpha_{\text{в}}.$$

В металлических рекуператорах вследствие большой теплопроводности материала температурным перепадом по толщине

стенки можно пренебречь ($T_{д. ст} = T_{в. ст}$), в результате чего

$$T_{ст} = T_{в} + \frac{T_{д} - T_{в}}{1 + \alpha_{в}/\alpha_{д}}. \quad (17-13)$$

3. Конструкции рекуператоров

К конструкциям рекуператоров предъявляют следующие требования:

обеспечение максимальной степени утилизации тепла дымовых газов;

достаточная стойкость против воздействия дымовых газов с высокой температурой;

максимальная компактность, т. е. высокая удельная поверхность нагрева на 1 м³ рекуперативной насадки;

наивысший суммарный коэффициент теплопередачи K , что также способствует достижению компактности рекуператора;

наименьшее гидравлическое сопротивление;

достаточная герметичность.

Рекуператоры выполняют из металла и керамических материалов.

Преимущества металлических рекуператоров по сравнению с керамическими:

более высокий коэффициент теплопередачи и большая удельная поверхность нагрева; это обеспечивает лучшую компактность металлических рекуператоров и, следовательно, меньший объем при одинаковой общей поверхности нагрева;

нет необходимости в глубоких подземных боровых, можно размещать рекуператоры над печами;

повышенная герметичность.

Сварные металлические рекуператоры можно применять для подогрева как воздуха, так и газа.

Недостатком металлических рекуператоров является их малая стойкость против воздействия высоких температур.

Керамические рекуператоры более громоздки, характеризуются меньшим коэффициентом теплопередачи и меньшей удельной поверхностью нагрева. Они мало герметичны и совершенно непригодны для подогрева газа. Размещают керамические рекуператоры только под печами, они занимают много места и требуют устройства подземных боровых. Однако керамические рекуператоры могут устойчиво работать при температуре дымовых газов 1200—1350 °С, в них обеспечивается подогрев воздуха до 800—850 °С, что позволяет применять их на высокотемпературных печах.

Металлические рекуператоры

Металл рекуператоров работает в условиях высоких температур при окисляющем действии дымовых газов. Стойкость металла определяет работоспособность рекуператора. Для изготовления ре-

куператоров применяют обыкновенные углеродистые стали, а также легированные стали и чугуны. Углеродистые стали могут работать при температуре стенки 450—500 °С и обеспечивают подогрев воздуха до 250—300 °С, а серые чугуны — при температуре стенки 500—550 °С. И в том, и в другом случае температура дымовых газов на входе в рекуператор не должна превышать 700—750 °С.

Для увеличения стойкости рекуператоров и повышения температуры подогрева воздуха их изготавливают из чугунов и сталей, легированных в основном хромом, кремнием и алюминием. При-

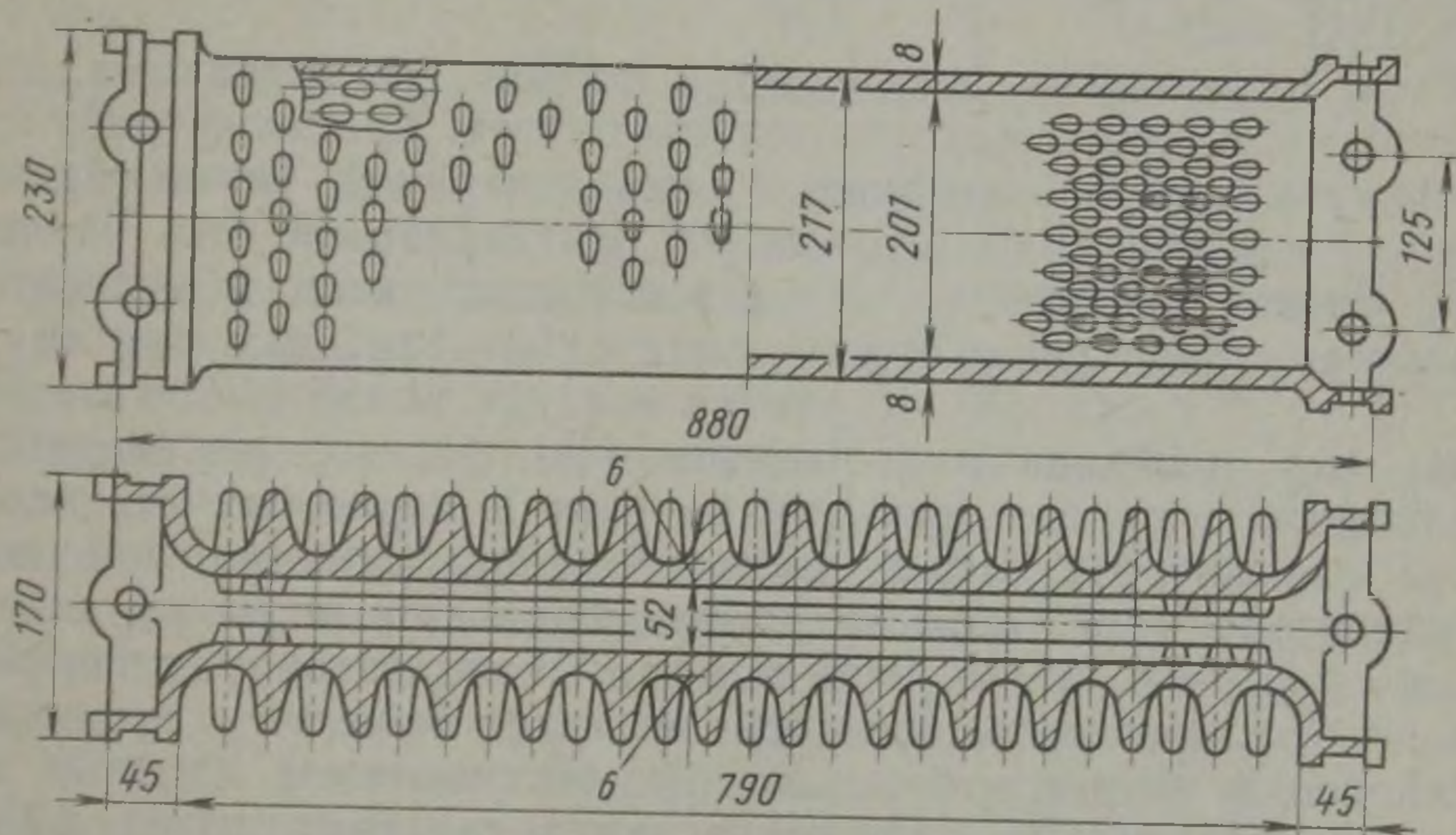


Рис. 17-3. Труба игольчатого рекуператора

менение легированных чугунов и сталей позволяет повысить температуру подогрева воздуха, но вместе с тем приводит к резкому увеличению стоимости рекуператоров. Часто для уменьшения стоимости из жаропрочного металла выполняют только ту часть рекуператора, которая работает при наиболее высоких температурах; остальные части изготавливают из углеродистого металла.

Применяют конвективные, радиационные и комбинированные конвективно-радиационные металлические рекуператоры. Конвективные металлические рекуператоры могут быть игольчатые и трубчатые. В последнее время наибольшее распространение получили трубчатые сварные рекуператоры, так как игольчатые не обеспечивают должной герметичности.

Конвективные рекуператоры. Игольчатые рекуператоры изготавливают из чугуна типа силал. Основная часть игольчатых рекуператоров — игольчатая труба представлена на рис. 17-3. Иглы могут быть расположены как на внутренней, так и на наружной стороне. Они позволяют увеличить действительную поверхность нагрева и турбулизировать поток газов, что приводит к увеличению коэффициента теплопередачи до 93—116,3 Вт/(м²·К) при пересчете на гладкую поверхность.

Обычно внутри труб пропускают воздух, а снаружи — дымовые газы.

Иглы, находящиеся на дымовой стороне рекуператоров, быстро засоряются, поэтому используют игольчатые рекуператоры с иглами только на воздушной стороне. По характеру оребрения наружной поверхности трубы рекуператора выпускают двух типов — 17,5 и 28, что соответствует расстоянию между иглами в миллиметрах. На внутренней, воздушной стороне, расстояние между иглами всегда одинаково и равно 14 мм. Все трубы, как с наружными иглами, так и без них, выпускают длиной 880, 1135, 1640 мм.

Весь игольчатый рекуператор собран из отдельных труб с фланцами, соединяемых при помощи болтов. Крайнюю трубу прикрепляют к специальной раме, а затем к каркасу. Таким образом, между фланцами труб игольчатых рекуператоров есть большое число стыков, вследствие чего газоплотность всего рекуператора невысокая. Если рекуператор состоит из крупных секций (по 80—100 труб в каждой), то утечка воздуха может достигать 20—30 %, что необходимо учитывать при расчете рекуператора. Игольчатые рекуператоры, так же как и керамические, непригодны для нагрева газообразного топлива. Секция игольчатого рекуператора, через которую воздух проходит, не меняя направления движения, называется ходом. Число ходов рекуператора зависит от температуры подогрева воздуха. Чаще всего применяют двухходовые рекуператоры, которые обеспечивают подогрев воздуха до 300—400 °С при температуре дымовых газов 800 °С. Скорость движения воздуха обычно не превышает 10 м/с, а дымовых газов 3—14 м/с. Теплопередача в игольчатых рекуператорах осуществляется в условиях перекрестного тока и зависит в основном от скорости движения газообразных сред. Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К), игольчатых поверхностей может быть найден по формуле

$$\alpha = B\omega_0^n. \quad (17-14)$$

Значения опытных коэффициентов B и n указаны в табл. 17-1.

Аэродинамическое сопротивление, Па, внутренних поверхностей игольчатых труб можно найти из выражения

$$h_B = A\omega_0^2 \frac{T_{cp}}{273}, \quad (17-15)$$

где ω_0 — скорость воздуха при 273 К; T_{cp} — средняя температура воздуха в трубе, К; A — коэффициент, зависящий от длины трубы.

Трубчатые рекуператоры выполняют из цельнотянутых труб различного диаметра. Конструкции их многообразны. Часто применяют рекуператоры с прямыми трубами такой конструкции, как показано на рис. 17-4, а. В этом рекуператоре воздух проходит между трубами, а дымовые газы — внутри труб. На пути

Т а б л и ц а 17-1. Значения B и λ для игольчатых труб

Поверхность	B для поверхности		λ
	условной (без игл)	действительной	
Внутренняя игольчатых труб всех типов	47,9	14,55	1,03
Наружная труб с шагом, мм:			
17,5	138	25,7	0,755
28	80,2	20,3	0,74
без игл	19,8	12,45	0,72

воздуха может быть несколько поворотов, тогда рекуператор работает как многоходовый теплообменник. Подобные рекуператоры обеспечивают подогрев воздуха до 300—400 °С при температуре дымовых газов 800 °С и суммарном коэффициенте теплопередачи 17-23 Вт/(м²·К).

Следует отметить, что в процессе работы (особенно разогрева) происходит термический рост рекуператора в тем большей степени, чем длиннее трубы. Поэтому такие рекуператоры часто «подвешивают», т. е. закрепляют их только в верхней части.

Кроме рекуператоров из прямых труб, в боровах печей удобно размещать рекуператоры с петлеобразной формой труб (рис. 17-4, б). Этот рекуператор можно с успехом использовать на печах небольших размеров, в нем можно обеспечить подогрев воздуха до 400 °С при температуре дымовых газов 800—850 °С и коэффициенте теплопередачи 23 Вт/(м²·К). Устройство висящих труб у рекуператора дает возможность обойтись без применения компенсаторов термического расширения.

Радиационные рекуператоры. В последние годы все шире применяют радиационные металлические рекуператоры, в которых благодаря значительной толщине слоя газов их тепловое излучение является определяющим видом теплообмена на дымовой стороне рекуператора. В радиационных рекуператорах дымовые газы, нагретые до высокой температуры, проходят с малой скоростью в каналах большого сечения. Применение радиационных рекуператоров целесообразно при температуре дымовых газов не ниже 800 °С, так как до этой температуры тепловое излучение относительно невелико. В радиационных рекуператорах воздух движется со скоростью 20—30 м/с и выше, что обеспечивает весьма высокие коэффициенты теплоотдачи на воздушной стороне и позволяет получать значительную тепловую нагрузку поверхности нагрева. Однако благодаря интенсивному теплообмену от стенки к воздуху высокая тепловая нагрузка не вызывает опасного перегрева материала рекуператора. Температура стенки рекуператора обычно превышает температуру воздуха на 100—150 °С. В радиационных рекуператорах часто при-

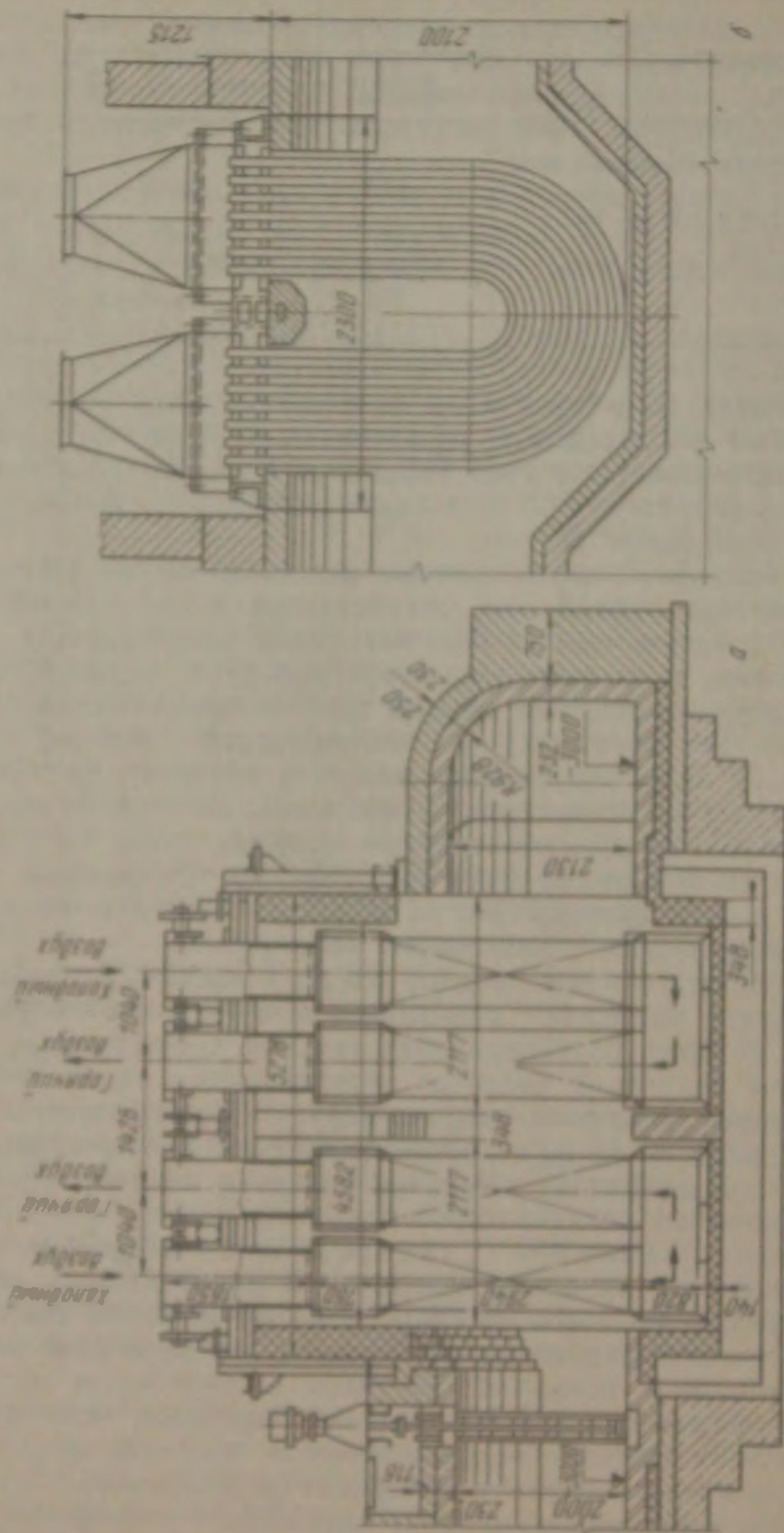


Рис. 17-4. Металлическая трубчатая регенераторы с проволокой и в сетлеобработанных 6 трубами

меняют прямоточную схему движения теплоносителей, которая вместе с интенсивным отбором тепла на воздушной стороне позволяет повысить температурный предел применения металлических радиационных рекуператоров до 1400—1500 °С. Весьма важным достоинством радиационных рекуператоров является значительно меньшая, чем у других металлических рекупера-

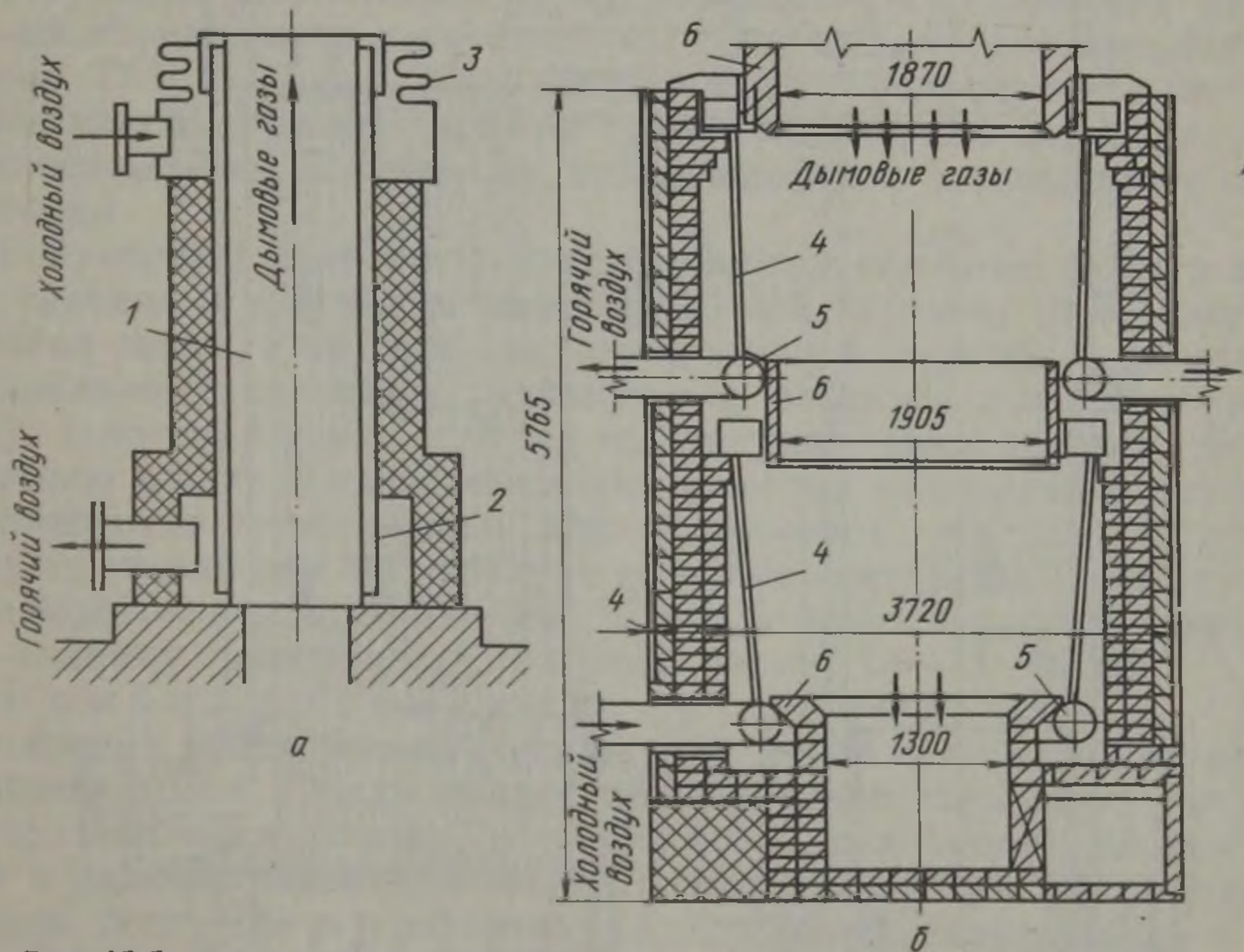


Рис. 17-5. Радиационные рекуператоры:

a — щелевой; *b* — трубчатый корзиночный; 1 — внутренний цилиндр; 2 — наружный цилиндр; 3 — устройство для компенсации теплового расширения цилиндров; 4 — трубки рекуператора; 5 — кольцевые воздушные коллекторы; 6 — защитные своды кольцевых коллекторов

торов, засоряемость поверхности нагрева, располагаемой обычно вертикально. Вместе с тем радиационные рекуператоры более громоздки и требуют более жаростойких материалов.

В настоящее время чаще всего применяют щелевые и трубчатые радиационные рекуператоры.

Щелевые рекуператоры (рис. 17-5, *a*) выполняют из двух концентрических цилиндров, сваренных из листов жаропрочной стали толщиной 4—8 мм. Диаметр дымового цилиндра зависит от размера рекуператора и обычно изменяется в пределах от 0,7 до 1,5 м. Ширина кольцевого канала для прохода воздуха равна 10—60 мм. На обоих концах рекуператора выполняются кольцевые короба для подвода и отвода воздуха. Воздух должен подводиться максимально равномерно, так как для нормальной эксплуатации щелевого радиационного рекуператора необходимо, чтобы вся его по-

верхность равномерно охлаждалась воздухом. В противном случае рекуператор будет коробиться и выходить из строя. Для компенсации теплового расширения цилиндров предусматривают специальные устройства. Снижение тепловых потерь достигается

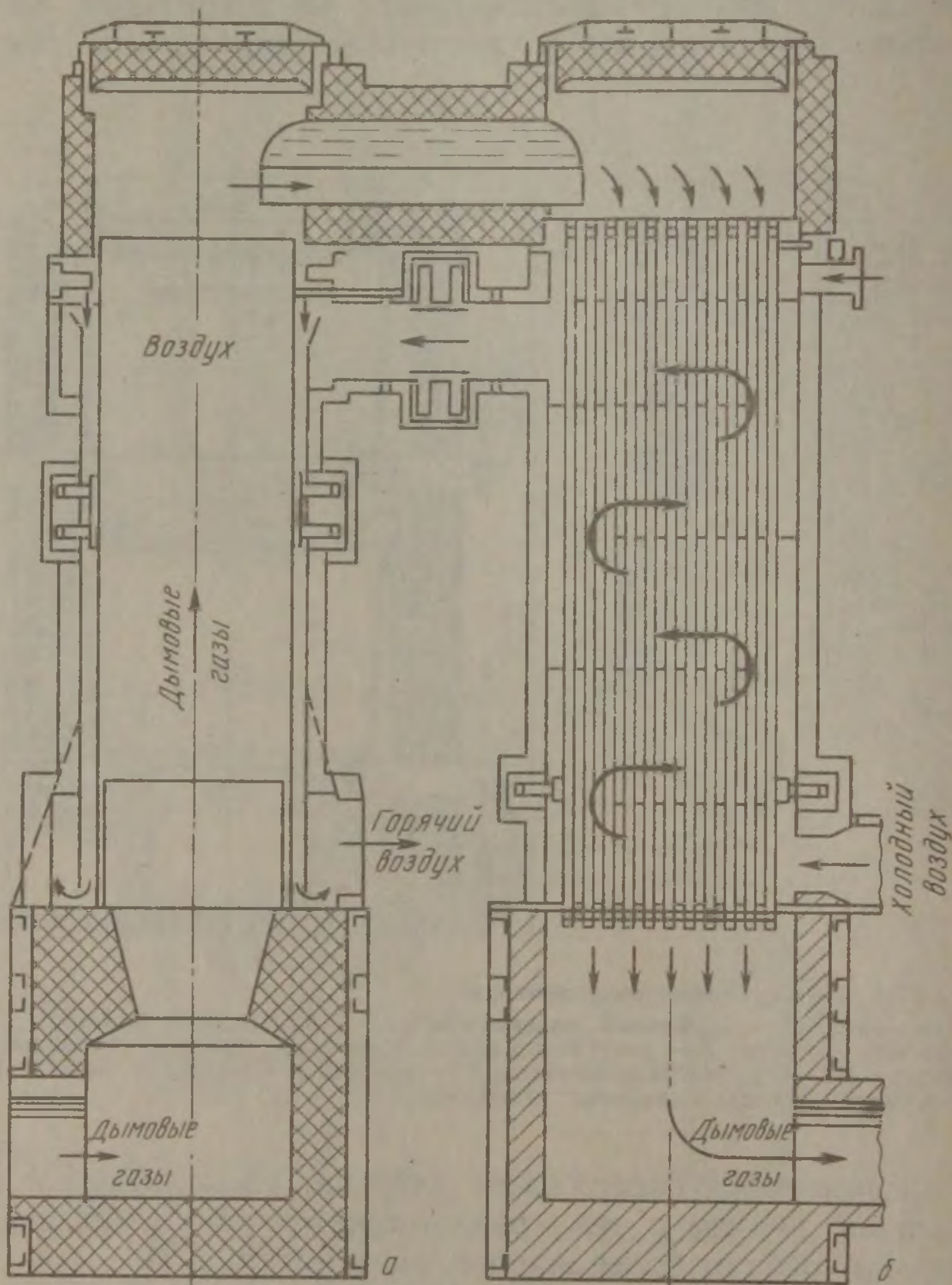


Рис. 17-6. Комбинированный радиационно-конвективный рекуператор:

а — радиационная часть; б — конвективная часть

тепловой изоляцией наружного цилиндра. Важнейшим фактором, обеспечивающим эффективную работу радиационных рекуператоров, является развитый теплообмен на воздушной стороне, который тем интенсивнее, чем выше скорость движения воздуха. Однако обеспечение высокой скорости движения воздуха требует соответствующего повышения его давления, что в свою очередь предъявляет дополнительные требования к строительной проч-

ности радиационных рекуператоров. Щелевые радиационные рекуператоры достаточно устойчиво работают при давлении воздуха до 4—5 кПа, которого бывает недостаточно для обеспечения желаемой скорости движения воздуха. В случае необходимости повышения давления воздуха, и следовательно, строительной прочности применяют трубчатые радиационные рекуператоры.

Трубчатые радиационные рекуператоры бывают различных конструкций. Наибольшее распространение получили так называемые корзиночные рекуператоры, один из которых представлен на рис. 17-5, б. Поверхность нагрева такого рекуператора состоит из множества стальных прямых трубок небольшого диаметра, расположенных по окружности и приваренных к кольцевым коллекторам.

Рекуператор состоит из двух трубчатых «корзин». Воздух входит сначала в нижний коллектор нижней корзины, поступает по трубкам вверх, в верхний коллектор нижней корзины, а оттуда по специальному внешнему трубопроводу подается в верхнюю корзину, в которой и завершается его нагрев. Таким образом, по отношению к направлению движения дымовых газов осуществляется противоточно-прямоточный метод движения воздуха. В таких рекуператорах при температуре дымовых газов 1300 °С воздух может подогреться до 800—850 °С при средней тепловой нагрузке на единицу поверхности нагрева около 13—14 Вт/м².

Комбинированные рекуператоры. Для повышения эффективности утилизации тепла отходящих из печей дымовых газов иногда бывает целесообразно выполнять рекуператор комбинированным, состоящим из двух частей: конвективной и радиационной (рис. 17-6). В таком рекуператоре холодный воздух поступает в конвективный трубчатый рекуператор, а затем переходит для окончательного нагрева в радиационный рекуператор.

Керамические рекуператоры

Работа керамического рекуператора в значительной степени зависит от того, из какого материала выполнены его элементы. Работая при весьма высоких температурах, материал рекуператора должен обладать достаточной огнеупорностью, хорошей термостойкостью, высокой температурой начала деформации при нагрузке, высокой теплопроводностью, необходимыми механическими свойствами, низким коэффициентом линейного расширения и быть достаточно стойким против воздействия железистых шлаков.

Долгое время единственным материалом для изготовления керамических рекуператоров был шамот. Однако низкие газоплотность и теплопроводность шамота обуславливает малую тепловую эффективность и большую громоздкость рекуператоров. Стремление использовать материалы с высокой огнеупорностью и теплопроводностью привело к применению в керамических реку-

ператорах карборундовых (SiC) и высокоглиноземистых $Al_2O_3 > 60\%$ огнеупоров, а также карбо-шамотной смеси, содержащей 35—39 % карборунда. Изделия из нее характеризуются лучшими свойствами, чем шамотные, но по теплопроводности и огнеупорности уступают карборундовым. В отечественной практике известны также случаи применения высокоглиноземистых огнеупоров для изготовления керамических рекуператоров, которые свидетельствуют о целесообразности применения подобных материалов. Более широкое распространение высокоглиноземистых материалов ограничено их высокой стоимостью.

Эффективность работы керамических рекуператоров в основном зависит от величины суммарного коэффициента теплопередачи, герметичности и удельной поверхности нагрева (m^2/m^3 насадки рекуператора). Конструкция рекуператора в значительной степени влияет не только на эти основные характеристики, но и на работу рекуператора в целом. Керамические рекуператоры собирают из отдельных труб или блоков, поэтому в насадке большое число швов.

Герметичность рекуператоров существенно зависит от положения шва (вертикального или горизонтального) и длины швов, приходящихся на $1 m^3$ насадки. Лучшая плотность достигается при горизонтальном расположении швов, так как при этом происходит самоуплотнение шва под действием массы вышележащих частей рекуператора. Кроме того, горизонтальные швы легче поддаются уплотнению.

При нагреве рекуперативная насадка расширяется (растет), поэтому для компенсации этого роста верхняя часть насадки не должна быть жестко связана с окружающими стенками. С этой целью предусмотрены специальные затворы (часто песочные), позволяющие расширяться рекуперативной насадке, но перекрывающие зазор и препятствующие утечке воздуха через этот зазор на дымовую сторону. Один из таких затворов, применяемый на карбо-шамотных рекуператорах, показан на рис. 17-7, б. На отечественных предприятиях применяют шамотные и карбо-шамотные рекуператоры.

Шамотный рекуператор (рис. 17-7, а) собирают из фасонных кирпичей четырех марок. Основной его частью являются установленные вертикально фасонные блоки, в результате чего образуются горизонтальные швы. Воздух движется снизу вверх по четырем каналам внутри блока.

Дымовые газы направляются между блоками, совершая петлеобразное движение и омывая их с двух сторон. Удельная поверхность рекуператора из шамотных блоков составляет $6,35 m^2/m^3$, масса $980 kg/m^3$ насадки. Рекуператор такого типа обеспечивает подогрев воздуха до $500—600^\circ C$ при температуре дымовых газов $100—1100^\circ C$ и коэффициенте теплопередачи $4,65—5,8 Вт/(m^2 \cdot K)$. Отличительная особенность шамотного рекуператора состоит в том, что возникающие на пути воздуха сопротивления невелики

и поэтому для движения воздуха может быть использован его геометрический напор. Печи, оборудованные рекуператорами подобного типа и инжекционными горелками, могут работать при отсутствии вентиляторов. В этом случае достигается меньший перепад давлений между воздушными и дымовыми каналами, что приводит к увеличению общей герметичности рекуператора, не превышающей 10 %.

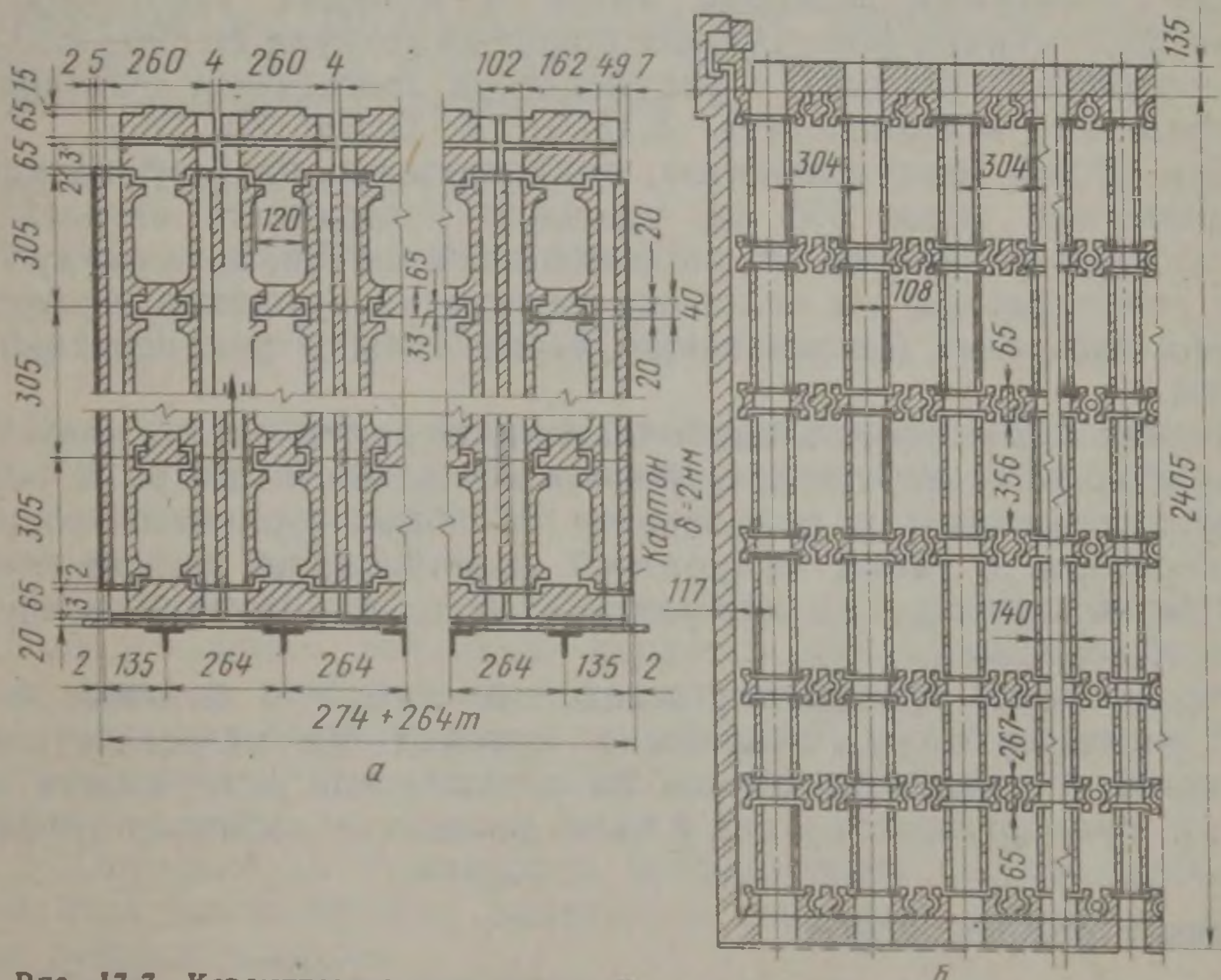


Рис. 17-7. Керамические рекуператоры:
 а — из шамотных блоков; б — из карбо-шамотных труб

Во время кладки рекуператора места соединения фасонных блоков и перегородок промазывают специальным раствором твердеющего на воздухе цемента, в состав которого (по массе) входит 90 % шамотного порошка, 10 % боксита уральского, 15 % (сверх 100 %) растворимого стекла.

Карбо-шамотный трубчатый рекуператор (см. рис. 17-7) применяют для нагревательных колодцев, а также стекловаренных и методических печей. Этот рекуператор собирают из восьмигранных трубок высотой 300—400 мм, которые располагают в шахматном порядке и соединяют между собой шамотными восьмигранными муфтами. В верхней части рекуператора предусмотрен специальный песочный затвор для создания большей газоплотности. Дымовые газы движутся внутри трубок сверху вниз, воздух омывает керамические трубки снаружи. Он движется перпендикулярно дымовым газам и поднимается снизу вверх,

причем для протекания его из одного хода в другой в перегородках устанавливают необходимое число промежуточных вставок 3 (см. рис. 17-7).

Живое сечение рекуператора по воздушному тракту для трубок высотой 400 мм составляет 55 %, а по дымовому тракту 19 %. Скорость движения воздуха при нормальных условиях равна 1—2 м/с, а дымовых газов 0,7—1 м/с.

Рекуператор данной конструкции используют на печах, температура отходящих дымовых газов в которых 1100—1400 °С. Такая конструкция обеспечивает подогрев воздуха до 800—850 °С. При подобных условиях в рекуператоре достигается суммарный коэффициент теплопередачи 8,15—10,4 Вт/(м²·К).

При общей массе элементов, приходящихся на 1 м³ насадки, составляющей около 550 кг, удельная поверхность нагрева на 1 м³ насадки составляет, м²: по дымовым газам 9,5; по воздуху 7,5.

У рекуператора два основных недостатка — низкая герметичность и засорение (ошлакование) верхней части рекуперативных трубок.

Низкая герметичность карбо-шамотного рекуператора является его наибольшим недостатком; утечка иногда достигает 40 % всего воздуха, поданного в рекуператор. Особыми приемами сборки рекуператора, а также аккуратной эксплуатацией можно повысить герметичность, но совершенно устранить утечку воздуха почти невозможно.

Ошлакование происходит вследствие того, что дымовые газы несут частички сажи, окалины и коксика (на нагревательных колодцах), которые, осаждаясь на раскаленной поверхности керамики, привариваются к ней и часто полностью забивают трубки.

4. Расчет рекуператоров

Обычно целью расчета является определение размеров рекуператора, обеспечивающих подогрев требуемого количества воздуха (газа) до необходимой температуры. В отдельных случаях приходится решать обратную задачу. Расчет рекуператоров ведут обычно в следующем порядке:

1. Составление теплового баланса. Для газоплотных рекуператоров тепловой баланс составляют с учетом 10 % потерь тепла в окружающую среду, т. е.

$$0,9V (c_d^n T_d^n - c_d^k T_d^k) = V_b (c_b^k T_b^k - c_b^n T_b^n). \quad (17-16)$$

При составлении теплового баланса для негазоплотных рекуператоров необходимо учитывать утечку воздуха в дымовые каналы. Это особенно важно при расчете керамических рекуператоров. Утечку воздуха целесообразно принимать в пределах от 15 % (для шамотных рекуператоров методических печей) до 30 % (для рекуператоров нагревательных колодцев) первоначального количества воздуха, поданного в рекуператор. При этом

уравнение теплового баланса может быть представлено следующим образом:

$$0,9V_d (c_d^H T_d^H - c_d^K T_d^K) = V_B c_B^K T_B^K + \Delta V_B c_B T_d^K. \quad (17-17)$$

Уравнения (17-16) и (17-17) должны быть решены относительно температуры T_d^K дымовых газов, уходящих из рекуператора.

Параллельно с расчетом теплового баланса уместно определить необходимое для последующего расчета количество тепла, Вт, передаваемого через поверхность нагрева рекуператора: для газоплотных конструкций

$$Q_P = V_B (c_B^K T_B^K - c_B^H T_B^H), \quad (17-18)$$

для негазоплотных конструкций

$$Q_P = \left(V_B + \frac{\Delta V_B}{2} \right) (c_B^K T_B^K - c_B^H T_B^H), \quad (17-19)$$

где V_d и V_B — объем дымовых газов и воздуха, м³/ч; ΔV_B — количество воздуха, ушедшее в дымовые каналы, м³/ч; c_d и c_B — теплоемкости дымовых газов и воздуха; при соответствующих температурах, кДж/(м³·ч).

2. Определение средней разности температур. При этом необходимо учитывать взаимный характер движения газообразных сред, вводя в необходимых случаях поправку на перекрестный ток. Как уже указывалось, при $\Delta T_B / \Delta T_K > 0,5$ среднюю разность температур теплоносителей можно определять как среднеарифметическую.

3. Определение суммарного коэффициента теплопередачи K . При этом целесообразно задаваться скоростью движения дымовых газов и воздуха.

Для металлических рекуператоров скорость движения дымовых газов ω_0 следует принимать равной 3—5 м/с, скорость воздуха 7—10 м/с. Для керамических рекуператоров из-за их низкой газоплотности скорость принимают меньшей. Так, для рекуператоров нагревательных колодцев (при 0 °С) целесообразно принимать скорость воздуха 0,8—1,2, а скорость дымовых газов 0,5—0,8 м/с. При расчете рекуператоров методических печей $\omega_{0B} = 0,7 \div 1$ и $\omega_{0d} = 1,2 \div 2$ м/с. Зная скорость движения и температуры газообразных сред, применяя выражения, приведенные в томе I книги, можно определить локальные коэффициенты теплоотдачи на воздушной и дымовой сторонах.

4. Определение общей поверхности нагрева и размеров рекуператора. Для определения поверхности нагрева пользуются выражением (17-1). Разделив общую поверхность нагрева рекуператора на удельную, определенную для каждой конструкции, легко получить объем рекуператора и перейти к определению его размеров.

После теплового расчета рекуператора определяют аэродинамическое сопротивление по дымовому и воздушному трактам.

При расчете рекуператоров печей, работа которых характеризуется переменной во времени тепловой нагрузкой, после расчета на максимальный расход топлива необходимо провести, кроме того, проверочный расчет на наименьший расход топлива.

Глава 18

ТЕПЛОСИЛОВЫЕ УСТРОЙСТВА

Энергетическое хозяйство металлургического предприятия предназначено для выработки и распределения энергии или энергоносителей разных видов. К основным энергетическим объектам предприятия относятся: тепловая электрическая станция (ТЭЦ) или паро-воздуходувная станция (ПВС), кислородный цех, теплосиловой цех, цех тепловых и газовых сетей и др.

Кроме электроэнергии на предприятии вырабатываются такие энергоносители, как пар и горячая вода, сжатый воздух, кислород. Теплоэнергетическое оборудование или теплосиловые устройства, на которых получают тот или иной энергоноситель, состоит из парогенераторов, паровых и газовых турбин, турбокомпрессоров, воздуходувок и т. д. На производство энергоносителей затрачивается более 13 % от всей потребляемой заводом энергии.

К парогенераторам относятся энергетические котельные агрегаты, расположенные на ТЭЦ, котлы-утилизаторы (КУ) и системы испарительного охлаждения (ИО), размещенные вблизи металлургических печей.

1. Котельные агрегаты ТЭЦ

Энергетический котельный агрегат предназначен для выработки перегретого водяного пара энергетических параметров, т. е. давлением от 1,4 до 14 МПа с температурой 420—560 °С.

Работу парового котла обеспечивают системы топливоприготовления и топливоподачи, устройства для сжигания топлива, системы шлако- и золоудаления, химводоочистки и КИП и автоматики (рис. 18-1).

Воздух, необходимый для сжигания топлива, подогревается в воздухоподогревателе — в трубчатом или регенеративном теплообменнике.

Эффективность преобразования энергии топлива в энергию пара в котле характеризует коэффициент полезного действия. К. п. д. котельного агрегата определяют как отношение полезно затраченного тепла ко всему, выделенному при сжигании топлива. Для современных крупных котельных агрегатов к. п. д. состав-

ляет 80—90 %. Паропроизводительность достигает 420 т/ч при давлении 14 МПа.

Котлы отапливают пылевидным угольным, газовым, а также жидким топливом. На ТЭЦ металлургических предприятий, как правило, отопление комбинированное, а котельные агрегаты оборудованы устройствами для сжигания 2—3 видов топлива.

Расчет теплообмена в котельном агрегате дает возможность определить величину поверхностей нагрева H при заданной паропроизводительности D или наоборот, для выбранного типа котла

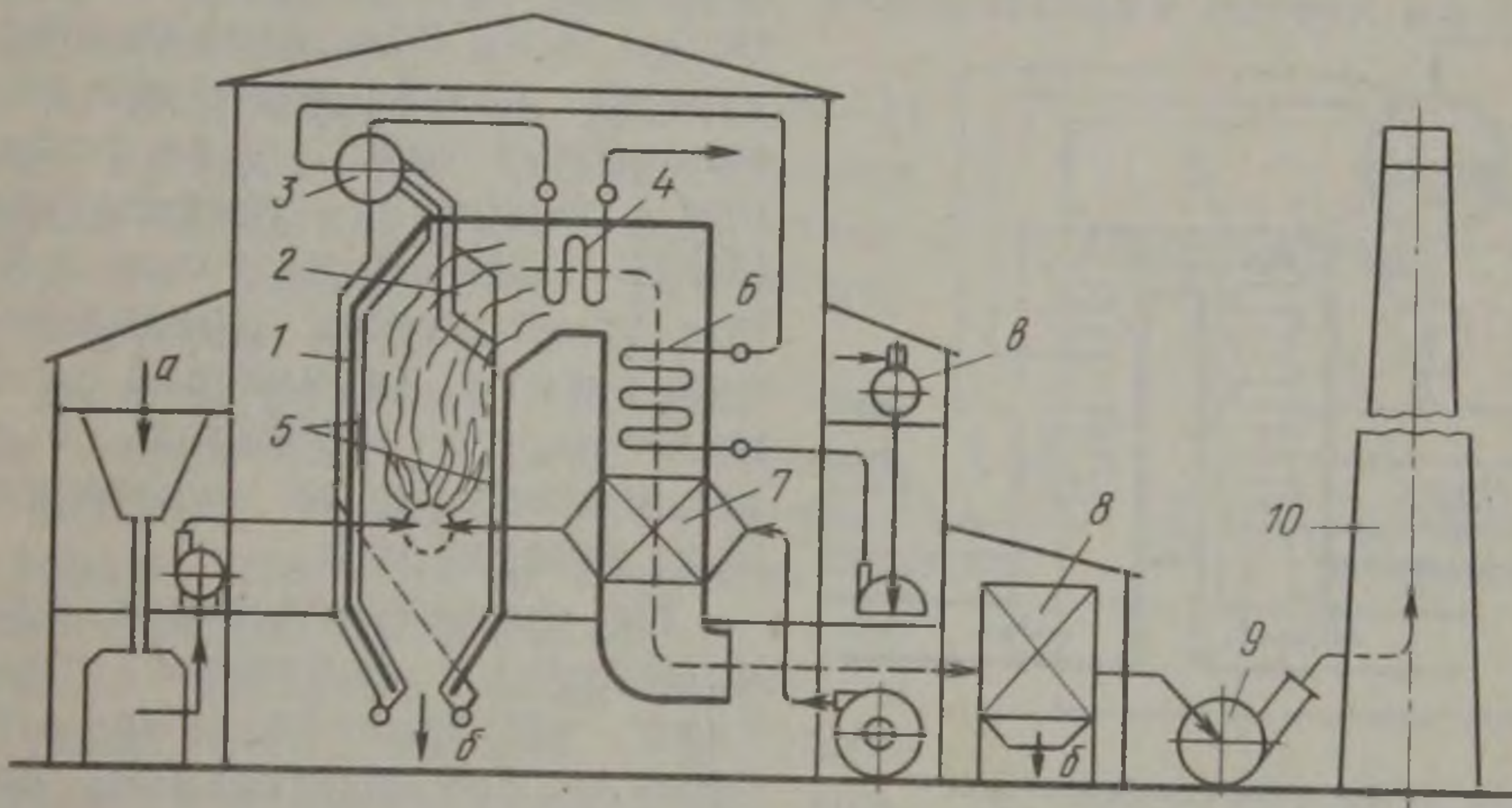


Рис. 18-1. Принципиальная схема котельной установки:

a — подача топлива; b — удаление золы и шлака; c — химическая очистка:

1 — обмуровка котла; 2 — трубы конвективной поверхности; 3 — барабан; 4 — пароперегреватель; 5 — экранные трубы; 6 — водяной экономайзер; 7 — воздухоподогреватель; 8 — золоуловитель; 9 — дымосос; 10 — дымовая труба

с поверхностью нагрева H уточнить его паропроизводительность D . В основе расчетов лежат уравнения теплового баланса.

Движение продуктов сгорания в газоходах котельного агрегата обеспечивается дымососом, установленным за золоуловителем перед дымовой трубой. Тип золоуловителя, как правило, зависит от вида сжигаемого топлива — центробежный скруббер, батарейный циклон или электрофильтр.

Выбор типа и режима работы дымососа осуществляют на основе аэродинамического расчета котельного агрегата. При конструировании или реконструкции котла выполняют также расчет и оценку надежности циркуляции. Циркуляция в пароводяном контуре котла может быть организована по естественному или принудительному принципу. В первом случае движение внутри труб вызывается разностью плотностей воды и пароводяной смеси, во втором — напором, создаваемым циркуляционным насосом.

На многих ТЭЦ установлены котлы Барнаульского и Таганрогского котельных заводов паропроизводительностью 200—400 т/ч перегретого пара.

2. Котлы-утилизаторы

В отличие от энергетических котельных агрегатов в котлах-утилизаторах (КУ) вместо тепла от сжигания топлива используется физическое тепло отходящих газов промышленных печей. Основная задача КУ — снизить температуру выбрасываемых в атмосферу газов и тем самым повысить к. п. д. печи.

Котел-утилизатор (рис. 18-2) состоит из трубчатых испарительных поверхностей нагрева 2, пароперегревателя 1 и водяного экономайзера 3. В некоторых типах КУ для низкотемпературных газов пароперегреватель отсутствует. Для работы при высоких температурах (1000—1200 °С) на входе в КУ предусматривают радиационную камеру, за которой размещают пароперегреватель, а далее конвективные испарительные поверхности.

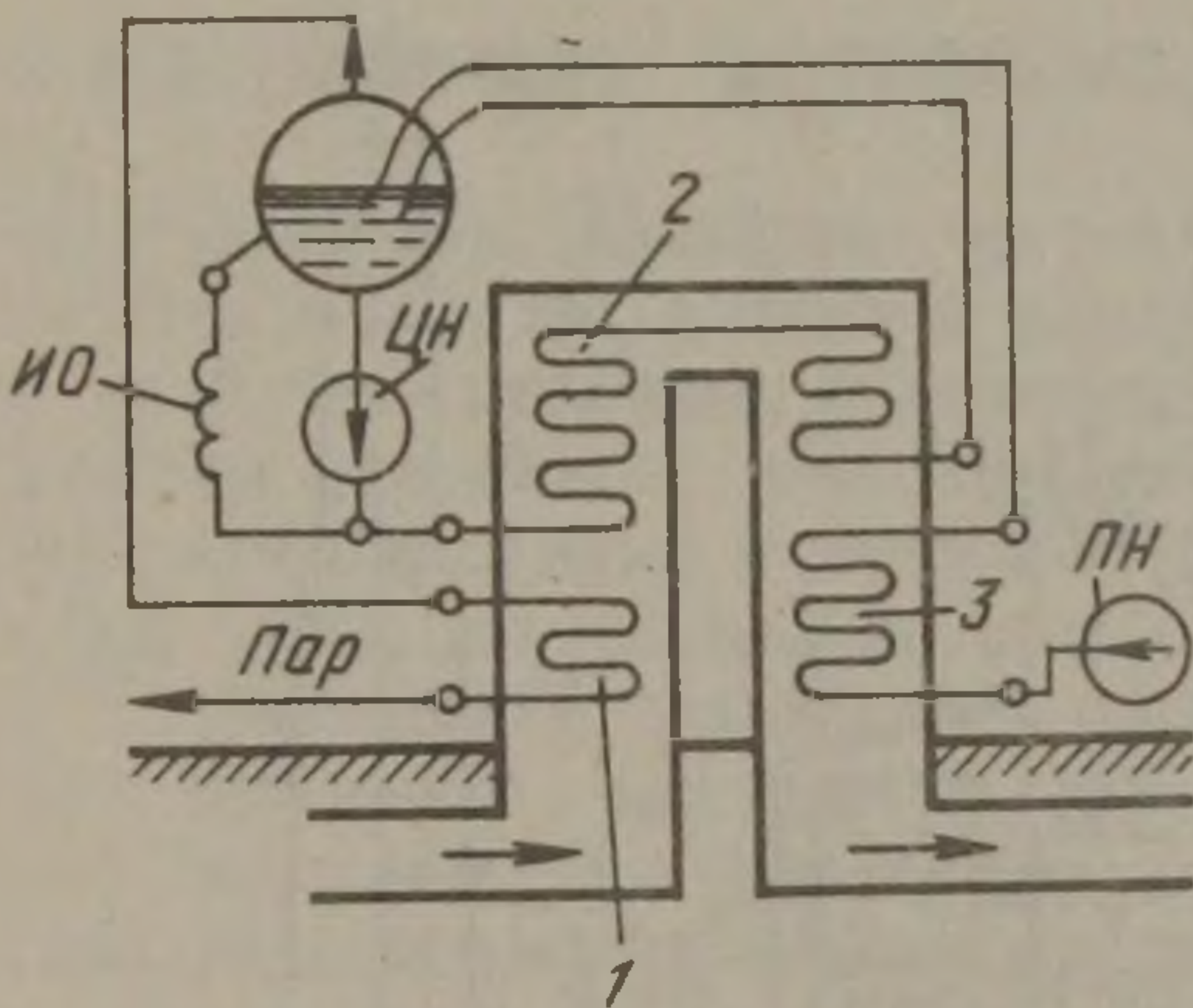


Рис. 18-2. Схема котла-утилизатора:

ЦН и ПН — циркуляционный и питательный насосы; ИО — вариант подключения контура испарительного охлаждения

На металлургических предприятиях в основном применяют унифицированные агрегаты с принудительной циркуляцией пароводяной смеси типа КУ-125, КУ-100-1 и КУ-80-3. Первая цифра в мар-

кировке означает максимальный расход газов через котел в тыс. м³/ч. Допустимые температуры газа на входе 650-850 °С, давление пара $p = 1,8 \div 4,5$ МПа, $T = 365 \div 385$ °С. Паропроизводительность достигает 30—41 т/ч.

Расчеты (тепловой, аэродинамический) котлов-утилизаторов выполняют по тем же нормам, как и энергетических котлов. При этом удельные показатели относят не к 1 м³ или 1 кг сжигаемого топлива, а к 1 м³ отходящих газов, поступающих в котел-утилизатор.

3. Турбинные установки

Паротурбинные установки

Основным элементом турбинных установок является турбина — двигатель с непрерывным рабочим процессом. Энергия рабочего тела (пара, газа или воды) на лопатках рабочего колеса турбин непрерывно преобразуется в механическую. Механическая энергия, полученная колесом, определяется разностью кинематических энергий рабочего тела на входе в канал, образованный соседними лопатками колеса турбины, и выходе из него. В паровых

турбинах для создания высокой скорости на входе в канал применяют сопла, в которых потенциальная энергия пара частично или полностью преобразуется в кинетическую. Давление пара падает, скорость растет. Из уравнения баланса энергии несложно определить зависимость скорости пара на выходе из сопла ω_1 , м/с (или входа на лопатку) от величины теплоперепада H_a , т. е. разности энтальпий пара i до и после сопла

$$\omega_1 = \varphi \sqrt{2(i_1 - i_{2a})} = \varphi \sqrt{2H_a},$$

где φ — коэффициент скорости, учитывающий потери на трение, вихреобразование и т. п.

В диаграмме $i-S$ (рис. 18-3) этот процесс для одной ступени (сопло—лопатка) имеет вид отрезка $1-2a$ (адиабатное истечение), а с учетом потерь $1-2$.

В конструкциях паровых турбин применяют такие ступени, в которых процесс превращения перепада давления в скорость не заканчивается полностью в соплах, а частично продолжается и в лопаточном канале, где благодаря изменению скорости, возникает реактивный эффект, повышающий окружную скорость колеса. Отношение теплоперепада на лопатках H_n к теплоперепаду на всей ступени H_a называется степенью реакции ρ . Паровые турбины, у которых степень реакции ρ каждой из ступеней не превосходит 0,15, называются активными, а при условии $\rho \geq 0,4$ — реактивными.

Современные паровые турбины выполняют многоступенчатыми и комбинированными с использованием как активных, так и реактивных ступеней. Одним из основных элементов турбинных установок является конденсатор — трубчатый теплообменник, в котором за счет интенсивного охлаждения водой происходит конденсация отработавшего в турбине пара. При конденсации рабочего тела происходит уменьшение в сотни тысяч раз его объема, т. е. резкое падение давления.

Как видно из диаграммы $i-S$, чем ниже давление в конденсаторе, тем больше теплоперепад, а значит, и мощность, развиваемая турбиной. Глубина разрежения (или вакуума в конденсаторе) определяется начальной температурой охлаждающей воды и кратностью охлаждения.

Кратность охлаждения m — это количество охлаждающей воды, необходимой для конденсации 1 кг пара. На современных станциях $m = 50 \div 70$. Как правило, охлаждающая конденсатор вода циркулирует в замкнутом контуре, который включает спе-

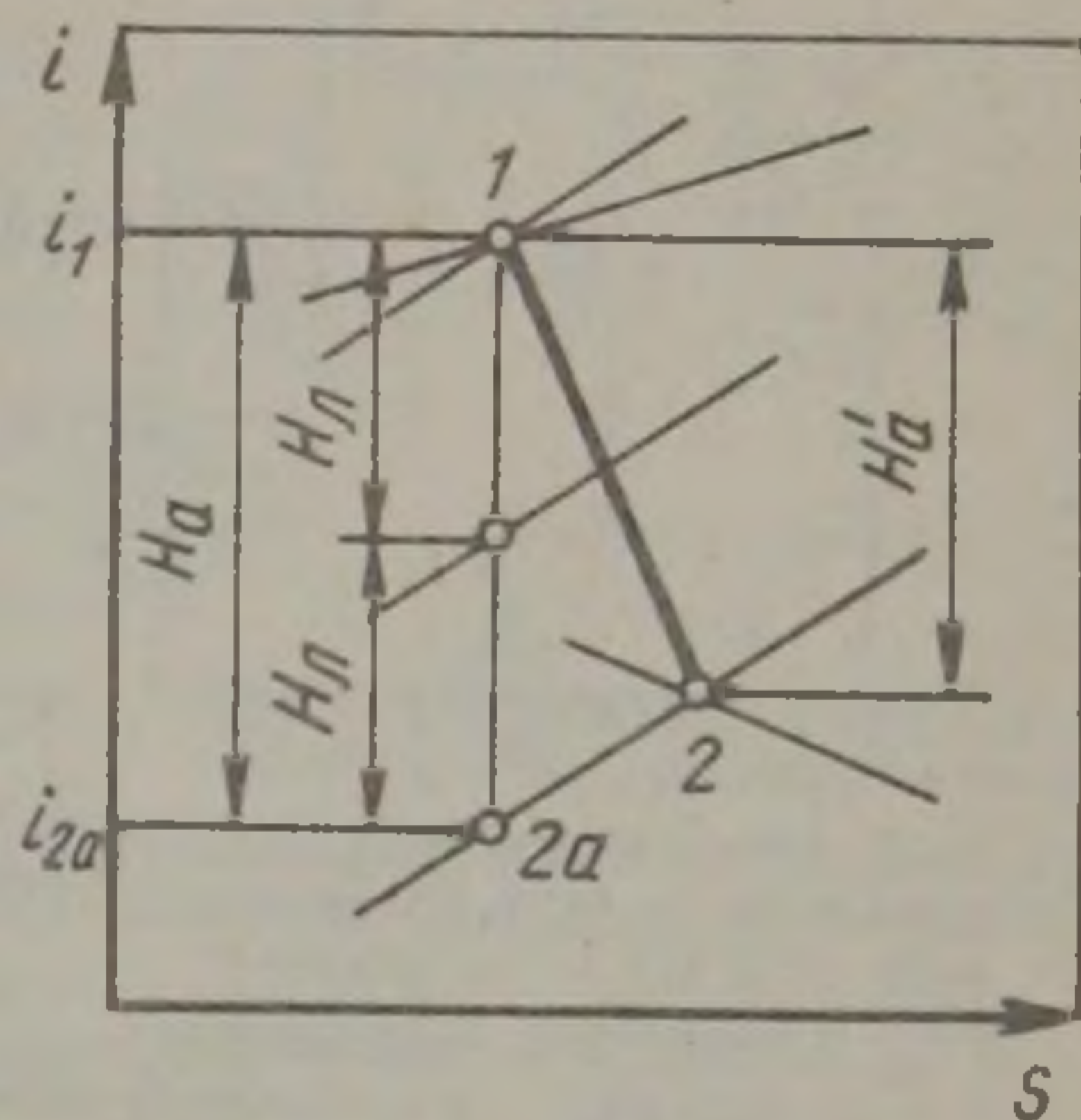


Рис. 18-3. Диаграмма $i-S$ для процесса расширения пара в турбине

циальные охладители — градирни, или брызгальные бассейны. Конденсат, образующийся в межтрубном пространстве конденсатора, с помощью насосов подается в трубопровод питательной воды котельной установки. Скрытая теплота парообразования, уносимая охлаждающей водой, теряется безвозвратно.

Паротурбинные или паросиловые установки, у которых весь пар проходит через конденсатор, называются конденсационными (рис. 18-4). Они предназначены для выработки электроэнергии. Их к. п. д. с учетом термодинамических потерь, внутренних или

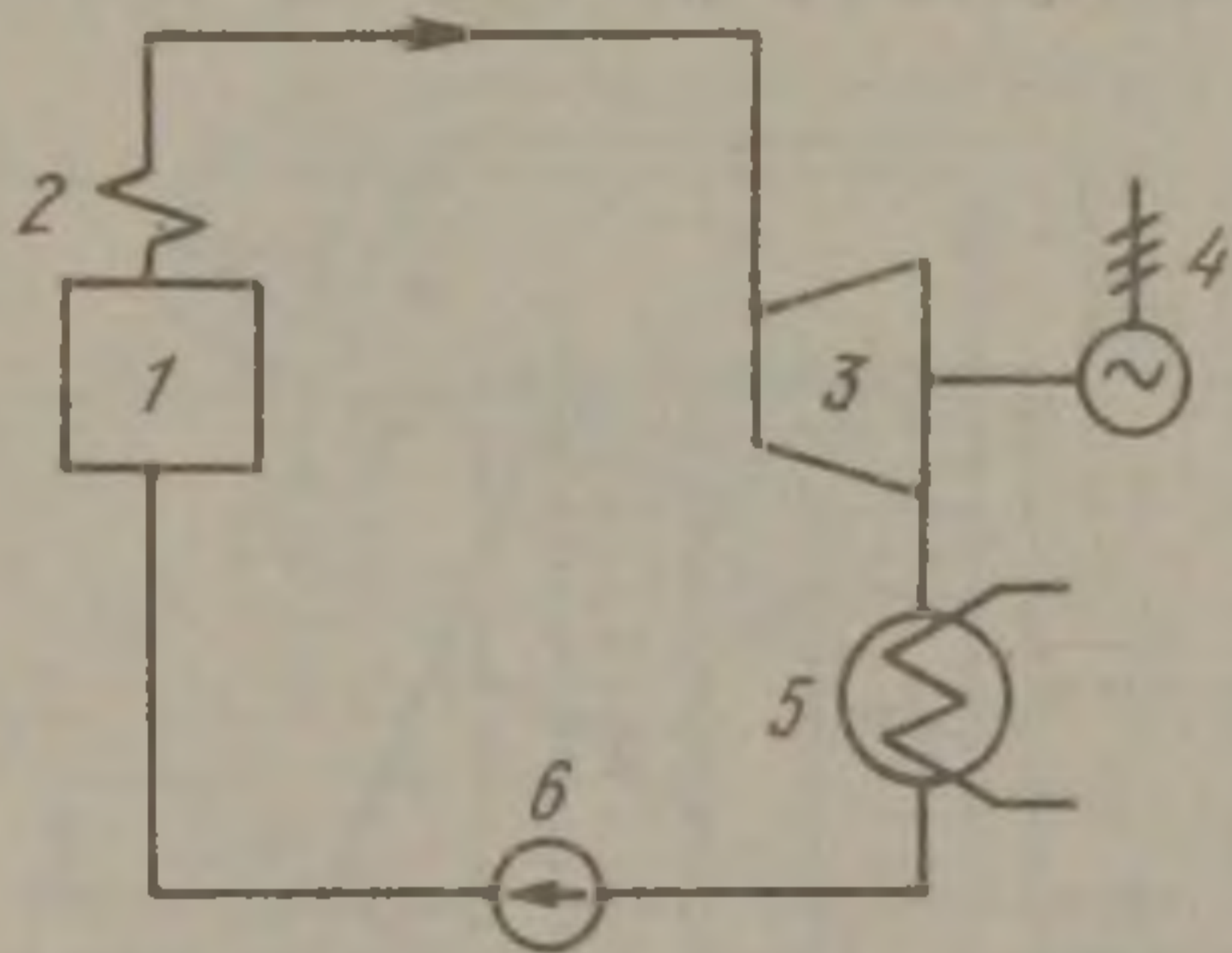


Рис. 18-4. Схема паросиловой установки с конденсационной турбиной:

1 — котел; 2 — пароперегреватель; 3 — турбина; 4 — электрогенератор; 5 — конденсатор пара; 6 — насос

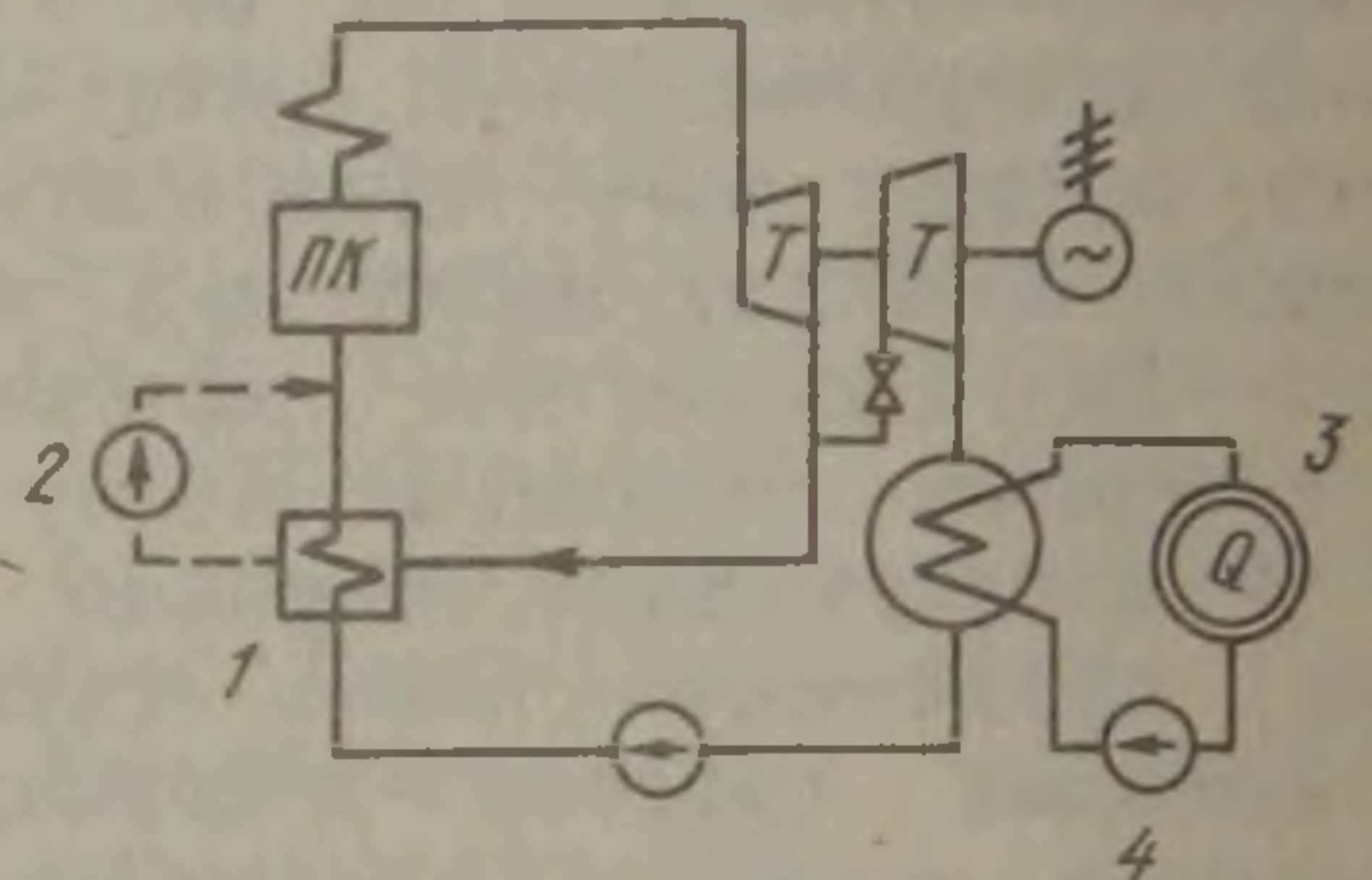


Рис. 18-5. Схема турбины с регенеративным подогревом питательной и нагревом сетевой воды:

1 — подогреватель питательной воды; 2 — конденсационный насос; 3 — потребитель горячей воды; 4 — сетевой насос; ПК — паровой котел; Т — турбина

потерь несовершенства процесса, механических потерь и потерь в электрогенераторе в современных установках достигает 29—39 %.

Конденсационные турбины устанавливают, как правило, на крупных электростанциях. Они предназначены для выработки электроэнергии.

На ТЭЦ металлургических предприятий наибольшее распространение получили схемы с комбинированной выработкой тепловой и электрической энергии и регенеративным подогревом питательной воды. На таких станциях применяют турбины с производственными и теплофикационными отборами пара соответственно при давлении отбора $p_{п} = 0,60 \div 1,30$ МПа и $p_{т} = 9 \div 17$ МПа и температуре $480 \div 570$ °С. Они являются приводом электрогенераторов мощностью 17 и 22 МВт. Производственный отбор пара часто используется параллельно или совместно с паром других утилизационных установок.

Схема турбины с нерегулируемым отбором пара для регенеративного подогрева питательной и нагрева сетевой воды дана на рис. 18-5. Как показывает опыт эксплуатации, применение таких тепловых схем особенно целесообразно на станциях, где котельные агрегаты работают с высоким подогревом воздуха. Регенеративный подогрев воды позволяет уменьшить поверхность водяного

экономайзера котла и тем самым поднять температуру газов, поступающих в воздухоподогреватель.

Схемы с комбинированной выработкой электрической и тепловой энергии экономически более выгодны, чем схемы с чисто конденсационными турбинами.

Газотурбинные установки

При использовании газа в качестве рабочего тела турбинная установка приобретает ряд существенных особенностей по сравнению с паротурбинной. Теплоперепад, который используется в проточной части газовой турбины, значительно меньше, чем теплоперепад паровой турбины, однако объемный и массовый расходы газа, а также уровень температур значительно выше. Это приводит к конструктивным отличиям газовых турбин.

Один из типов газотурбинных установок (ГТУ), получивших распространение в народном хозяйстве как в виде стационарных, так и в виде транспортных установок (например, в авиации), имеет в своем составе, кроме собственно газовой турбины и камеры сгорания топлива с топливным насосом, такой обязательный элемент как воздушный компрессор.

Эффективная или полезная мощность таких ГТУ определяется разностью между мощностью вырабатываемой турбиной и мощностью, потребляемой воздушным компрессором и топливным насосом. Используя регенеративный подогрев воздуха и ступенчатое сжатие с промежуточным охлаждением, можно достичь величины внутреннего к. п. д. установки до 38 %, т. е. сравнимой с величиной к. п. д. конденсационных паротурбинных.

В черной металлургии успешно применяется другой тип газовых расширительных турбин — утилизионные бескомпрессорные, типа ГУБТ. В них сжигания газов не производится, поэтому камера сгорания и воздушный компрессор отсутствуют. ГУБТ предназначены для использования потенциальной энергии доменного газа с параметрами $p = 240 \div 350$ кПа и $t = 120 \div 140$ °С до давления порядка 110 кПа.

Схема включения ГУБТ в сеть доменного газа дана на рис. 18-6. Проточная часть турбины имеет две ступени. Подвод газа осевой, через блок поворотных диафрагм, выполняющих роль регулирующего и отсечного устройства. Отвод газа вниз, под углом через цилиндрический патрубок, и далее в сеть доменного газа. На валу турбины находится электрогенератор с частотой вращения 3000 об/мин.

Освоен выпуск нескольких типоразмеров ГУБТ для установки за доменными печами различного объема, которые маркируются

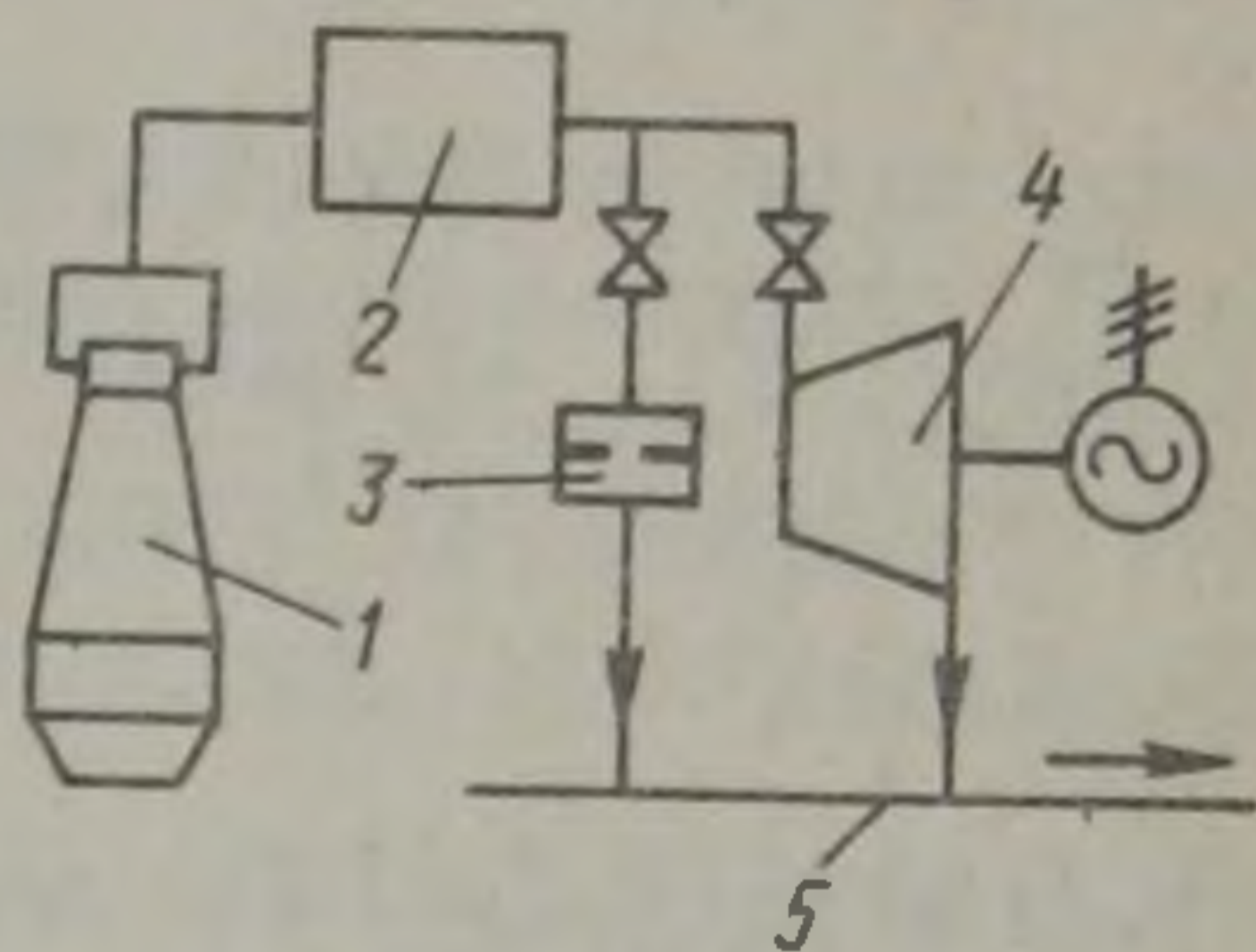


Рис. 18-6. Схема включения ГУБТ в сеть доменного газа: 1 — доменная печь; 2 — газоочистка; 3 — дроссельная группа; 4 — ГУБТ; 5 — газопровод доменного газа

по предельной мощности генератора на 6, 8, 12 МВт (ГУБТ-6; ГУБТ-8 или ГУБТ-12), на расход газа соответственно 150, 260 и 360 тыс. м³/ч.

Себестоимость выработки электроэнергии в установках ГУБТ по опыту ряда заводов страны в 2—3 раза ниже стоимости 1 кВт·ч ТЭЦ. Эффект от использования утилизационных турбин на доменном газе позволяет покрыть расходы на компремирование воздушного дутья доменных печей на 40 %.

Раздел V ОХЛАЖДЕНИЕ ПЕЧЕЙ И ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

Глава 19

ИСПАРИТЕЛЬНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Некоторые детали конструкций металлургических печей, находящиеся в зоне высоких температур, для сохранения их прочности подвергаются охлаждению. Наибольшее распространение получили две схемы охлаждения: проточная схема охлаждения технической водой и замкнутая схема испарительного охлаждения (ИО). Вторая схема является более прогрессивной, и, несмотря на применение химически очищенной воды, повсеместно вытесняет водяное проточное, так как позволяет сократить расход воды в 60—100 раз и в 9—10 раз увеличивает срок службы деталей, а также дает возможность использовать тепло получаемого пара.

Принципиальная схема контура циркуляции воды и пароводяной смеси в установке ИО подобна схеме котла-утилизатора с барабаном-сепаратором (см. рис. 18-2). В большинстве схем циркуляция естественная, за счет разности плотности воды и пароводяной смеси. Принудительная циркуляция с помощью циркуляционных насосов применяется в случае значительных колебаний тепловых нагрузок на охлаждаемые элементы печи или при сложной конфигурации этих элементов.

При проектировании и наладке схем ИО выполняют расчеты на прочность стенок охлаждаемых деталей по предельной плотности теплового потока. Расчет контура циркуляции проводят для определения расхода воды, размеров труб и кратности циркуляции, которые обеспечивают устойчивый режим работы схемы. Расчет выполняют в соответствии с нормативными методами расчета котельных агрегатов.

Комплекс устройств, входящих в схему охлаждения печи, называют системой ИО. Рассмотрим особенности системы ИО доменных, мартеновских, нагревательных печей.

1. Система испарительного охлаждения доменных печей

Современная доменная печь теряет с охлаждающей водой в среднем до 120—170 кВт на 1 т выплавляемого чугуна. Длительность кампании печи составляет 5—6 лет. По величине потери тепла распределяются по зонам печи следующим образом, %: шахта, распар и заплечики — 67; фурменная зона — 28; горн и лещадь — 5. Каждая из зон печи работает в определенных температурных и технологических условиях, вследствие чего требования, предъявляемые к охлаждаемым элементам в различных зонах, различны.

В качестве охлаждаемых элементов, устанавливаемых почти по всей высоте шахты, применяют плитовые холодильники. В чугунные плиты залиты стальные трубки, по которым движется паро-водяная смесь. Аналогично охлаждаются шлаковые и воздушные фурменные приборы, плиты чугунных леток, а также клапана воздухонагревателей.

Холодильники в зоне шахты и заплечиков должны надежно предохранять кожух печи от действия высоких температур и способствовать сохранению прочности кладки и удержанию гарниссажа. Тепловой режим работы холодильников зависит от режима работы печи, периода кампании и места их расположения. Однако плотность теплового потока, которую воспринимает холодильник, не зависит от объема доменной печи и составляет для плитовых конструкций в среднем 23 кВт/м². Температура рабочей поверхности холодильников этой зоны нестабильна, колеблется в зависимости от распределения газового потока от 180 до 600 °С.

Для отливки применяют чугун марки ЖЧХ-0,8, в связи с чем ни один из участков холодильников не должен находиться длительное время при температуре выше 550 °С. Исходя из условий прочности давление 0,8 МПа является верхним пределом.

Опытом эксплуатации установлено, что шаг между охлаждающими трубками в холодильнике должен быть 200—250 мм, диаметр трубки 44—52 мм, толщина плит 140—150 мм, высота 1—3 м, ширина 700—1500 мм. Конструкция холодильников некоторых типов дана на рис. 19-1.

Расход питательной воды на холодильники в пределах 20—40 м³/ч. При условии питания холодильников деаэрированной химически очищенной водой, естественной циркуляции и нежесткого их крепления, длительность межремонтного периода доменных печей обеспечивается в течение 6—7 лет.

Схема соединения холодильников в контур испарительного охлаждения может быть одно- и двухзонной (рис. 19-2). Первая схема более распространена. При двухзонной схеме в первую зону входят холодильники шахты, а во вторую — холодильники фурменной зоны и горна.

По периметру печи размещается 2—6 вертикальных рядов холодильников — секций. Каждая секция имеет барабан-сепара-

тор и может работать как самостоятельный контур. Барабаны-сепараторы размещают на расширенной колошниковой площадке над крышкой поддоменника или на воздухонагревателях в одной

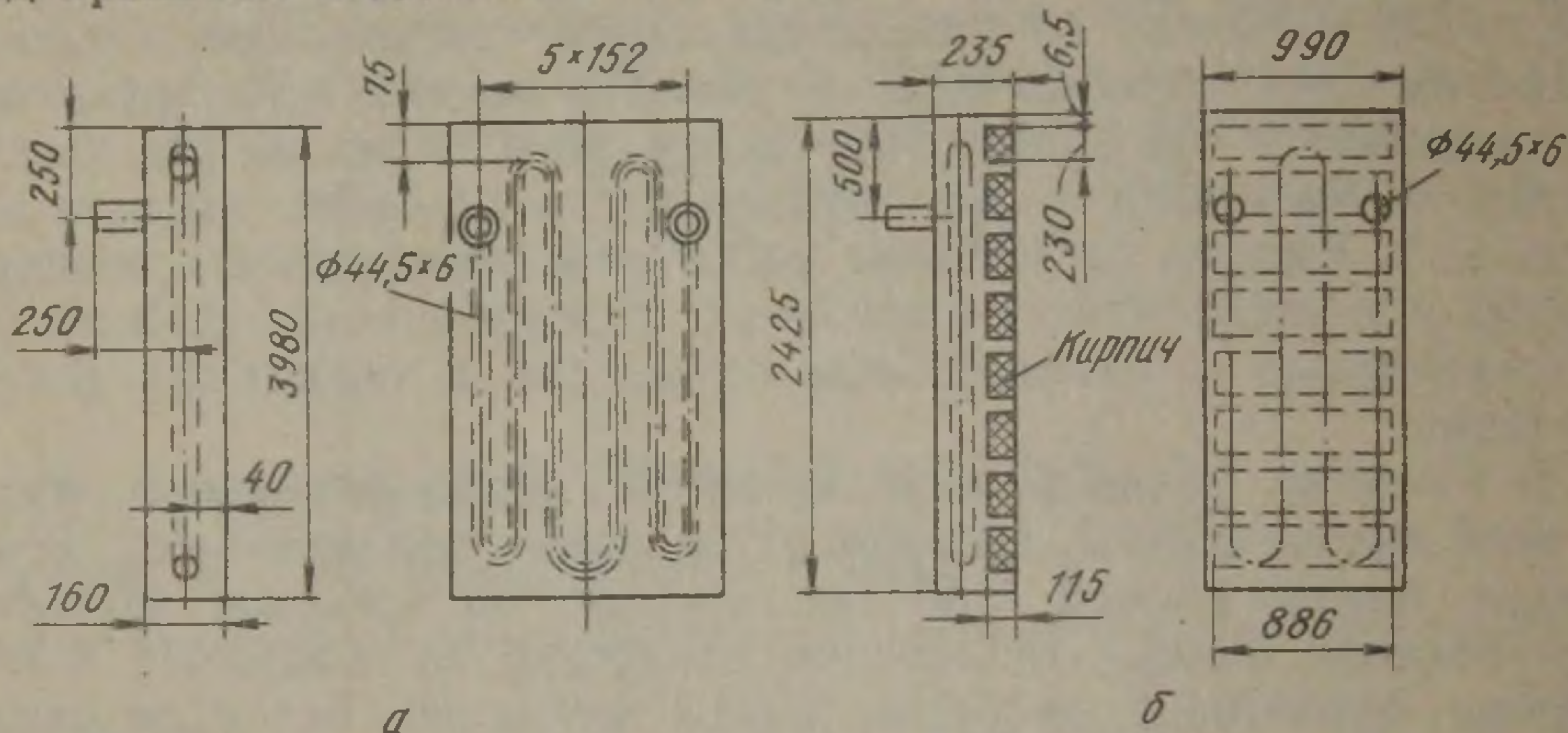


Рис. 19-1. Плитовые колодильники доменной печи:
а — зоны шихты и горна; б — зоны заплечиков

галерее с барабаном-сепаратором испарительного охлаждения клапанов воздухонагревателя на высоте около 20 м.

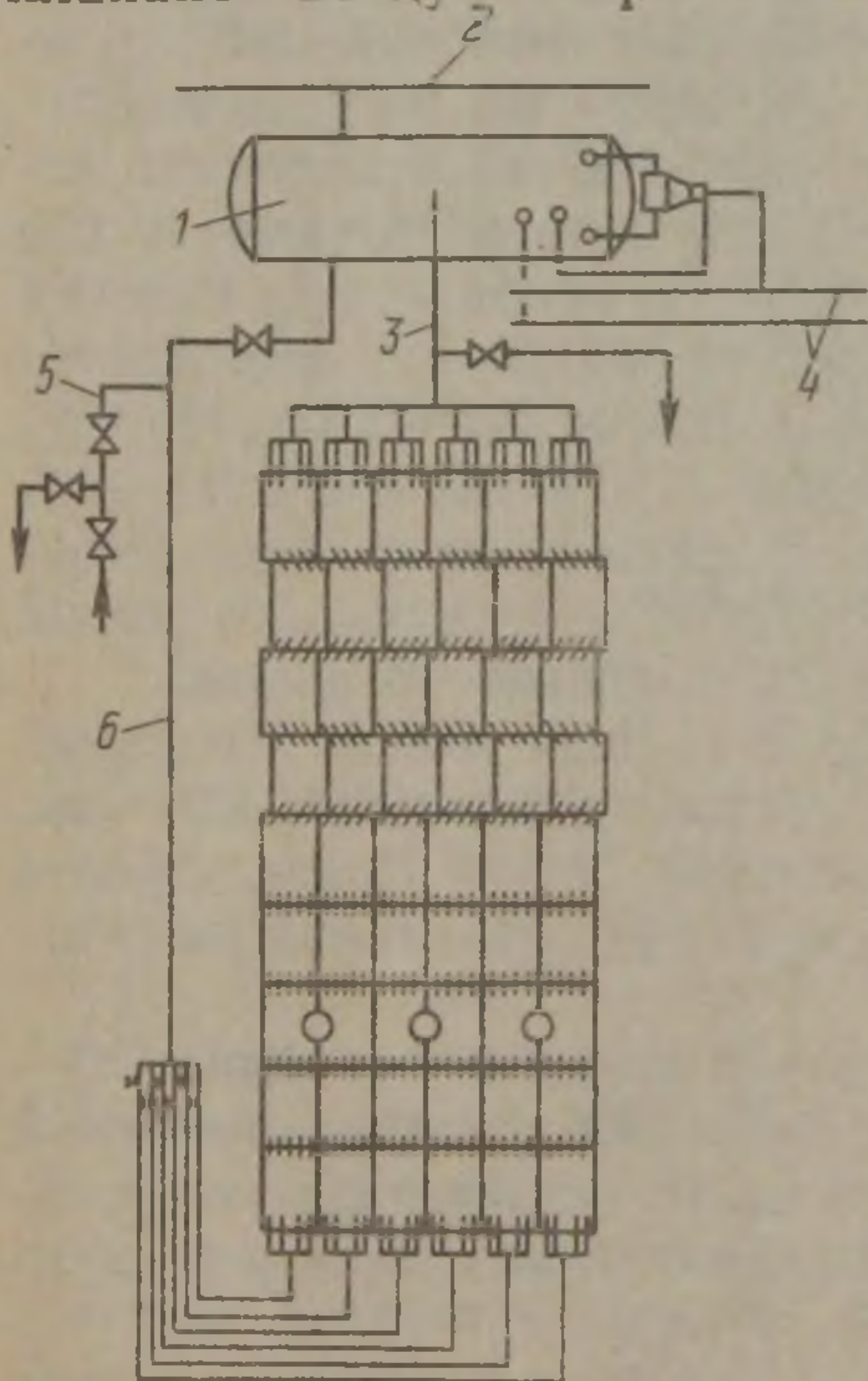


Рис. 19-2. Схема системы ИО доменной печи:

1 — барабан-сепаратор; 2 — паропровод; 3 — подъемная труба; 4 — линия питательной воды; 5 — продувочная линия; 6 — опускная труба

Подъемные или опускные трубы секций могут быть объединены в один или два коллектора, затем каждый из коллекторов одной опускной или подъемной трубой соединяется с одним барабаном-сепаратором. Такая схема значительно уменьшает металлоемкость контура, количество запорной арматуры при значительном удалении барабана от холодильников, надежна в эксплуатации.

Конструкции фурменных холодильников для работы на испарительном охлаждении предусматривают и возможность переключения их на охлаждение водой. В большинстве случаев воздушные фурмы охлаждаются по схеме ИО, а шлаковые — по схеме водяного проточного охлаждения.

Тепловые нагрузки на воздушные фурмы мало изменяются в течение кампании печи и зависят главным образом от температуры дутья и расстояния от очага горения. Плотности теплового потока составляют около 80 кВт/м^2 . При трубчатой конструкции

холодильников фурм давление поддерживается на уровне 0,5—0,8 МПа. Для защиты змеевика фурмы применяют медь, сталь, а также карборундовое покрытие.

Охлаждение горна и лещади защищает кожух от нагрева при разогреве футеровки и подходе к периферии печи жидкого чугуна. Наибольшее применение для защиты горна (схема испарительного охлаждения) получили холодильники плитовой конструкции. Лещади принято охлаждать по бокам с помощью водяных холодильников, снизу — продувкой воздухом в каналах по фундаменту или по трубкам в чугунных плитах. Предельная температура бетонного фундамента 500 °С является исходным параметром при расчете схемы охлаждения лещади.

Контур охлаждения горна подключается на общий барабан-сепаратор с холодильниками шахты печи.

Испарительное охлаждение клапанов воздухонагревателей обеспечивает их стойкость в течение всей кампании печи. В схему ИО на 1 барабан-сепаратор включаются клапана горячего дутья, отсечные клапана горелок и дымовые клапана. Наибольшие тепловые нагрузки воспринимают клапана горячего дутья — до 200 кВт. Схемы работают при давлении 0,5—0,8 МПа, выработка пара составляет 2,5—3 т/ч.

Закономерность повышения солесодержания котловой воды и влияние продувки на его уровень лежит в основе метода определения прогара холодильников. При непрерывном контроле солесодержания можно зафиксировать момент снижения темпа его роста, вызванного утечкой воды в результате прогара.

Эксплуатация установок испарительного охлаждения и обслуживающий их персонал находятся в ведении доменного цеха. Технический контроль осуществляет служба главного энергетика предприятия. Каждую доменную печь в смену обслуживает один слесарь — дежурный по системе охлаждения.

2. Система испарительного охлаждения мартеновских печей

Интенсификация сталеплавильного производства привела к некоторой модернизации конструкции печей. В настоящее время часть парка мартеновских печей реконструирована на двухванные агрегаты. При этом схемы охлаждения остаются без существенных изменений. В схемы ИО включены элементы печи, находящиеся в наиболее тяжелых температурных условиях: кессоны газовых печей, фурмы и форсунки мазутных печей, пятовые балки главного свода и пережимов, рамы и заслонки завалочных окон, столбики передней стенки, а также перекидные и регулирующие устройства и другие элементы.

Температура стенки охлаждаемых стальных элементов мартеновской печи, при которой обеспечивается ее надежная работа, составляет 400—500 °С. Стойкость охлаждаемых деталей в среднем составляет 3—4 кампании печи по своду, т. е. 2—3 года.

Параметры получаемого пара зависят, как правило, от предельных давлений для конструкций охлаждаемых элементов. В основном приняты давления на мартеновских схемах ИО до 1—4 МПа. Все охлаждаемые элементы печей выполняются полыми или трубчатой конструкции с толщиной стенки не менее 12 мм. Расчеты деталей на прочность и схем охлаждения на устойчивость циркуляции ведут с учетом воспринимаемых максимальных плотностей теплового потока. Эта величина не зависит от садки печи

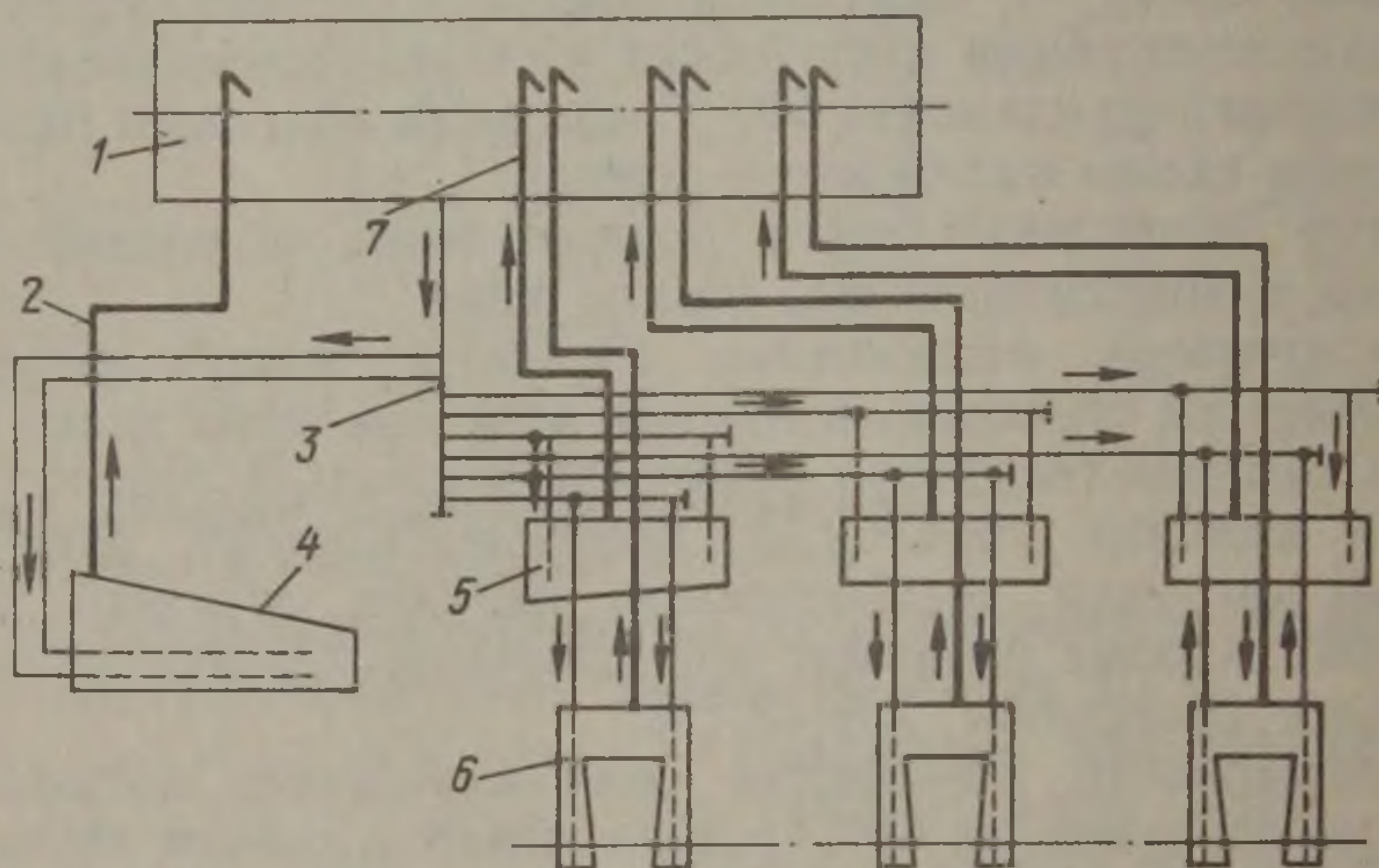


Рис. 19-3. Схема системы ИО мартеновской печи:

1 — барабан-сепаратор; 2 — подъемная труба кессона; 3 — опускной коллектор; 4 — кессон; 5 — пятовые балки; 6 — рамы завалячных окон; 7 — подъемные трубы

и для разных деталей колеблется в пределах 17—40 кВт/м² (с защитной футеровкой), до 400—700 кВт/м² (с оголенной поверхностью). К концу кампании в результате разрушения футеровки отвод тепла значительно увеличивается.

Принципиальная схема системы испарительного охлаждения мартеновской печи на газовом отоплении дана на рис. 19-3. Система работает с естественной циркуляцией, что увеличивает ее надежность и снижает стоимость. Улучшение циркуляции способствует расположению барабана-сепаратора на высоте не менее 10 м от верха охлаждаемой детали. Опыт эксплуатации показывает, что большая надежность работы и удобство обслуживания имеет схема с расположением барабанов на крыше цеха в специальной галерее. Объем барабанов выбирают из условия создания запаса воды на работу в течение 1—2 ч на случай перерыва в подаче.

Трубные разводки, как подъемные, так и опускные, выполняют с промежуточными коллекторами, при условии, что объединяемые трубы немного отличаются по гидравлическим сопротивлениям. Рекомендуемый диаметр опускных труб 50—70 мм, подъемных 100—150 мм. Размеры уточняются при расчете циркуляции.

Скорость циркуляции в охлаждаемых деталях должна быть не менее 0,4—0,8 м/с, а в опускных трубах — не более 2 м/с. Рекомендуемые кратности циркуляции для кессонов и фурм 40, для пятых балок 30, для рам и заслонок завалочных окон 15. Средний показатель выработки пара в системах испарительного охлаждения мартеновских печей составляет 0,2—0,3 т/т стали. Штат обслуживания 3—4 слесаря на 4—5 печей и один мастер системы ИО. Перспективной является схема с повышенными параметрами пара, что позволит объединить ее с котлами-утилизаторами.

3. Система испарительного охлаждения нагревательных печей

Среди большого разнообразия парка нагревательных печей особая роль принадлежит методическим печам для нагрева металла перед сорто- и листопрокатными станами. Это крупные печи с высокотемпературными зонами, 20—30 % тепловой мощности которых теряется на охлаждение элементов конструкции печи.

Распределение тепла по основным охлаждаемым элементам, %: продольные трубы — 48 от всех потерь тепла; поперечные (опорные) трубы — 37; балки торцов загрузки и выгрузки, рамы, отбойники, шиберы, горелки — 15.

Плотность тепловых потоков на охлаждаемые элементы достигает 50—120 кВт/м². Величина плотности теплового потока зависит от температуры в печи (в зоне) и состояния изоляции.

Из охлаждаемых элементов печи основными являются подовые трубы — продольные и поперечные, которые обычно изготавливают из труб круглого сечения из стали марок 10 и 20. Диаметр и толщину стенок определяют из условий прочности при весовой нагрузке и истирании; они зависят от геометрических размеров печи и находятся в пределах от 76 × 10 до 120 × 20 мм, длина 12—30 м. По условиям надежного охлаждения для увеличения местной скорости циркуляции в трубы диаметром более 90 мм вставляют обтекаемые вставки. Величину кольцевого канала для охлаждающего потока (12—20 мм) определяют расчетом циркуляции по допустимому гидравлическому сопротивлению и условию пузырькового кипения.

Исследования, приведенные с подовыми трубами, подтвердили, что основным критерием надежности их работы является скорость циркуляции, которая должна быть в пределах 0,6—1,5 м/с.

Принципиальная схема системы испарительного охлаждения нагревательной печи дана на рис. 19-4.

Опыт промышленной эксплуатации системы ИО нагревательных печей позволил выработать основные конструктивные положения:

более надежной является естественная циркуляция;

системы могут работать и с избыточным давлением 1,5—4,5 МПа;

подовые трубы целесообразно выделять каждую в самостоятельный контур;

поперечные трубы допустимо разделить на группы из 2—3 труб, соединенных последовательно, а группы подключать параллельными контурами к барабану-сепаратору;

тепловая нагрузка на каждый самостоятельный контур (или группу) должна составлять 400—800 кВт;

допустимая скорость циркуляции в контурах методической зоны 0,8 м/с, в сварочной зоне 1,2 м/с;

допустимые скорости в опускных трубах 0,8—1,5 м/с, в подъемных до 15 м/с.

Исходя из этих рекомендаций, с учетом величины тепловых нагрузок можно определить геометрические и режимные параметры контура охлаждения: циркуляционные расходы, диаметры труб всех элементов циркуляционного контура.

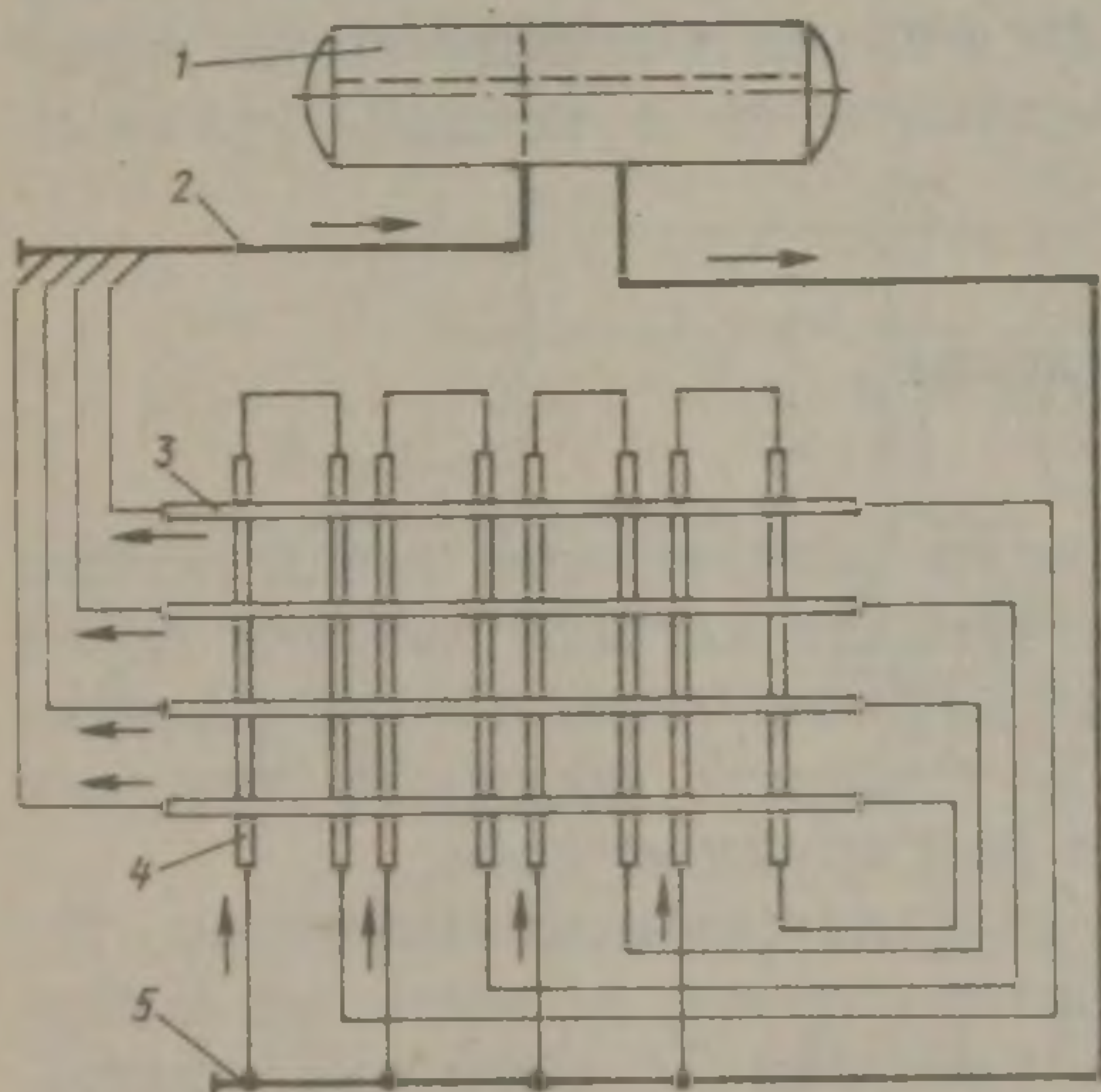


Рис. 19-4. Схема системы ИО нагревательной печи:

1 — барабан-сепаратор; 2 — подъемный коллектор; 3 — продольные глассажные трубы; 4 — поперечные трубы; 5 — опускной коллектор

В связи с возможностью работы схем испарительного охлаждения нагревательных печей на повышенном давлении (до 4,5 МПа) становится целесообразным объединение их в комплексные схемы с котлами-утилизаторами этих печей. Это может улучшить технико-экономические показатели системы охлаждения.

Штат обслуживания на несколько печей состоит из двух человек — слесарей в смену и одного мастера системы охлаждения.

На экономические показатели существенно влияет стоимость пара заводской ТЭЦ, доля которого замещается паром, вырабатываемым в системе испарительного охлаждения.

Глава 20

ОХЛАЖДЕНИЕ КОНВЕРТЕРНЫХ ГАЗОВ

1. Характеристика газов

Продувка кислородом вызывает интенсивное окисление углерода чугуна и других примесей шихты в конвертере.

Температура газа на выходе из горловины конвертера колеблется в пределах 1400—1800 °С. Количество газов изменяется по ходу плавки и зависит от режима кислородной продувки, кон-

струкции фурмы, типа присадок и перерабатываемых чугунов. Расход газов определяется по количеству кислорода и скорости обезуглероживания и составляет в среднем 60—80 м³ на 1 т садки. При выходе годного до 90 % это составляет 70—90 м³ на 1 т стали. Количество тепла, выносимого с газами в газоотводящий тракт, находится в пределах 1100—1250 МДж на 1 т стали. Запыленность газов очень высока и достигает 200 г/м³, причем основная доля частиц имеет размер до 1 мкм. Пыль, составляющая до 1,5 % от массы металлической шихты конвертера, содержит 55—60 % железа и может быть использована на аглофабрике. Требования защиты окружающей среды и возможность утилизации пыли приводят к необходимости обязательной очистки газа. К тому же, в образующемся конвертерном газе содержится до 90 % CO и 10 % CO₂, а его теплота сгорания достигает 13 МДж/м³.

Таким образом, конвертерный газ является не только теплоносителем, но и топливом. В большинстве случаев оказывается целесообразным использовать не только физическое тепло газа, но и утилизировать его как химическое сырье или топливо.

2. Способы отвода газов

В связи с необходимостью поворота конвертера между его горловиной и газоотводящим трактом не может быть герметичного соединения. В этот кольцевой зазор может подсасываться воздух в количестве, зависящем от величины разрежения в этой зоне. При этом должен обеспечиваться отвод в охладитель всех газов, выходящих из конвертера во время продувки кислородом.

Существуют два принципиально отличных способа отвода конвертерных газов: с доступом воздуха и без доступа воздуха.

При отводе с доступом воздуха может быть обеспечено три режима: 1) полное сжигание газа с коэффициентом расхода воздуха $\alpha \gg 1,0$; 2) горение в недожоге, если $0,75 < \alpha < 1$ и 3) частичное сжигание, если $0,3 < \alpha < 0,6$. В первом и втором случаях на выходе из охладителя образуются инертные продукты сгорания, а в третьем — в смеси с воздухом газ взрывоопасен.

При отводе газа из конвертера без доступа воздуха подсос наружного воздуха настолько мал, что сгорает только тонкий периферийный слой струи конвертерного газа. При этом $0 < \alpha < 0,15$ и смесь газа взрывоопасна. Способ называется — «отвод без дожигания».

Режим полного дожигания оксида углерода, когда через газовый тракт проходят продукты сгорания, как при работе топливных котлов или котлов-утилизаторов, не вызывает затруднений в процессе работы.

Сложности в работе газоотводящего тракта конвертера возникают при частичном дожигании или без дожигания оксида углерода. Они характеризуются высокими требованиями по обеспечению безопасности ведения процесса, так как в газоотводящем

тракте возможно образование взрывоопасной смеси газа с воздухом. С помощью уплотняющего устройства — подвижного колокола (юбки) удастся уменьшить подсос, сократив зазор между горловиной конвертера и кессоном до 70 мм. Специальное регулирующее устройство, включенное перед дымососом, автоматически поддерживает постоянное давление на стыке горловина — юбка. Этим удастся свести к минимуму подсос и отводить конвертерный газ по мере его образования.

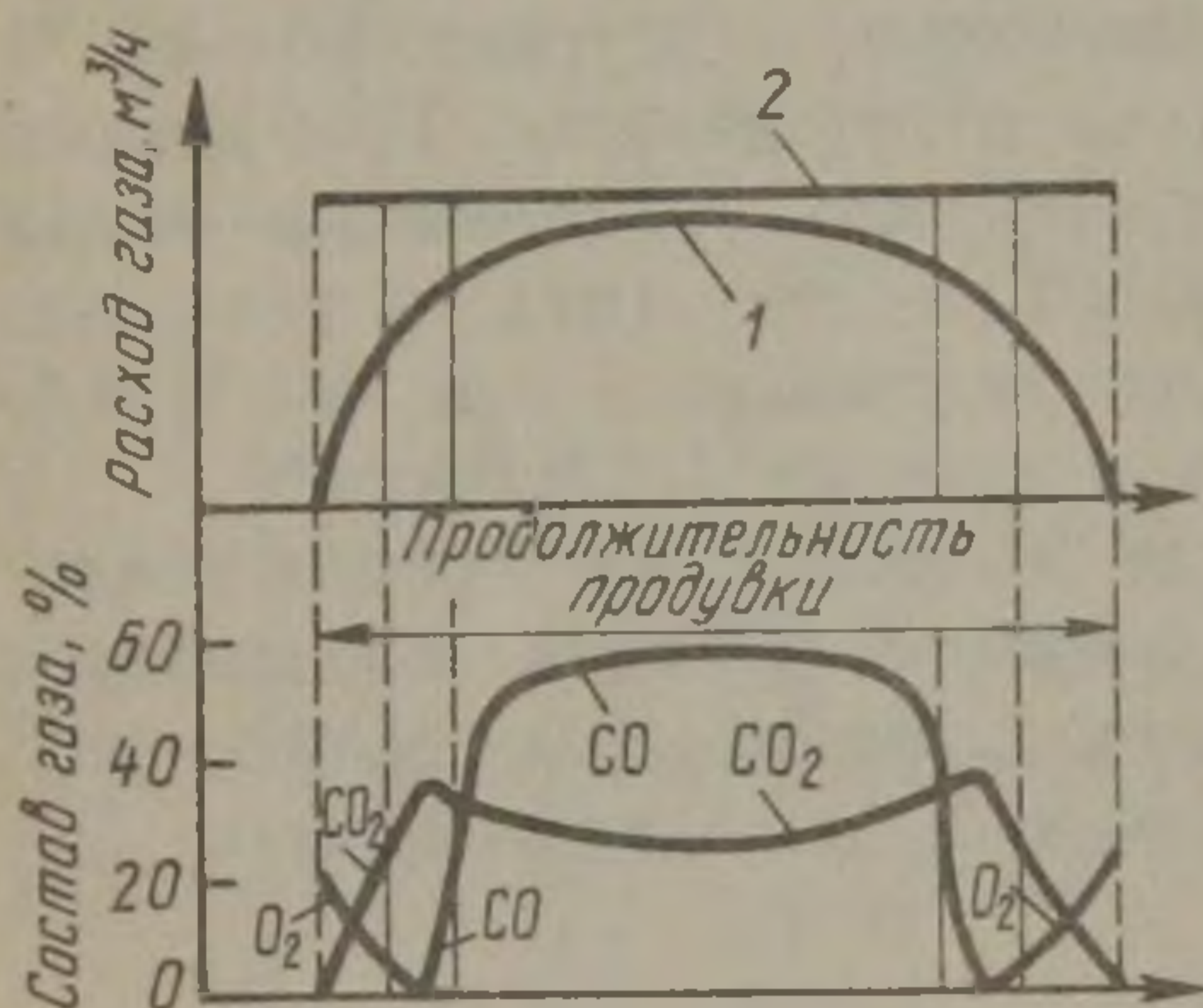


Рис. 20-1. Схема образования «тампона» в газовом тракте конвертера:
1 — расход газа на выходе из горловины конвертера; 2 — расход газов, отсасываемых дымососом

Особенностью работы газоотводящего тракта в этих режимах является самопроизвольное образование так называемого «тампона» (рис. 20-1). В начале продувки и в ее конце, когда количество образующихся реакционных газов мало, при небольшом подсосе воздуха происходит их полное или частичное сгорание. Этот негорючий газ заполняет газовый тракт и, как тампон, прочищает тракт от воздуха. Выделяющийся конвертерный газ отделен таким образом от воздуха с двух сторон, что обеспечивает его взрывобезопасность.

В некоторых схемах режим без дожигания сопровождается подачей в газовый тракт инертного газа — технического азота, который играет роль тампона в начале и конце продувки.

Тот или иной способ отвода выбирают в зависимости от принятой схемы охлаждения и степени утилизации тепла, экономически целесообразной для конкретных условий завода.

3. Способы и схемы охлаждения газов

До подачи в систему газоочистки в зависимости от ее типа газы охлаждают до температуры ниже 1200 °С. Применяют способы объемного и поверхностного охлаждения. Первый — за счет контакта газа с холодным воздухом или испарения распыленной воды без утилизации тепла. Второй — основан на контакте газа с поверхностью охлаждения типа кессона или котла-охладителя, или котла-утилизатора. При этом способе достигается частичная утилизация тепла.

Поверхностные охладители газов можно классифицировать по следующим основным признакам:

по виду теплоносителя — водяные и паровые. К первым относятся кессоны и трубчатые охладители, ко вторым — котлы-утилизаторы или системы испарительного охлаждения;

по виду преимущественного теплообмена — радиационные и радиационно-конвективные. В первых — охлаждение газов происходит до 800—1200 °С, во вторых — до 250—400 °С;

по схеме циркуляции теплоносителя — с принудительной, естественной или комбинированной схемой циркуляции;

по виду газохода — с одним восходящим газоходом (наклонным или вертикальным), с П-образным газоходом и др.

На многих предприятиях в схемах «с дожиганием» в качестве охладителей продуктов сгорания применяют радиационно-конвективные паровые котлы-утилизаторы с принудительной циркуляцией, с П-образной компоновкой газохода. В схемах «без дожигания» или «с частичным дожиганием» — радиационные, паровые, с принудительной и естественной циркуляцией, с П-образным или одиночным вертикальным газоходом.

В большинстве конструкций охладителей в качестве поверхностей нагрева применяют трубы. В радиационной части трубы, соединенные мембраной, образуют сплошные мембранные трубчатые панели.

Рассмотрим особенности конструкций паровых котлов-утилизаторов и водяных охладителей конвертерных газов.

4. Конвертерные паровые котлы-утилизаторы

Схемы циркуляции

Условия работы конвертерных котлов характеризуются значительными колебаниями тепловой нагрузки. Это обусловило применение схем с принудительной циркуляцией.

Принципиальная схема циркуляционного контура конвертерного котла-утилизатора с принудительной циркуляцией дана на рис. 20-2. Питательная вода 1 поступает в водяной экономайзер 2, а затем — в барабан-сепаратор 3, где смешивается с котловой водой. Вода из барабана по опускным трубам 5 поступает в циркуляционные насосы 6. Насосы подают воду в коллекторы экранов и змеевиков 7, где установлены уравнительные дроссельные шайбы 8. Образующаяся в экранных трубах 9 пароводяная смесь поступает в барабан. Пар отводится в цеховой паропровод, а вода вновь поступает к насосам.

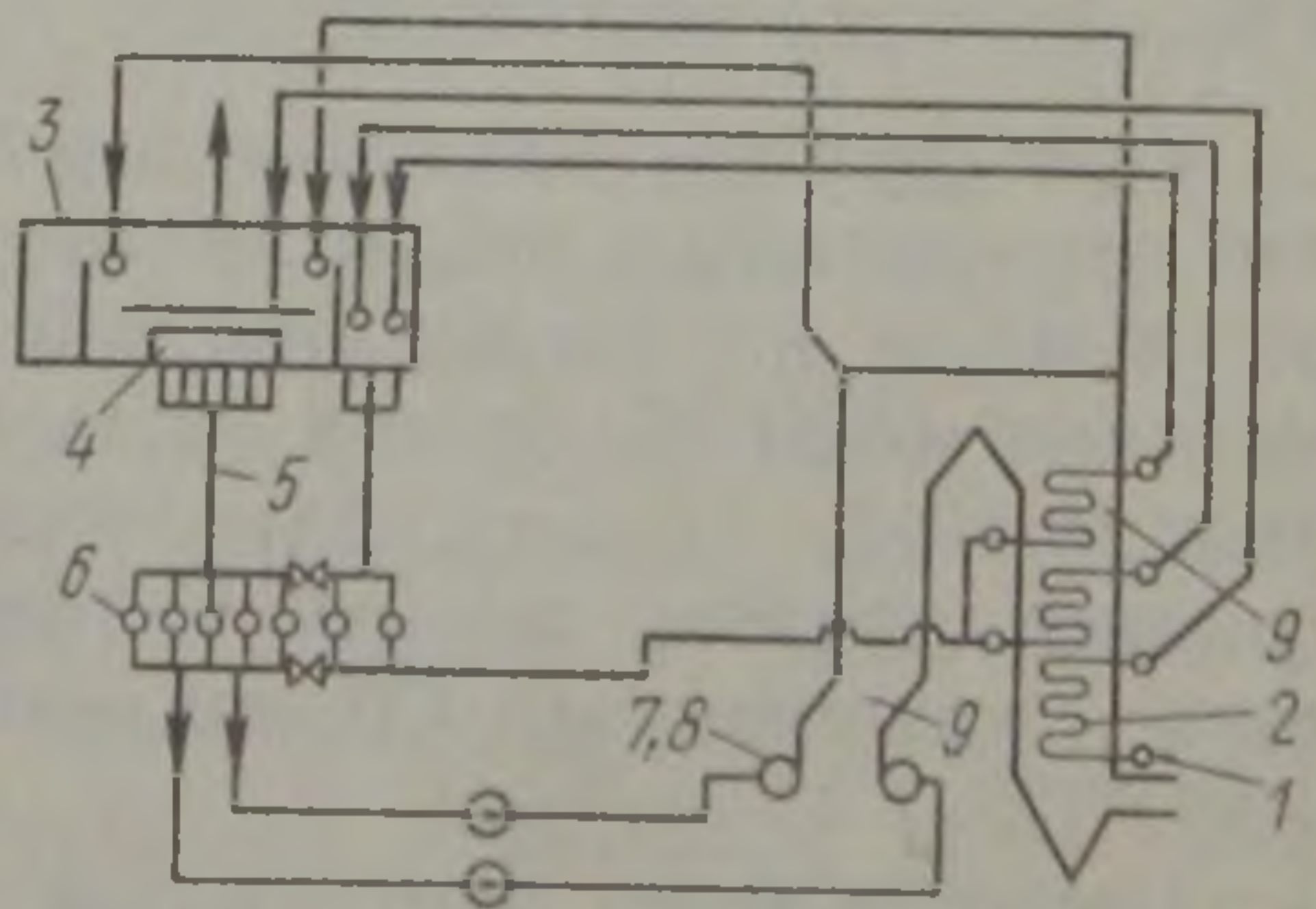


Рис. 20-2. Принципиальная схема циркуляционного контура конвертерного котла-утилизатора

Однако, как показала практика, схема с принудительной циркуляцией значительно усложняет и удорожает эксплуатацию

котла-утилизатора. Расход электроэнергии на привод насосов составляет 4 кВт·ч на 1 т стали.

По мере совершенствования процесса кислородной продувки и улучшения гидродинамики фурм постепенно стали создаваться схемы котлов с комбинированной, а затем и с естественной циркуляцией. Естественная циркуляция возникает под действием разности плотностей воды и паро-водяной смеси в контуре.

За рубежом естественную циркуляцию стали применять для кессонов, представляющих две концентрические поверхности, размер охлаждаемой полости между которыми составляет 70—92 мм. Конструкции такого типа работают при нулевом давлении в барабане-сепараторе с выбросом пара в атмосферу. Затем было начато изготовление котлов из мембранных труб на избыточное давление 3,2 МПа.

Отечественными исследователями было установлено, что во всех периодах конвертерной плавки при всех режимах естественной циркуляции обеспечивается надежное охлаждение поверхностей нагрева.

При длительных простоях конвертера для стабилизации циркуляции применяют подачу насыщенного пара в трубы экранов и конвективного пакета. Установка таких побудительных сопел делает схему комбинированной.

Комбинированной схема циркуляции становится и тогда, когда нижняя радиационная часть котла-охладителя работает с принудительной циркуляцией, а верхний стационарный газосход — с естественной.

Преимущество комбинированной схемы циркуляции прежде всего в исключении циркуляционных насосов и, в результате, в сокращении энергетических затрат на, так называемые, собственные нужды охладителя.

Конструкция теплообменных поверхностей

Конструкция теплообменных поверхностей конвертерных котлов определяется видом преимущественного теплообмена. Так как на выходе из горловины конвертера газы имеют температуру не ниже 1600 °С, то эта часть котла всегда выполняется как радиационная, т. е. цилиндрическая, прямоугольная или многогранная шахта, экранированные стены которой воспринимают тепло излучением. Охлаждение газов до температуры около 1000 °С.

Радиационная часть котла работает в условиях повышенной запыленности, а значительный вынос жидких частиц в период продувки может привести к зашлаковыванию и настылеобразованию. Поэтому в большинстве конструкций котлов радиационная часть делается из двух отдельных секций. Первая радиационная секция, выполненная в виде гладкостенного или трубчатого кессона, подвижна и может отводиться в период перефутеровки конвертера. Как правило, кессоны имеют самостоятельный контур

циркуляции. Конструкция кессона позволяет производить через него засыпку сыпучих материалов и ввод кислородных фурм, а также обеспечивает стекание шлака со стен обратно в конвертер. Угол наклона к вертикали $30\text{--}40^\circ$.

Стационарную секцию радиационной части котла выполняют в виде вертикальной шахты или в виде Г- или П-образного газохода. В качестве поверхностей нагрева используют трубы малого диаметра (38×4 и 38×5 мм). В связи с этим котлы имеют малый водяной объем и малоинерционны в режиме значительных колебаний паропроизводительности. Трубы или мембранные панели из них располагают вдоль направления движения газов.

В тех случаях, когда котел работает в режиме выработки пара для энергетических или технологических нужд, т. е. непрерывно, то в радиационной части котла размещают дополнительные устройства для сжигания газообразного топлива (например, коксо-доменной смеси или природного газа). Подтопка котла действует непрерывно, но нагрузка горелок регулируется автоматически в зависимости от выхода конвертерного газа.

Радиационно-конвективные котлы, предназначенные для работы с дожиганием СО и утилизацией тепла, имеют опускной конвективный газоход. В нем размещаются испарительные и экономайзерные поверхности нагрева. По такому принципу сконструированы отечественные котлы типа ОКГ-100-2р и ОКГ-100-3, работающие за конвертерами садкой $130\text{--}150$ т. Для конвективных поверхностей применяют трубы диаметром $25 \times 3,5$ и 32×3 мм. Трубы размещают поперек потока газов в коридорном или шахматном порядке.

Температура газов перед конвективной поверхностью не превышает $1000\text{--}1100^\circ\text{C}$, что обеспечивает их бесшлаковую работу. Газоход конвективной части прямоугольного сечения. Для очистки поверхности нагрева применяют виброочистку или импульсную. Аэродинамическое сопротивление котла составляет $2\text{--}3$ кПа. Газы на выходе имеют температуру около 300°C . При величине подтопки $20\text{--}30$ МВт котлы вырабатывают $160\text{--}200$ т/ч насыщенного пара при давлении соответственно $2,5$ и $4,6$ МПа. Такие котлы требуют установки $5\text{--}8$ циркуляционных насосов.

Технико-экономические расчеты показывают, что с увеличением садки конвертеров до 300 т и более и интенсивности продувки кислородом до 5 м³/мин паропроизводительность котлов возрастает до $800\text{--}900$ т/ч, в результате чего возрастают капитальные затраты и эксплуатационные расходы. В этих условиях технико-экономические показатели схем отвода газов в режиме без дожигания становятся более предпочтительными.

Для схем без использования тепла или с частичной его утилизацией предназначены котлы с радиационными поверхностями нагрева. Схемы отечественных котлов такого типа ОКГ-250 бд и ОКГ-250-2 с принудительной циркуляцией приведены на рис. 20-3

Конструктивной особенностью этих котлов является отделяемый кессон 1 круглого сечения. Соединение со стационарным газоходом 3 осуществляется с помощью линзового компенсатора 4. Трубы, образующие экранную поверхность, диаметром 38×5 мм расположены с шагом 50 мм, а в зоне кессона трубы с приваренными между ними пластинами образуют сплошную мембранную поверхность. По высоте котлы разделяются на 2—3 параллельных контура.

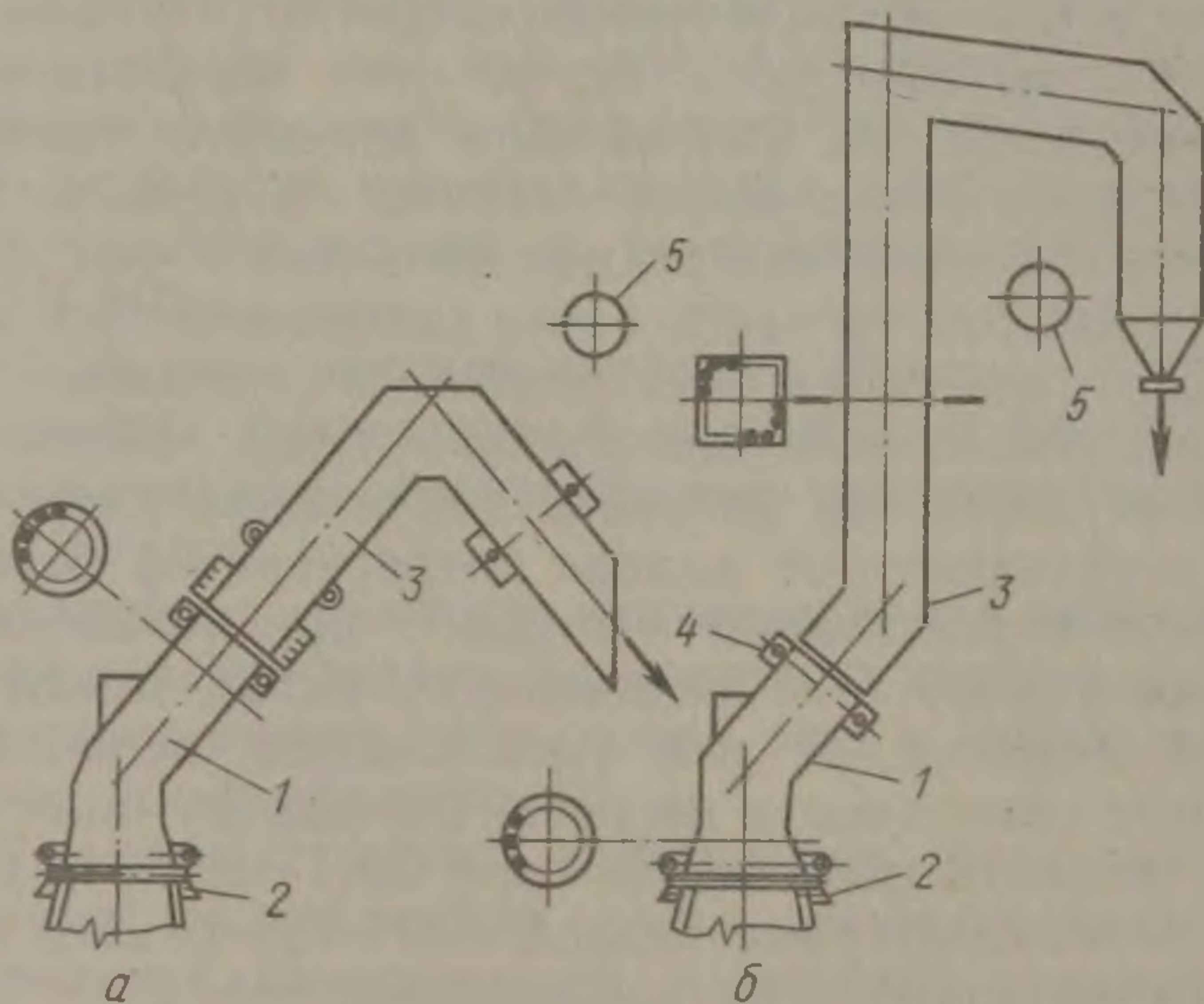


Рис. 20-3. Схема котлов-утилизаторов:
 а — ОКГ = 250 бд; б — ОКГ-250-2;
 1 — кессон; 2 — уплотняющий колпак; 3 — стационарный газоход; 4 — линзовый компенсатор; 5 — барабан-сепаратор

Производительность котлов зависит от расхода кислорода на продувку. Температура газов на выходе из такого котла около 1000°C . Поэтому газы далее охлаждаются впрыском воды в газоход. Аэродинамическое сопротивление радиационных котлов 200—300 Па.

5. Водяное охлаждение конвертерных газов

Поверхностное охлаждение

Водяные охладители газов радиационного типа работают на некоторых заводах за конвертерами емкостью 80—100 т. Конструктивно, такие охладители состоят из кессона и стационарной части и представляют собой Л- или П-образный газоход круглого сечения, экранированный трубами диаметром 76 мм. Кессоны работают с прямоточным движением технической воды и открытым сливом, а в стационарной части трубчатого охладителя циркуляция воды осуществляется с помощью насосов. Обычно подъемную

и опускающую часть охладителя подключают по воде параллельно. На входе вода имеет около 100°C при давлении 1.6 МПа и нагревается до 180°C и даже может достичь температуры насыщения.

Пар выбрасывается в атмосферу или идет на подогрев сетевой воды. Существенным недостатком этих схем является повышенная коррозия экранных труб. Причина заключается в следующем. При охлаждении воды в контуре между продувками происходит снижение давления. Через сбросную трубу из атмосферы подсасывается воздух, а это приводит к насыщению воды кислородом.

Некоторым преимуществом обладает двухконтурная схема водяного охладителя.

Водяные охладители конвертерных газов обеспечивают их охлаждение перед газоочисткой до 750°C . Но, учитывая повсеместное ограничение водных ресурсов, низкую интенсивность теплообмена и малую экономическую эффективность, следует водяные охладители отнести к числу малоперспективных устройств.

Подача воды в газоход

Способ объемного охлаждения газов подачей воды в поток имеет большое распространение, так как обеспечивает быстрое снижение температуры при небольших энергетических затратах и простоте устройств. Подача воды осуществляется через сопла непосредственно в газоходы или в скрубберы, или в виде пленочного орошения труб Вентури.

Установлено, что чем выше температура газов, при которой производится подача воды с целью охлаждения, тем ниже относительные суммарные затраты. Следовательно, целесообразно начинать охлаждение в зоне более высоких температур. Однако, подача воды вблизи горловины конвертера усиливает настылеобразование, эрозию труб и опасна в связи с возможностью попадания воды под металл и шлак, что приводит к взрывам.

Недостатком этого способа охлаждения по сравнению с охлаждением в поверхностных теплообменниках является повышение объема влажных газов, что приводит к повышению затрат на газоочистку и удаление газов. Поэтому прибегают к комбинированному способу, сочетающему подачу воды в газоход с поверхностным охлаждением.

6. Исходные данные к расчету охладителей конвертерных газов

Определение количества газов и воздуха

Максимальное количество конвертерных газов $V_{\text{max}}^{\text{r}}$ ($\text{м}^3/\text{мин}$) можно определить по максимальной скорости обезуглероживания по формуле

$$V_{\text{max}}^{\text{r}} = 1,86 \cdot 10 (dC/dt)_{\text{max}} G_{\text{ч}}$$

где $G_{\text{ч}}$ — количество чугуна в шихте, %; (dC/dt) — максимальная скорость выгорания углерода, %/мин; 1,86 — объем конвертерных газов при сгорании 1 кг углерода, м³.

Средний расход газов, м³/мин, за время продувки t (мин) и выходе стали G (т):

$$V_{\text{ср}}^{\text{г}} = 18,6 \frac{a}{\eta} CG \frac{1}{t},$$

где a — содержание чугуна, %; C — содержание углерода в чугуне, %; η — выход годного, %.

Обычно $V_{\text{max}}^{\text{г}}$ в 1,4÷2,0 раза превышает средний расход $V_{\text{ср}}^{\text{г}}$.

Количество подсасываемого воздуха в зазор между конвертером и кессоном $V_{\text{п}}$ (м³/с) определяется по величине перепада давления между окружающей средой и газом на уровне зазора Δp по формуле

$$V_{\text{п}} = a\varepsilon F \sqrt{2g\Delta p/\rho},$$

где F — площадь зазора; $a = 0,55\div 0,65$; $\varepsilon = 0,4 \Delta p$.

Расчетный состав конвертерного газа содержит 90 % CO, 10 % CO₂.

Расчет паровых котлов-утилизаторов

В расчетах паровых котлов-утилизаторов конвертерных газов, которые выполняют по общепринятым нормативным методам теплового, аэродинамического и гидравлического расчета котельных агрегатов в качестве ориентировочных значений некоторых величин можно принять следующие:

Коэффициент загрязнения лучевоспринимающей поверхности	0,6
Степень черноты топки $a_{\text{т}}$	0,6
Эффективная степень черноты факела $a_{\text{ф}}$	0,65
Поправка к величине степени черноты топочной среды β	0,65
Скорость газов в радиационной части охладителя $w_{\text{р}}$, м/с	25—30
Скорость газов в конвективной части охладителя $w_{\text{к}}$, м/с	10—16

Расчет охлаждения впрыском воды

Целью расчета является определение необходимого количества впрыскиваемой воды и объема влажных газов.

Расход воды на впрыск на 1 м³ газа $G_{\text{в}}$ определяют из уравнения теплового баланса, кг/м³:

$$G_{\text{в}} = (I_1 - I_2)/q_{\text{в}},$$

где $I_1 = v(c_p T_1)$, $I_2 = v(c_p T_2)$ — объемные энтальпии сухого конвертерного газа соответственно на входе и на выходе из зоны охлаждения, кДж/м³; $q_{\text{в}}$ — тепло, необходимое на нагрев и испарение 1 кг воды от температуры $T_{\text{в}}$ до T_2 , кДж/кг:

$$q_{\text{в}} = 2480 + 1,97(T_2 - T_{\text{в}}).$$

Объем влажных газов $V_{вл}$, м³:

$$V_{вл} = V_0 \frac{p_0}{p_{вл}} \frac{T_{вл}}{T_0} \left(1 + \frac{R_{п}}{R_с} x \right) (1 + x).$$

где $V_{вл}$, V_0 — соответственно объем влажных газов при $p_{вл}$ и $T_{вл}$ и объем сухого газа при p_0 и T_0 ; x — влагосодержание газов, кг/кг, $x = 0,001d$; $R_{п}$, $R_с$ — газовая постоянная соответственно водяного пара и сухого газа, $R_{п} = 0,471$ кДж/(кг·К); $R_с = (0,250 \div 0,280)$ кДж/(кг·К).

При коэффициенте расхода воздуха равном единице $R_с$ принимает меньшее из этих значений.

Раздел VI ОЧИСТКА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

Глава 21

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГАЗООЧИСТНЫХ УСТРОЙСТВ

Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в атмосфере промышленных предприятий в виде аэрозолей и токсичных газов регламентируются государственными стандартами и основаны на санитарно-гигиенических нормах. В приземном слое атмосферы различных вредных веществ должно быть не более, мг/м³: пыли нетоксичной 15, оксида углерода 20, сернистого ангидрида 10 и оксидов азота 5.

Одной из основных задач является сокращение так называемых неорганизованных выбросов, которые поступают в атмосферу, минуя газоочистные аппараты. В основе работы газоочистных аппаратов для очистки от газообразных компонентов лежат сорбционно-каталитические или химические методы, а аппаратов для улавливания аэрозолей — физико-механические.

Аэрозоли принято различать трех видов: пыли, дымы, туманы. Пыли — малоустойчивые системы с твердыми частицами от 5 до 50 мкм и более. Это частицы дисперсионного происхождения, т. е. образованные в результате механического дробления твердого вещества. Дымы — длительно устойчивые системы с частицами размером от 5 до 0,1 мкм и менее, образованными в результате возгонки и конденсации паров. К туманам отнесены аэрозоли с жидкими частицами широкого диапазона размеров, образованные в результате распыления или конденсации паров. К металлургическим аэрозолям в основном следует отнести первые два. Задача пылеулавливания складывается из создания условий для

укрупнения, коагуляции частиц и осаждения в пылеулавливающем аппарате. В практике пылеулавливания принята условная классификация методов очистки и аппаратов по природе используемых в них сил на механические и электрические. Большую группу пылеулавливающих аппаратов, основанных на механических методах очистки, можно разделить на два вида: сухие и мокрые. В мокрых используется эффект смачивания частиц в результате столкновения с каплями или с пленкой введенной жидкости. К аппаратам сухого типа относятся устройства, использующие гравитационноинерционные и фильтрационные принципы. Это наиболее распространенные аппараты.

Рассмотрим теоретические основы работы аппаратов трех основных групп: сухих механических, мокрых и электрических. Предварительно учтем следующие общие положения. На частицу действуют поверхностные и массовые силы. Одна из поверхностных сил — сила трения F_c на границе газ — частица. Сила F_c — заставляет частицу следовать по траектории близкой траектории газового потока. Все другие силы стремятся изменить траекторию частицы. К этим силам относятся: гравитационная F_T , центробежная $F_{ц}$, инерционная $F_{и}$, электромагнитная $F_{эм}$, действующая на заряд частицы, и др. Кроме того, частица участвует в процессах молекулярного взаимодействия, роль которых возрастает с уменьшением ее размера. К ним относятся: диффузия, термо- и диффузиофорез и т. п.

В общем случае уравнение движения частицы в векторной форме имеет вид

$$m(t) \frac{d\bar{w}}{dt} = \bar{F}_c + \bar{F}_T + \bar{F}_{эм} + \bar{F}_{мол}.$$

Здесь сила инерции, стоящая в левой части, зависит от величины переменной во времени массы частицы $m(t)$ и изменения вектора скорости \bar{w} .

Обтекание частицы газом с относительной скоростью в большинстве случаев происходит в ламинарном режиме, при этом число Рейнольдса $Re \ll 1$. Это дает основание считать силу трения по закону Стокса по формуле

$$\bar{F}_c = -3\pi\mu d(\bar{w} - \bar{w}_r),$$

где μ — динамическая вязкость газа; \bar{w}_r — вектор скорости газа.

Для диапазона размеров частиц $d = 10^{-1} \div 10^{+2}$ мкм погрешность расчета не превышает 10 %.

1. Сухая механическая очистка газов

В схемах сухой механической очистки газов применяют осадительные камеры, инерционные пылеуловители, центробежные и вихревые аппараты.

Осадительные камеры

Осаждение пыли в газоходах и осадительных камерах происходит в основном под действием силы тяжести. Этому препятствует сила сопротивления среды.

В начале осаждения, пока мало сопротивление, частица под действием силы тяжести начинает ускоренное движение. Рост скорости w прекращается, когда силы уравниваются. Далее осаждение идет равномерно с постоянной скоростью w_c . Такой процесс осаждения называется седиментацией. Эту конечную установившуюся скорость несложно определить, если выражение для силы тяжести приравнять силе Стокса

$$\frac{1}{6} \pi d^3 g (\rho - \rho_r) = 3\pi \mu d w_c,$$

отсюда

$$w_c = d^2 (\rho - \rho_r) / 18\mu \approx d^2 \rho g / 18\mu_r = g\tau_p,$$

где $\tau_p = d^2 \rho / 18\mu$ — время релаксации, с.

Через время τ_p с начального момента движения частица начинает падать со скоростью w_c . Чем меньше время релаксации, тем быстрее частица приобретает установившуюся скорость. Формула применима для частиц размером до 70 мкм.

В общем случае скорость осаждения сферической частицы сечением f в результате действия внешней силы F может быть определена из выражения

$$w = \sqrt{2F / \zeta \rho f}$$

или для силы тяжести

$$w_c = \sqrt{4d (\rho - \rho_r) g / 3\rho_r \zeta},$$

где коэффициент сопротивления ζ зависит от режима обтекания.

По этой формуле можно определять скорость для частиц размером больше 70 мкм.

Процесс осаждения частиц в движущемся потоке можно рассматривать как результат сложения двух движений. Этот принцип лежит в основе расчета осадительных камер (рис. 21-1). Например, время прохождения газа через камеру высотой h , шириной b и длиной l при объемном расходе Q ($\text{м}^3/\text{с}$) составит, с:

$$t = hbl / Q.$$

За это время частица, осаждающаяся со скоростью w_c , пройдет путь h_q , равный $h_q = w_c t$. Если $h_q = h$, то частицы размером d осядут в пределах камеры. Минимальный размер частиц, которые осядут в камере заданных размеров, м

$$d_{\text{мин}} = \sqrt{18Q\mu / (\rho - \rho_r) gbl}.$$

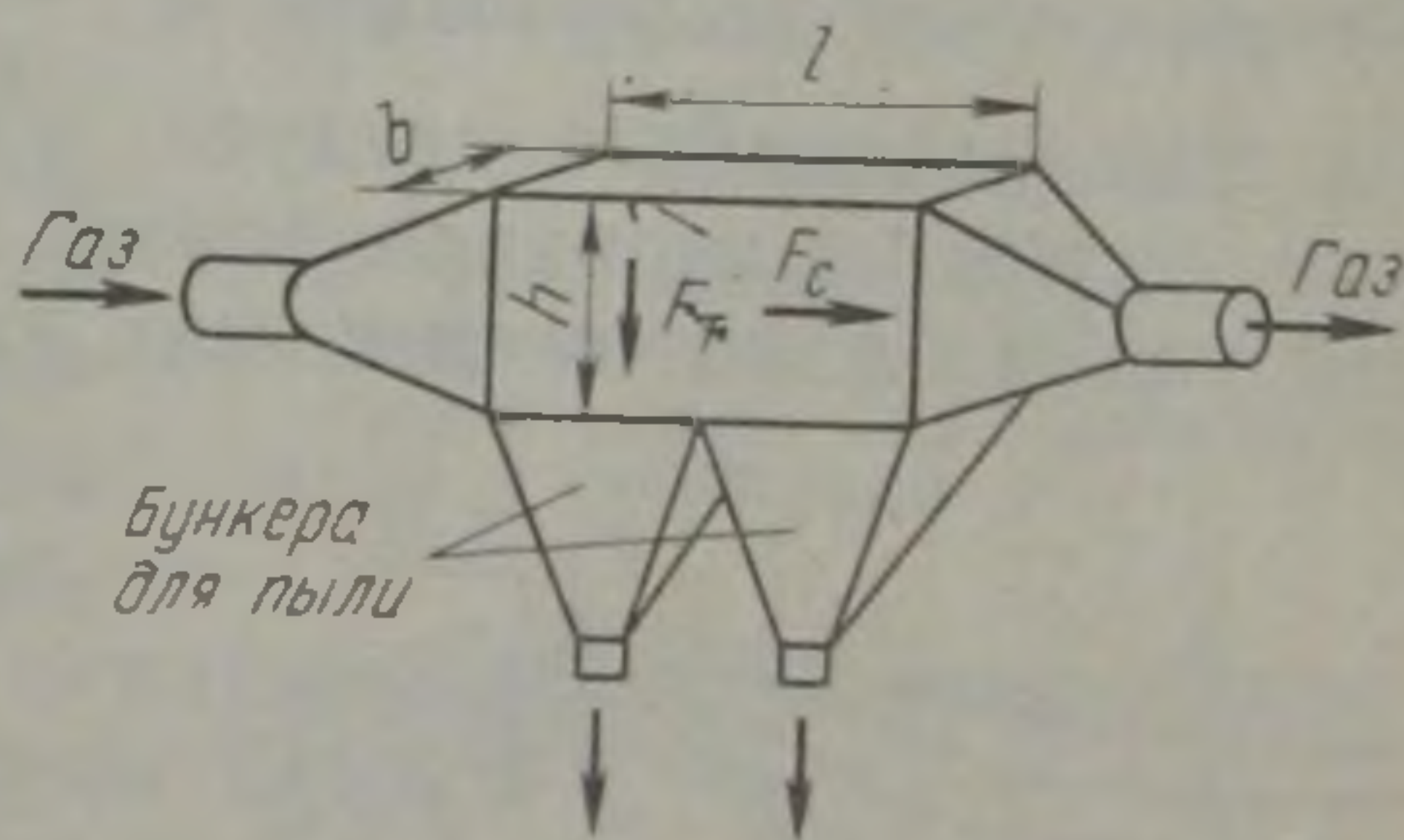


Рис. 21-1. Схема осадительной камеры

Отсюда — эффективность осадительной камеры тем больше, чем меньше ее высота или больше площадь основания при том же объеме. Эффективность осаждения или степень очистки

$$\eta = (z_1 - z_2)/z_1 = 1 - z_2/z_1,$$

где z_1, z_2 — соответственно начальная и конечная запыленность.

Несмотря на невысокую эффективность, простейшие аппараты — пылесадительные камеры применяют довольно широко. В них осаждают крупную ($d > 100$ мкм) фракцию частиц с высокой плотностью. Например, пыль, состоящая из оксидов железа ($\rho = 4500$ кг/м³) крупностью 100 мкм, улавливается таким способом примерно вдвое эффективнее, чем пыль кварцитов ($\rho = 2600$ кг/м³) такой же крупности.

К достоинствам пылесадительных камер следует отнести: простоту конструкции, низкую стоимость сооружения, низкие потери давления по тракту. Основной недостаток — большие размеры.

Эффект седиментации тем больше, чем меньше скорость газа в камере. Обычно расчетную среднюю скорость принимают около 1 м/с. Если в подводящем газоходе рекомендуемая скорость 18—20 м/с, то отсюда поперечное сечение камеры должно примерно в 20 раз превосходить сечение газохода.

Инерционные пылеуловители

Из вышесказанного следует, что наименьшей скоростью осаждения частиц из аэродисперсного потока будет скорость, вызванная действием одной из внешних сил — силы тяжести. Чтобы повысить скорость и эффективность

осаждения, необходимо увеличить внешнюю силу. Большей силой может быть сила инерции движущейся частицы или аналогичная ей центробежная сила.

Рассмотрим действие инерционной силы в общем виде. Искривление канала или обтекание какого-либо тела — препятствия вызывают резкое изменение направления потока. При этом происходит смещение траекторий частиц относительно линий тока газа, по которым они следовали до этого возмущения (рис. 21-2).

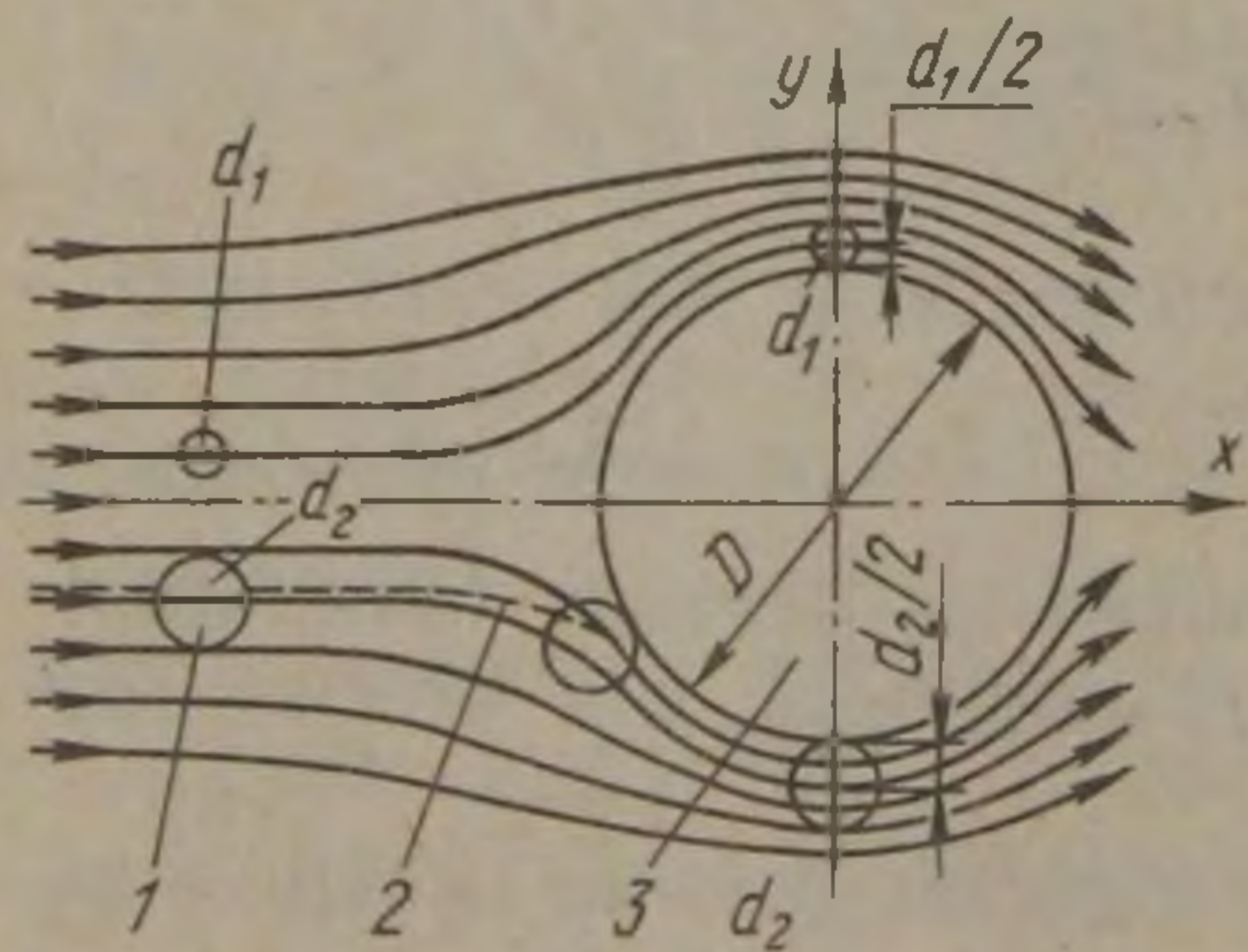


Рис. 21-2. Схема движения частиц при обтекании потоком препятствия:

1 — линия тока газа; 2 — траектория инерционной частицы; 3 — тело-препятствие

Для простейшего случая движения сферической частицы массой m и диаметром d при выполнении закона Стокса конечная скорость частицы w может быть определена из равенства силы инерции и силы сопротивления по уравнению

$$m \frac{dw}{dt} = 3\pi\mu d (w_p - w) \quad \text{или} \quad \frac{d^2\rho}{18\mu} \cdot \frac{dw}{dt} = w_p - w.$$

Для удобства анализа приведем это уравнение к безразмерному виду. Для этого введем относительное смещение частицы, например, по оси x для случая одномерного движения, в виде: $X = x/l$, где l — характерный размер препятствий, а скорость частицы $W = dx/dt$.

Введя начальную скорость потока до его возмущения препятствием ω_0 , выразим относительную скорость $W_r = \omega_r/\omega_0$. Время в относительных единицах будет

$$\tau = (\omega_0/l) t.$$

После подстановки получим уравнение движения частицы в безразмерном виде

$$2 \frac{d^2 \rho \omega_0}{18 \mu l} \frac{d^2 X}{d\tau^2} + \frac{dX}{d\tau} - W_r = 0$$

$$\text{или } 2 Stk \frac{dW}{d\tau} + W = W_r.$$

Аналитического решения в общем виде пока получить не удалось, однако уравнение представляет интерес для анализа движения. Множителем первого члена является безразмерный параметр Stk , характеризующий инерционность частицы или отношение инерционной силы, действующей на частицу, к силе гидравлического сопротивления среды. Он называется критерием Стокса

$$Stk = d^2 \rho \omega_0 / 18 \mu l.$$

Если частица бесконечно малой массы, то $Stk \rightarrow 0$. При этом из уравнения движения получаем $W = W_r$.

Равенство составляющих скоростей газа и частиц означает, что в этом случае траектории частиц совпадают с линиями тока газа, т. е. осаждения частиц не будет. Очевидно, есть такое критическое значение критерия Стокса $Stk_{кр}$, ниже которого частицы не будут сходиться с линиями тока и осаждаться на стенке канала или обтекаемом препятствии.

Эффективность инерционного улавливания будет велика для тех частиц, для которых $Stk \gg Stk_{кр}$.

В разнообразных конструкциях инерционных пылеуловителей осуществляется резкий поворот потока на угол от 90° до 180° , что вызывает инерционный эффект (рис. 21-3). При этом после поворота потока стремятся создать такое изменение вектора скорости, чтобы восходящий поток имел скорость меньше скорости седиментации.

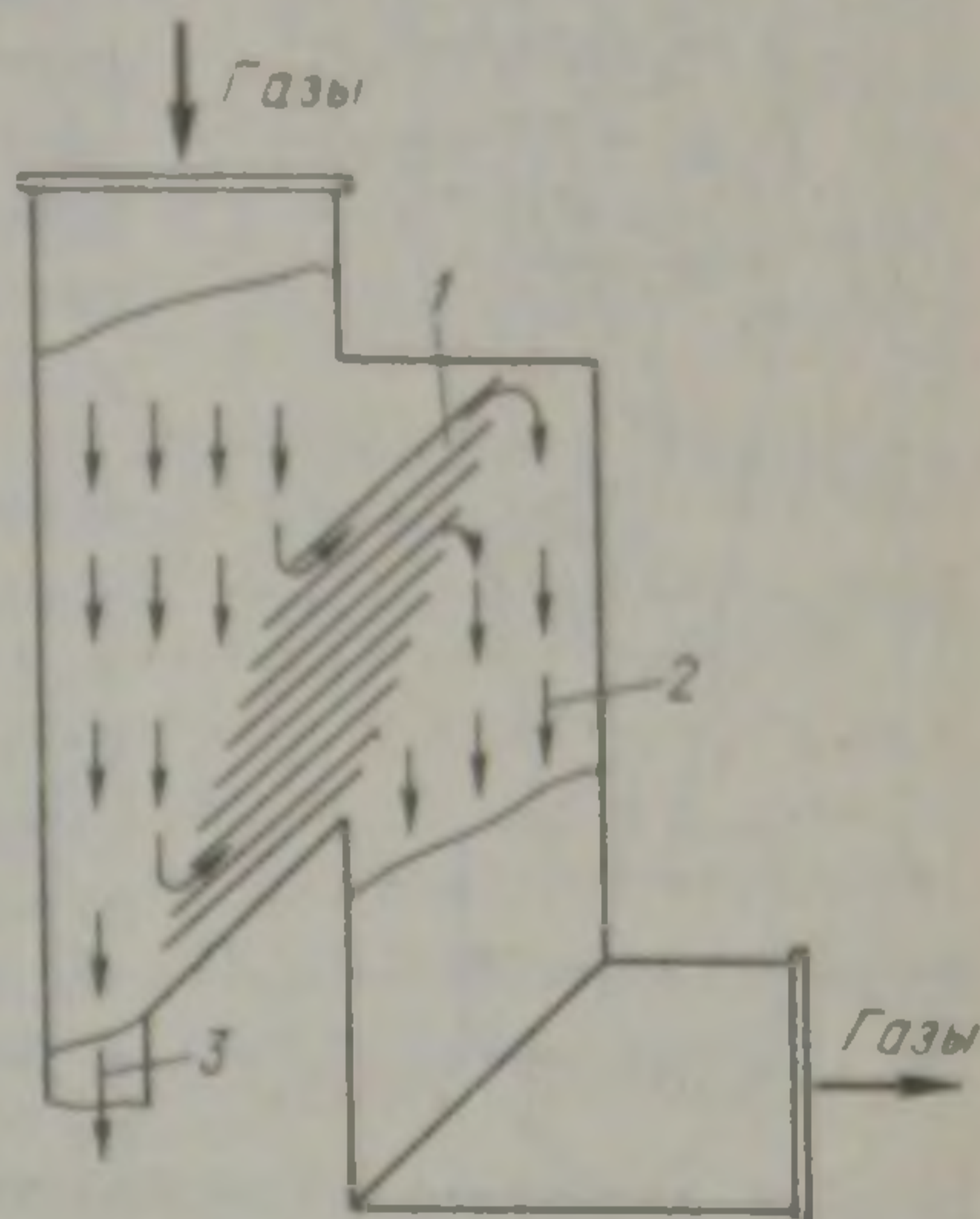


Рис. 21-3. Схема инерционного пылеуловителя:

1 — перегородки; 2 — траектория газа; 3 — отвод пыли

Подобные пылеуловители устанавливают в качестве ступени грубой очистки за доменными печами. Частицы более 30 мкм улавливаются в них на 70—80 %. Гидравлическое сопротивление таких аппаратов до 300 Па. Одним из простейших таких устройств является шлаковик мартеновской печи.

Инерционный принцип осаждения действует в жалюзийных аппаратах, которые широко применяют на электростанциях для улавливания золы котельных агрегатов и в системах промышленной вентиляции, а также в процессах фильтрации в пористых фильтрах.

Циклоны

Инерционный эффект многократно усиливается при вихревом вращении газового потока, который осуществляется в циклонах. Циклоны — наиболее распространенные в практике пылеулавливания аппараты. С высокой эффективностью в них осаждаются частицы крупностью от 15 мкм и выше.

При вращении потока на частицу действует центробежная сила $F_{ц}$, Н:

$$F_{ц} = m\omega^2/r,$$

где m — масса частицы, кг; ω_r — тангенциальная составляющая скорости потока, м/с; r — радиус вращения частицы, м.

Движение частиц в циклоне имеет сложный характер, в связи с чем, несмотря на многочисленные исследования, оно остается слабо изученным.

Принципиальная схема работы циклона приведена на рис. 21-4. Благодаря тангенциальному вводу, газ движется по спиральной траектории, причем во внешней спирали вниз, а по внутренней — вверх и удаляется через выхлопную трубу. Частицы пыли отбрасываются к стенке, движутся по ней вниз и собираются в бункере.

Если рассмотреть упрощенную схему движения, то первой стадией обеспыливания является процесс выведения частицы из потока на стенку циклона. Конечная радиальная составляющая скорости, которую может приобрести частица, определится из условия равенства центробежной силы и силы сопротивления.

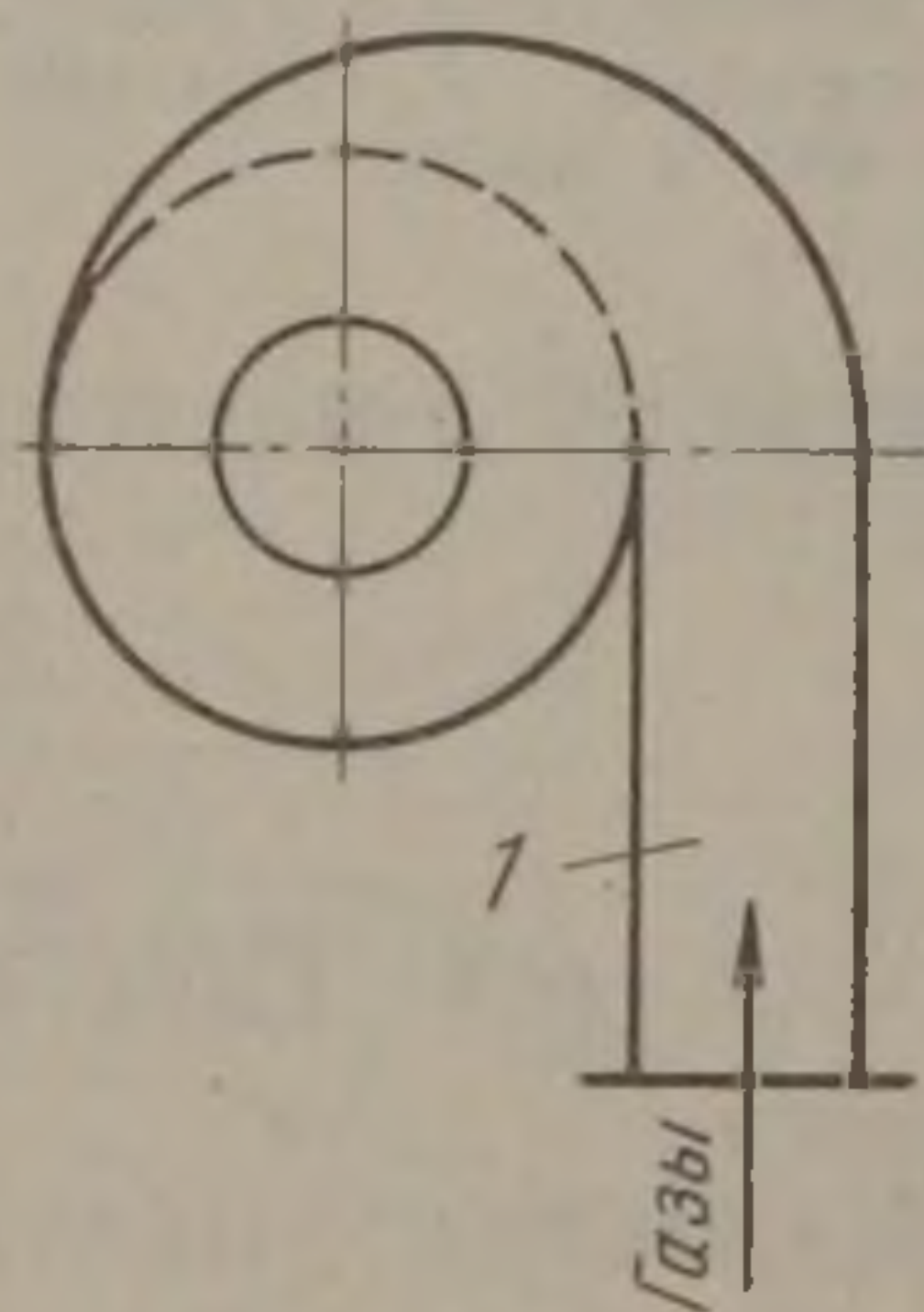
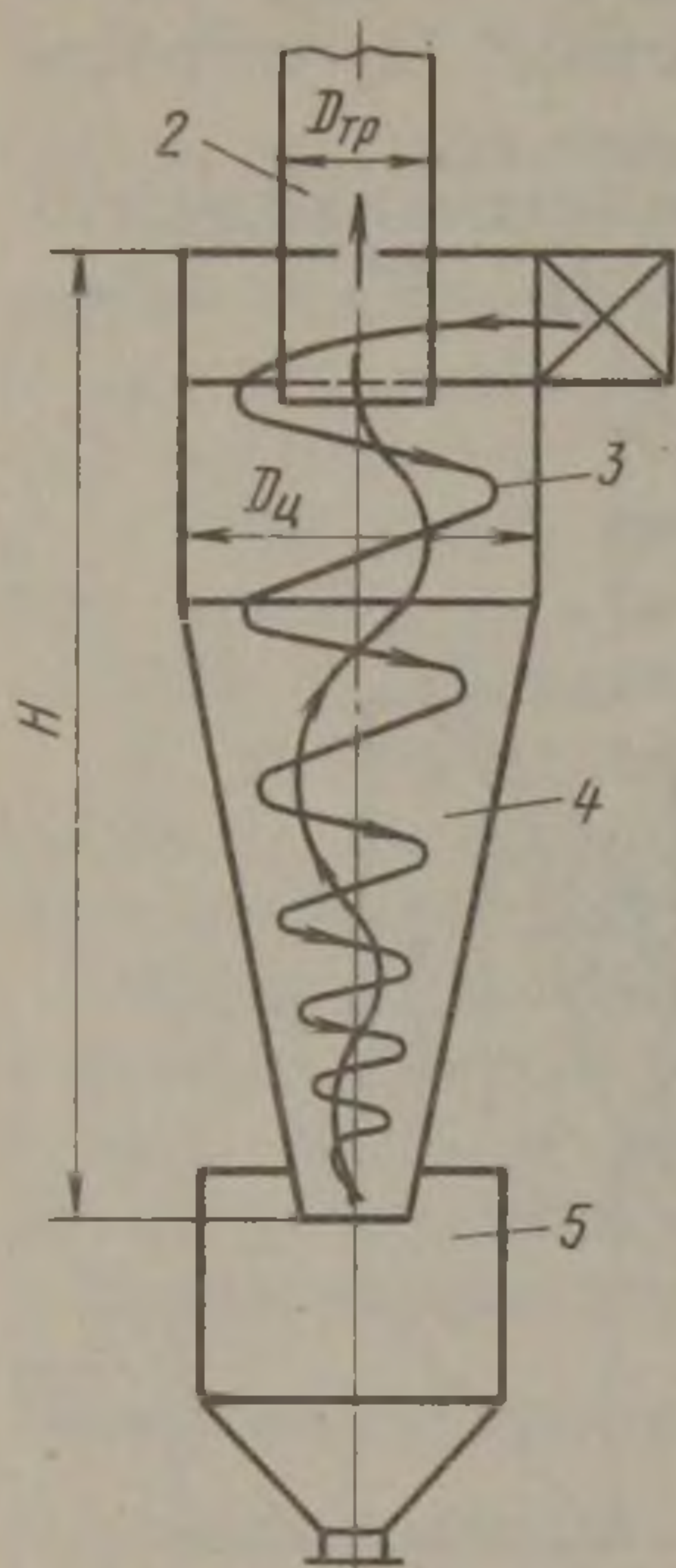


Рис. 21-4. Схема движения и осаждения частиц в циклоне:

1 — подводящий патрубок; 2 — выхлопная труба; 3 — цилиндрический участок корпуса циклона; 4 — конический участок; 5 — бункер пыли

Для сферической частицы в области, где сила сопротивления определяется законом Стокса, равенство сил имеет вид

$$\frac{1}{6} \pi d^3 \rho \frac{\omega_p^2}{r} = 3\pi \mu d \omega_p.$$

Отсюда конечная скорость ω_p , м/с

$$\omega_p = d^2 \rho / 18\mu \cdot \omega_g^2 / r.$$

Здесь введены серьезные допущения: частицы не взаимодействуют друг с другом; частица осаждается на стенке при первом касании; тангенциальная составляющая скорости частицы постоянна, не зависит от положения частицы и равна скорости газа; сопротивление движению частицы в газе подчиняется закону Стокса.

В задачу расчета входит определение критического диаметра частиц $d_{кр}$, больше которого улавливание эффективно.

Для ориентировочных расчетов можно применять формулу Девиса

$$d_{кр} = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{D_{ц}^2 \mu}{2H(\rho - \rho_r) \omega_{г_0}} \left[1 - \left(\frac{D_{тр}}{D_{ц}} \right)^4 \right]},$$

где $d_{кр}$ — диаметр критический, м; H , $D_{ц}$, $D_{тр}$ — соответственно высота циклона, его диаметр и диаметр выхлопной трубы, м; $\omega_{г_0}$ — скорость газов на входе в циклон, м/с.

Отсюда следует вывод, что эффективность осаждения возрастает с уменьшением диаметра циклона. Затраты энергии на очистку газа в циклоне определяются величиной его гидравлического сопротивления.

Многочисленные исследования различных конструкций циклонов легли в основу нормализованного ряда циклонов, разработанных институтом НИИОгаз, цилиндрического и конического типов. Нормативный метод расчета, разработанный для этих циклонов, дает возможность выбрать тип и размер циклона, удовлетворяющий требуемой степени очистки. Сопоставление результатов экспериментов дает удовлетворительное согласие с расчетными данными.

Циклоны конструкции НИИОгаза цилиндрического типа ЦН-11, ЦН-15, ЦН-24, ЦН-154 хуже улавливают мелкие частицы, чем циклоны конические, но обладают меньшим гидравлическим сопротивлением. Они относятся к типу высокопроизводительных. Как показывают расчеты, при условной скорости газа (средняя скорость на сечение аппарата) от 2,2 до 5,0 м/с в них хорошо улавливаются неслипающиеся частицы размером более 5 мкм.

В конических циклонах при больших потерях давления (1,25—1,5 кПа), достигается высокая эффективность улавливания мелких частиц. Они относятся к типу высокоэффективных, но малопроизводительных аппаратов. Частицы размером более 5 мкм улавливаются в них при более низких условных скоростях — от 1,5 до 3,5 м/с.

При больших расходах очищаемого газа, чтобы не увеличивать диаметр циклона, применяют групповую параллельную компоновку от 2 до 8 циклонов. Как правило, группы имеют общий коллектор запыленного или грязного газа, общий сборник чистого газа и общий пылевой бункер.

Попытки снизить гидравлическое сопротивление аппарата привели к созданию конструкции прямого циклона. Однако по эффективности улавливания мелких частиц он уступает обычному циклону.

Для повышения эффективности очистки от высокодисперсной пыли при больших расходах газа применяют батарейные циклоны. Они состоят из корпуса, в котором объединено в группу большое число циклонных элементов диаметром 100, 160 или 250 мм, и общего пылевого бункера. Циклонные элементы могут быть обычного или прямого типа. В большинстве конструкций применяются обычные циклонные элементы с направляющими завихрителями типа «винт» или «розетка». Оптимальная скорость газов для каждого элемента составляет 3,5—4,75 м/с.

В эквивалентном по диаметру циклоне степень улавливания на 20—25 % выше, чем в циклонном элементе. Однако, в целом при сопоставлении высокоэффективного циклона с эквивалентным батарейным циклоном той же производительности, последний имеет существенный выигрыш в габаритах.

При использовании специальных защитных покрытий внутренних поверхностей батарейные циклоны успешно применяют для улавливания неслипающихся абразивных пылей в огнеупорном и агломерационном производствах, а также для улавливания золы ТЭЦ.

Расчет батарейных циклонов сводится к определению числа циклонных элементов. Расчет каждого элемента выполняется аналогично расчету одиночных циклонов.

К недостаткам батарейных циклонов относятся: повышенная металлоемкость, большие по сравнению с одиночными циклонами эксплуатационные расходы и приведенные затраты.

2. Очистка газов фильтрацией

В процессе фильтрации потока газа через пористую перегородку на ней задерживаются частицы, взвешенные в потоке. Структура пористой перегородки может быть весьма разнообразной: тканевые материалы, волокнистые, зернистые, пористая керамика. Осаждение частиц на препятствиях — элементах слоя является результатом суммарного действия на частицу сил инерции, броуновской диффузии, электрических сил и эффекта касания (см. рис. 21-2).

В зависимости от размеров частиц, скорости фильтрации, величины и формы элементов фильтра действие одного из перечисленных видов осаждения будет преобладающим. Из опыта следует,

что частицы размером от 0,1 до 0,5 мкм обладают наибольшей проникающей способностью, плохо улавливаются фильтрами.

Со временем на поверхности фильтрующего слоя накапливается слой осажденных частиц, роль которого в процессе фильтрации становится основной, эффективность очистки возрастает. Но вместе с тем растет и гидравлическое сопротивление фильтрации газа. При этом, в зависимости от типа фильтра он должен подвергаться полной замене или регенерации, т. е. очистке от пыли.

Фильтры можно разделить на три категории:

1) тонкой очистки, которые применяют для улавливания токсичных частиц и ультратонкой очистки воздуха для особо чистых производств. Концентрация пыли на входе не более 1 мг/м^3 , скорость фильтрации до 10 м/с . Это волокнистые фильтры различных конструкций;

2) для очистки воздуха приточной вентиляции, которые работают с концентрацией пыли на входе до 50 мг/м^3 и со скоростью фильтрации до 3 м/с ;

3) промышленные фильтры, которые предназначены для технологической и санитарной очистки промышленных газов с начальной запыленностью до 60 г/м^3 . Это в основном тканевые и зернистые фильтры.

Для очистки воздуха в системах приточной и вытяжной вентиляции применяют грубоволокнистые фильтры из стекловолокна производительностью от 200 до $1500 \text{ м}^3/\text{ч}$ с сопротивлением до 150 Па , а также разнообразные конструкции кассетных и масляных фильтров. Для очистки воздуха перед турбовоздуходувками доменных печей используют масляные самоочищающиеся сеточные фильтры марки КДМ. Подача масла на сетки обеспечивает непрерывную их регенерацию.

Тканевые фильтры — это наиболее распространенные и высокоэффективные пылеуловители. Ткань служит основой для формирования и удержания фильтрующего пылевого слоя. В этом состоит принципиальное отличие процесса фильтрации в тканевых фильтрах от процесса в волокнистых фильтрах. В типичных тканях размер сквозных пор между пересекающимися нитями диаметром $300\text{—}700 \text{ мкм}$ составляет $100\text{—}200 \text{ мкм}$. Эти отверстия перекрываются волокнами ворса, что способствует формированию фильтрующего слоя пыли. Микроструктура его становится очень сложной. В таком слое роль механизма касания в суммарном эффекте существенно возрастает.

Обычно применяют материалы двух типов: ткани, изготавливаемые на ткацких станках, и войлоки. Для целей фильтрации используют хлопчатобумажные, шерстяные, нитроновые, лавсановые ткани и стеклоткани. Для температур $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ и более есть опыт применения металлоткани. Срок службы материалов зависит от температуры газов и свойств пылей и достигает 24 месяцев. Термостойкость стеклоткани не превышает $300 \text{ }^\circ\text{C}$, а синтетиче-

ских 140 °С. Аэродинамические свойства чистых тканей характеризуются скоростью фильтрации или величиной воздухопроницаемости при стандартном перепаде давлений 49 Па. При обычных скоростях фильтрации от 0,3 до 2 м/мин сопротивление применяемых чистых тканей составляет от 5 до 40 Па.

Тканевые фильтры различаются по многим признакам. Основные из них: форма фильтрующего элемента, способ регенерации, вид ткани.

Наиболее распространенной формой фильтрующего элемента является сшитый из ткани цилиндр — рукав. Схема работы

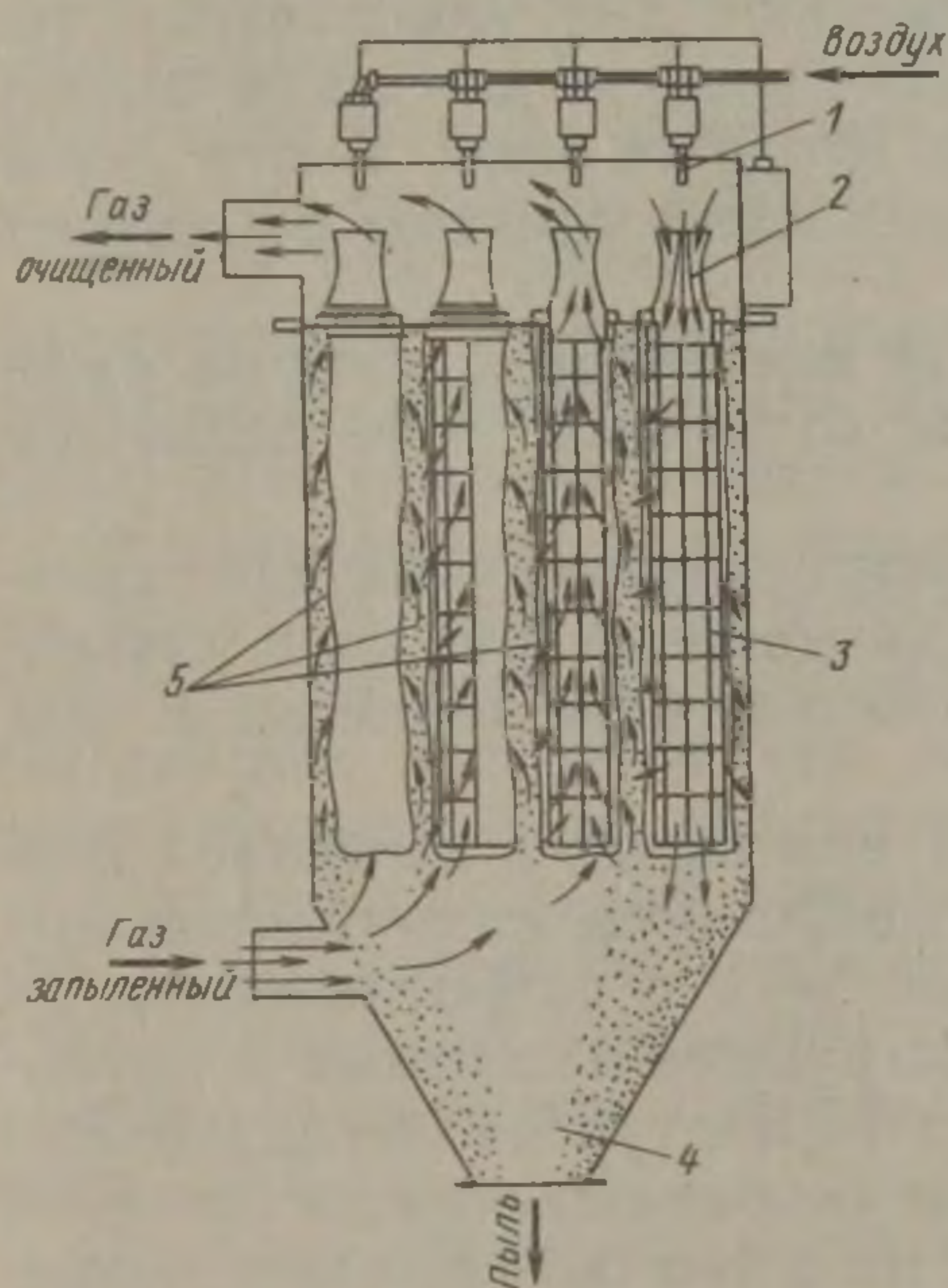


Рис. 21-Б. Схема работы рукавного фильтра:

1 — трубка подачи воздуха для регенерации; 2 — регенерация рукава; 3 — каркас рукава; 4 — бункер пыли; 5 — рабочие рукава

и вниз движется полое кольцо. Из радиальных отверстий кольца навстречу фильтрующему газу истекают струи сжатого воздуха, которые выдувают осевшую пыль. Регенерация ведется посекционно. Секция на 20—50 с отключается от газового потока.

Теоретические методы расчета тканевых фильтров еще не доведены до их практического применения и такие параметры работы фильтра, как скорость фильтрации, межрегенерационный период, эффективность очистки и другие определяются опытным путем.

Выбор типоразмера фильтра выполняется на основании приближенного расчета необходимой площади фильтровальной ткани S , м². Для этого определяют общий расход запыленных газов с учетом подсосов по тракту V_r , м³/мин и расхода на продувку V_p , м³/мин. Затем в зависимости от типа ткани выбирают величину

рукавного фильтра приведена на рис. 21-5. Как правило, фильтр состоит из нескольких камер (до 10), в каждой камере от 10 до 100 рукавов. Отношение диаметра рукава к его длине обычно 1 : 20 или 1 : 16. Рукава выполняют диаметром 127 или 300 мм.

Запыленный поток поступает внутрь рукава. При подаче газа снаружи рукав снабжается каркасом. По мере накопления пылевого слоя аэродинамическое сопротивление растет и достигает такого значения, когда необходима регенерация.

Регенерация производится встряхиванием рукава или обратной продувкой воздухом. В большинстве конструкций применяется сочетание обоих способов. Хорошие результаты дает обратная струйная продувка, при которой вдоль рукава вверх

газовой нагрузки или скорость фильтрации, ω , м³/(м²·мин). Рекомендуемые значения ω следующие, м³/(м²·мин): для шерстяных и хлопчатобумажных тканей 0,6—1,2; для стеклянных и синтетических 0,3—1,0.

Таким образом, площадь фильтрации S_{ϕ} в работающих секциях будет равна, м²:

$$S_{\phi} = (V_{г} + V_{п})/\omega,$$

а с учетом площади регенерируемой ткани $S_{р}$ необходимая площадь фильтра составит, м²:

$$S = S_{\phi} + S_{р}.$$

Выбор типа ткани, способа регенерации и типа фильтра производится с учетом технико-экономических соображений и опыта эксплуатации аналогичных установок.

На заводах цветной металлургии распространены фильтры типа РФГ и укрупненные типа УРФГ, разработанные институтом Гипроцветмет.

Их применение эффективно при переработке полиметаллических руд, где пыль является ценным продуктом. Степень очистки 96—99 %.

Из опыта эксплуатации рукавных фильтров на ряде заводов следует, что при начальной концентрации пыли 5÷50 г/м³ запыленность на выходе их составляет не более 20—50 мг/м³, что в 2—3 раза меньше допустимой концентрации пыли в выбрасываемых газах.

К основным недостаткам тканевых рукавных фильтров следует отнести следующие: большие габариты, обусловленные низкими скоростями фильтрации или газовой нагрузкой на ткань; ограниченная стойкостью ткани температура очищаемых газов. Зернистые и металлокерамические фильтры, состоящие из слоя частиц сферической и другой формы, применяют для очистки газов при высоких температурах и для агрессивных сред. Фильтры могут быть в виде слоя сыпучих зерен, либо в виде спеченной пористой структуры.

Осаждение пыли аналогично процессу в волокнистых фильтрах. В сыпучем слое зерен частицы осаждаются во всем объеме слоя. В фильтрах, состоящих из прессованных металлических порошков, имеет место и образование поверхностного слоя пыли, как в тканевых фильтрах.

Более трудный, чем для тканей, процесс регенерации этих фильтров ограничивает их применение в промышленности при очистке больших объемов газов.

3. Мокрая очистка газов

Принцип мокрой очистки газа основан на контакте запыленного потока с жидкостью. При этом в большинстве случаев, когда температура газа и жидкости различна, пылеулавливанию сопут-

ствуют тепло- и массообменные процессы. Контакт газа с жидкостью способствует и процессу абсорбции газовых компонентов. Таким образом, с помощью аппаратов мокрого типа решают комплексную задачу: охлаждение, пылеулавливание и в некоторой степени очистку от вредных газообразных примесей.

Поверхность контакта газового потока и жидкости в аппарате может быть в виде пленки жидкости, пузырьков газа, барботирующего через жидкость, и капель диспергированной жидкости. Наиболее развитой является поверхность капель.

Осаждение частиц на пленку жидкости происходит в скрубберах с орошаемой насадкой и в масляных самоочищающихся фильтрах КДМ. Необходимый запас кинетической энергии частицы для осаждения ее на пленку зависит от размера частицы и угла смачивания. Здесь основную роль играют силы инерции и гравитации, т. е. захват эффективен только для крупных частиц. Аппараты такого типа имеют ограниченное применение.

В условиях барботажного или пенного аппарата анализ расчетов осаждения частиц показывает, что в пузырьках диаметром 0,2—1,0 см при скорости их подъема 0,28 м/с интенсивность инерционного осаждения высока и на порядок выше гравитационного. С ростом размера частиц и с уменьшением размера пузырьков эффективность улавливания растет. Высокодисперсная пыль улавливается хуже. Поэтому пенные аппараты не получили широкого распространения в металлургии.

Осаждение частиц на каплях происходит за счет действия многих сил. Однако и в этом случае основная роль принадлежит инерции. Инерционный эффект захвата каплей частичек пыли лежит в основе процесса кинематической коагуляции. Скорость и эффективность кинематической коагуляции зависит от относительной скорости частиц и каплей — прямопропорционально, и обратно пропорционально от отношения их размеров. Диапазон размеров улавливаемых частиц увеличивается с повышением скорости. Коагуляция может протекать более интенсивно, если частицы или капли несут электрический заряд.

Наиболее благоприятные условия для кинематической коагуляции протекают в горловине трубы Вентури, где относительная скорость частиц достигает 100 м/с и более.

В промышленности, в частности в металлургии, широко применяются аппараты, где осаждение частиц происходит на каплях. Распыление жидкости производят с помощью форсунок (форсуночные скрубберы) или за счет энергии турбулентного газового потока (скрубберы Вентури).

Форсуночные оросительные скрубберы (рис. 21-б) способствуют охлаждению потока и очистке от крупной пыли размером более 10—15 мкм, т. е. подготовке газа к последующей тонкой очистке. В верхней части скруббера размещается несколько поясов орошения с большим числом форсунок, распыляющих воду равномерно по сечению. Газ подводится снизу и со скоростью 0,7—1,5 м/с

поднимается вверх. Расход воды ($\sim 8-10$ л/м³), расположение форсунок и скорость газов определяют с учетом охлаждения газов обычно до $40-50$ °С при увлажнении до состояния насыщения и предотвращения капельного уноса. Форсунки грубого распыливания обеспечивают оптимальный для такого процесса диаметр капель $d_k = 0,6 \div 1,0$ мм. Шлам непрерывно удаляется из аппарата через гидрозатвор в канал — шламопровод.

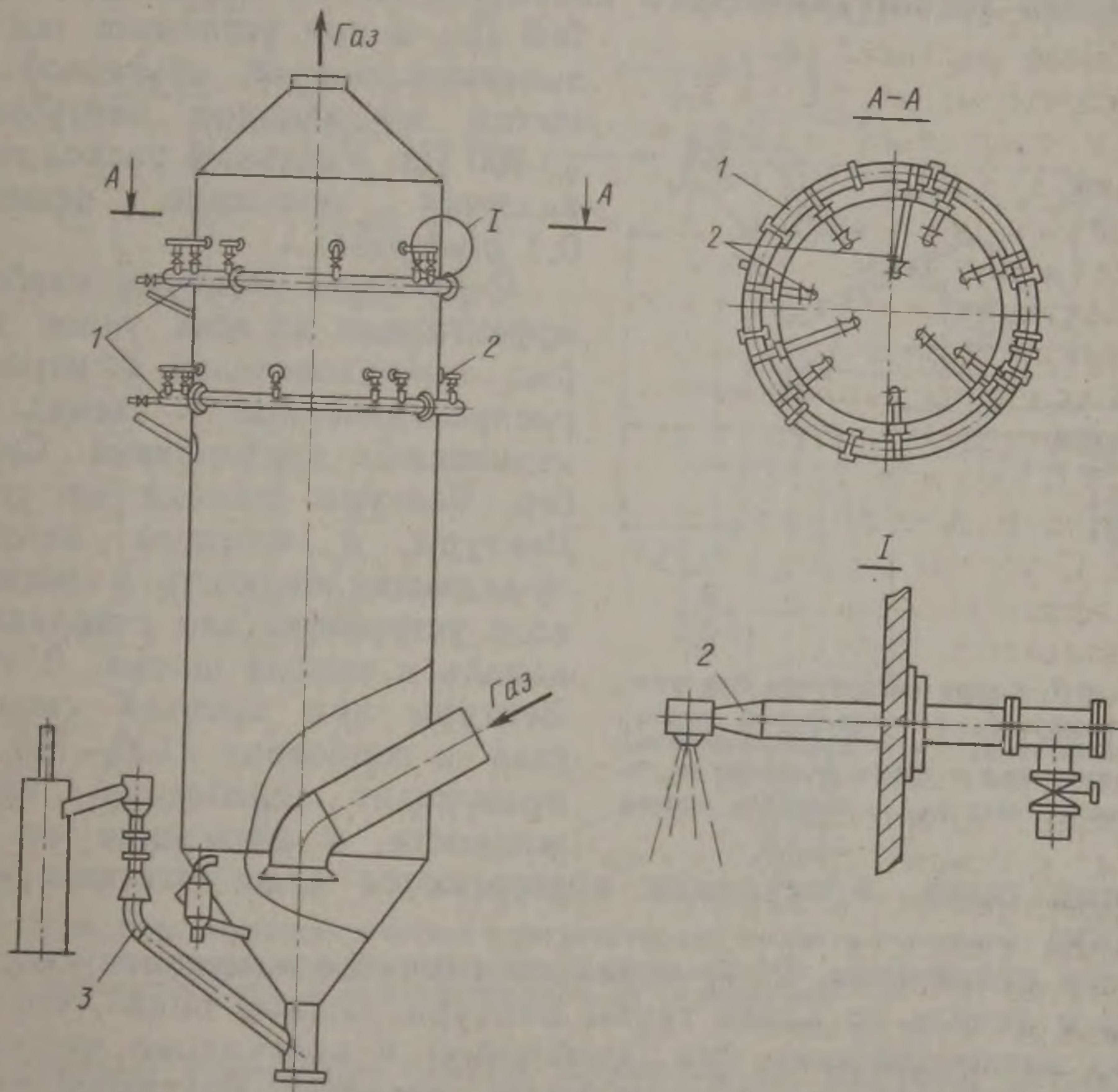


Рис. 21-6. Схема полого форсуночного скруббера:
1 — водяной коллектор; 2 — форсунка; 3 — гидрозатвор

Расчет теплообмена в скруббере основан на уравнении теплового баланса и теплоотдачи от газа к воде. Значительную трудность при этом представляет нахождение объемного коэффициента теплоотдачи, обычно определяемого экспериментально. Гидравлическое сопротивление скрубберов не более $150-200$ Па. При тангенциальном подводе газа можно повысить эффект очистки. Такие центробежные скрубберы в некоторых случаях применяют не только как аппараты для подготовки газа перед тонкой очисткой, но и как самостоятельные пылеуловители. Фракционный коэффициент очистки в них составляет для частиц $5, 10$ и 20 мкм соответственно $80, 90, 95$ %. Тангенциальный подвод газа расположен в нижней части скруббера. Орошение производится

форсункой во входном патрубке и подачей воды на стенку в виде пленки. Укрупненные частицы отбрасываются центробежной силой на стенку и улавливаются стекающей вниз пленкой воды. Условная скорость газа на сечение аппарата принимается 4,5 м/с, скорость во входном патрубке $11 \div 12$ м/с, максимальный диаметр 3,3 м, высота $H \approx (3-4) D$, м.

Гидравлическое сопротивление скруббера конструкции Всесоюзного теплотехнического института (ВТИ) составляет 400—500 Па, а при установке так называемой мокрой прутковой решетки во входном патрубке — до 800 Па. Удельный расход воды, включая орошение решетки, 0,1 л/м³ газа.

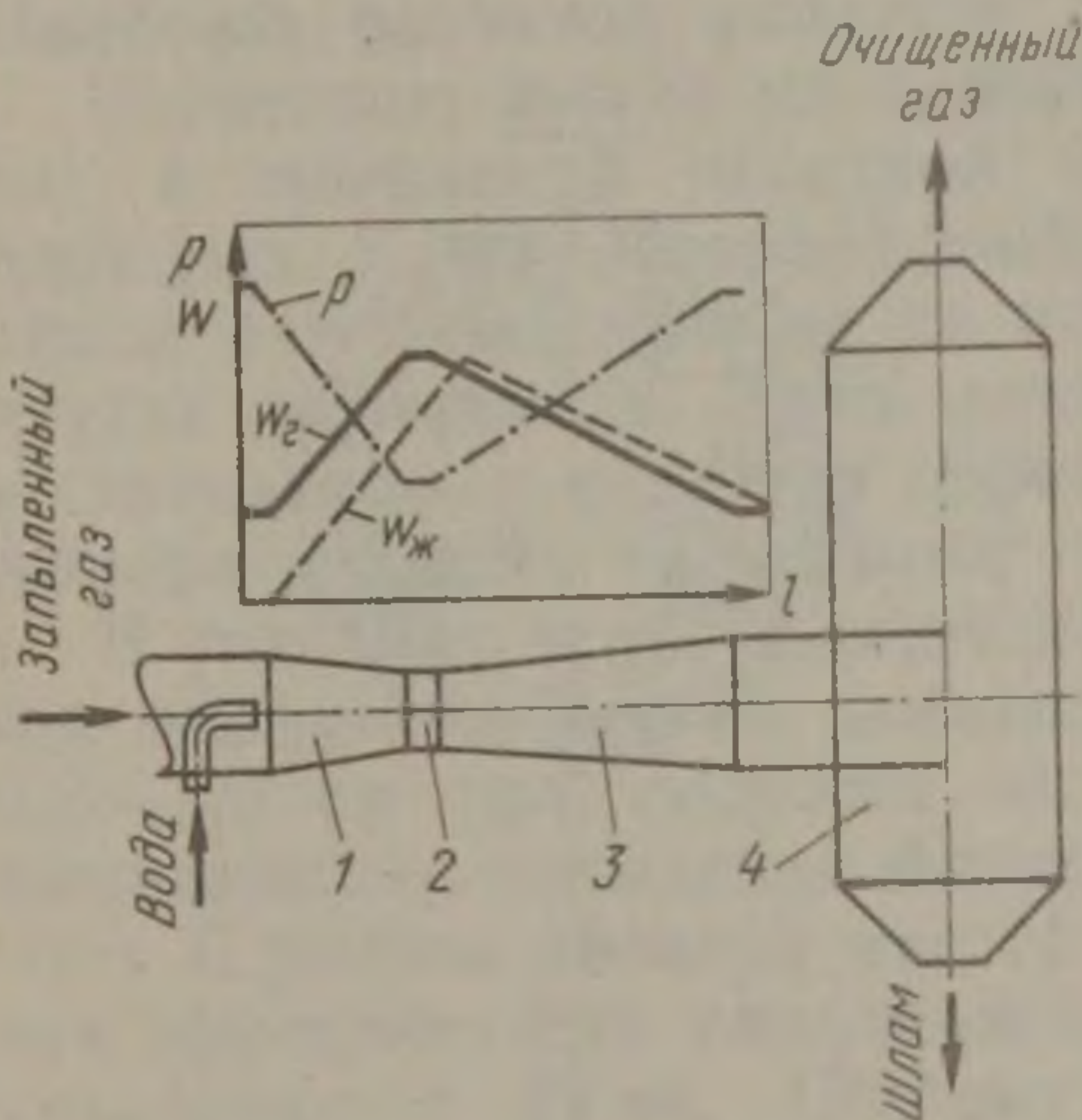


Рис. 21-7. Схема скруббера Вентури: 1 — конфузор; 2 — горловина трубы; 3 — диффузор; 4 — каплеуловитель; p — давление в трубе Вентури; w_g — скорость газа; $w_{ж}$ — скорость капель

Скрубберы Вентури наиболее эффективные из всех типов мокрых пылеуловителей и наиболее распространенные в схемах промышленных предприятий. Скруббер Вентури состоит из трубы Вентури, в которую вводится орошающая жидкость, и специального устройства для улавливания капель и вывода шлама. В трубе Вентури при высокой скорости газа в горловине (100—150 м/с) происходит дробление капель жидкости и осаждение на них

частиц пыли. Коагуляции подвергаются даже частицы менее 1 мкм.

На схеме (рис. 21-7) показано типичное изменение скорости газа и капель по длине трубы Вентури. Отсюда видно, что причина взаимодействия фаз (дробления) и коагуляции частиц на каплях — большая относительная скорость. Максимальное ее значение приходится на участок горловины трубы.

Для случая распыления воды воздухом средний диаметр капель d_k , мм

$$d_k = 16050/w_g + 9,75 \cdot 10^5 \cdot m^{1,5},$$

где w_g — скорость газа относительно пыли, м/с; m — удельное орошение м³ воды на м³ газа. Как показывает опыт, эффективность скруббера Вентури растет с увеличением количества распыляемой воды и критерия Стокса Stk .

Фракционную эффективность можно оценить с помощью эмпирической зависимости

$$\eta_i = 1 - \exp(-mk Stk^{0,5})$$

где $Stk = \rho_w d_i^2 / 18 \mu d_p$ — критерий Стокса; d_i — диаметр частиц i -той фракции, мкм; k — коэффициент, зависящий от эффективной длины и диаметра горловины $l_{эф} = l + 0,5d_p$. Для $100 < l_{эф} < 400$ м величина $k = 1,25 \div 1,56$.

Гидравлическое сопротивление скруббера Вентури складывается из сопротивления двух элементов: трубы Вентури и каплеуловителя. Основную долю составляют потери в трубе Вентури

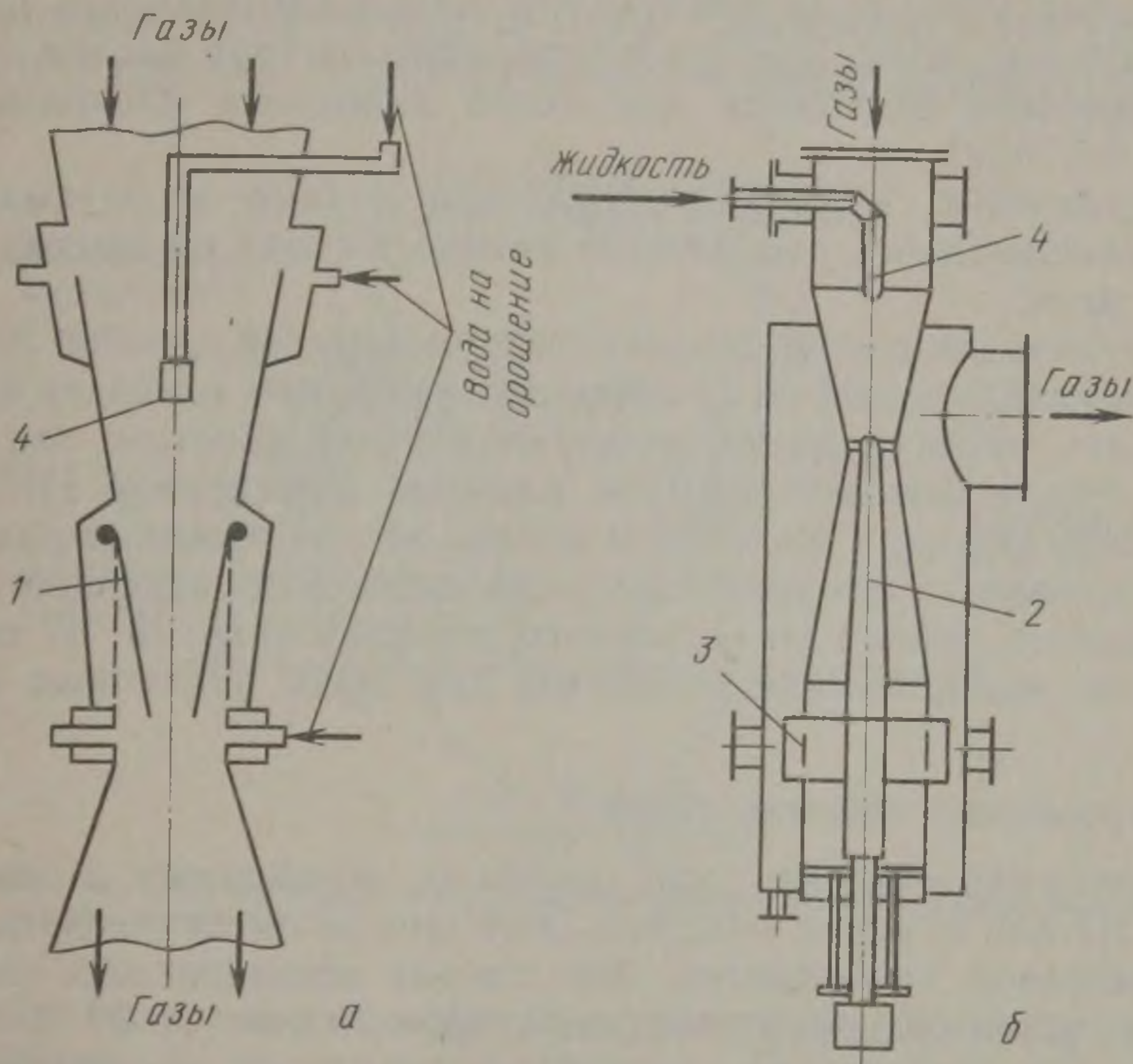


Рис. 21-8. Скрубберы Вентури с регулируемым сечением горловины; а — прямоугольным; б — круглым; 1 — подвижные створки; 2 — подвижный шток; 3 — каплеуловитель; 4 — форсунка

Δp , которые учитывают потери сухой трубы Вентури и потери, обусловленные вводом воды, Па

$$\Delta p = \left(\zeta_0 + \zeta_{ж} \frac{m \rho_{ж}}{\rho_{г}} \right) \frac{\rho_{г} \omega^2}{2},$$

где ζ_0 — коэффициент сопротивления сухой трубы, $\zeta_0 = 0,12 \div 0,30$; $\zeta_{ж}$ — коэффициент, учитывающий ввод жидкости, $\zeta_{ж} = 0,6 \div 1,15$.

По гидравлическим характеристикам промышленные скрубберы Вентури условно делятся на высоконапорные и низконапорные. Первые применяют для улавливания высокодисперсной пыли, их гидравлическое сопротивление достигает 10—20 кПа, вторые — как аппараты для предварительной очистки или для улавливания крупных частиц, их сопротивление не превышает 3—5 кПа.

Существует много конструкций скрубберов Вентури, отличающихся формой сечения горловины, способом ввода жидкостей, устройством регулирования сечения горловины, конструкцией каплеуловителя (рис. 21-8).

Широкое распространение получают конструкции унифицированного ряда скрубберов с кольцевым сечением горловины, разработанные институтами НИИОгаз и Гипрогазочистка. Две модификации этого ряда охватывают производительность по газу от 2 до 500 тыс. м³/ч. Для всех типоразмеров труб расход орошающей жидкости постоянен для всего диапазона расходов газа и равен 0,8 л/м³.

Центробежные каплеуловители при работе в оптимальном режиме обеспечивают содержание капель в газах на выходе ниже 75—100 мг/м³.

Теоретический расчет мокрых пылеуловителей сложен. В практике пылеулавливания при выборе типа мокрого аппарата и определении его эффективности пользуются более простым, так называемым энергетическим методом расчета. Институтом НИИОгаз разработана нормаль расчета. В основе метода лежит допущение, что эффективность аппарата при улавливании определенного вида пыли зависит только от удельного расхода энергии. В расчете применяют эмпирические величины для пыли различных производств.

4. Электрическая очистка газов

Электрическую очистку, как правило, применяют в качестве второй, тонкой ступени очистки. Этот способ имеет более сложное конструктивное воплощение, чем способ механической очистки. Электроочистка способна работать с эффективностью 99 % и даже 99,9 %, улавливать частицы широкого диапазона размеров вплоть до субмикронных при концентрации пыли на входе до 50 г/м³ и выше.

Процесс электроосаждения производится в электрофильтрах и состоит из двух стадий: зарядки и осаждения (рис. 21-9). В большинстве конструкций обе стадии совмещены в пределах системы разноименных электродов: коронирующих и осадительных. Осадительные электроды заземлены, а на изолированные коронирующие электроды подается потенциал высокого напряжения от агрегата питания. Конструкция электродов такова, что между ними образуется резко неоднородное электрическое поле, что является условием образования коронного разряда. В результате в межэлектродном пространстве образуется униполярный объемный заряд, состоящий из движущихся к осадительному электроду ионов. На поверхность частицы, поступающей в межэлектродный промежуток, осаждаются ионы, сообщая ей заряд определенной величины. Поле напряженностью E с момента приобретения частицей заряда q действует на нее с силой F равной $F = qE$, Н.

После достижения частицей осадительного электрода ее заряд стекает, цепь замыкается. Частица удерживается на электроде силами адгезии до тех пор, пока образующийся слой осажденных частиц не достигает такого размера, когда его необходимо удалить. В большинстве случаев удаление производится механическим встряхиванием электродов, а в мокрых электрофильтрах — периодической или непрерывной обмывкой электродов.

Основные типы промышленных электрофильтров — пластинчатые и трубчатые. В пластинчатых система электродов схематично

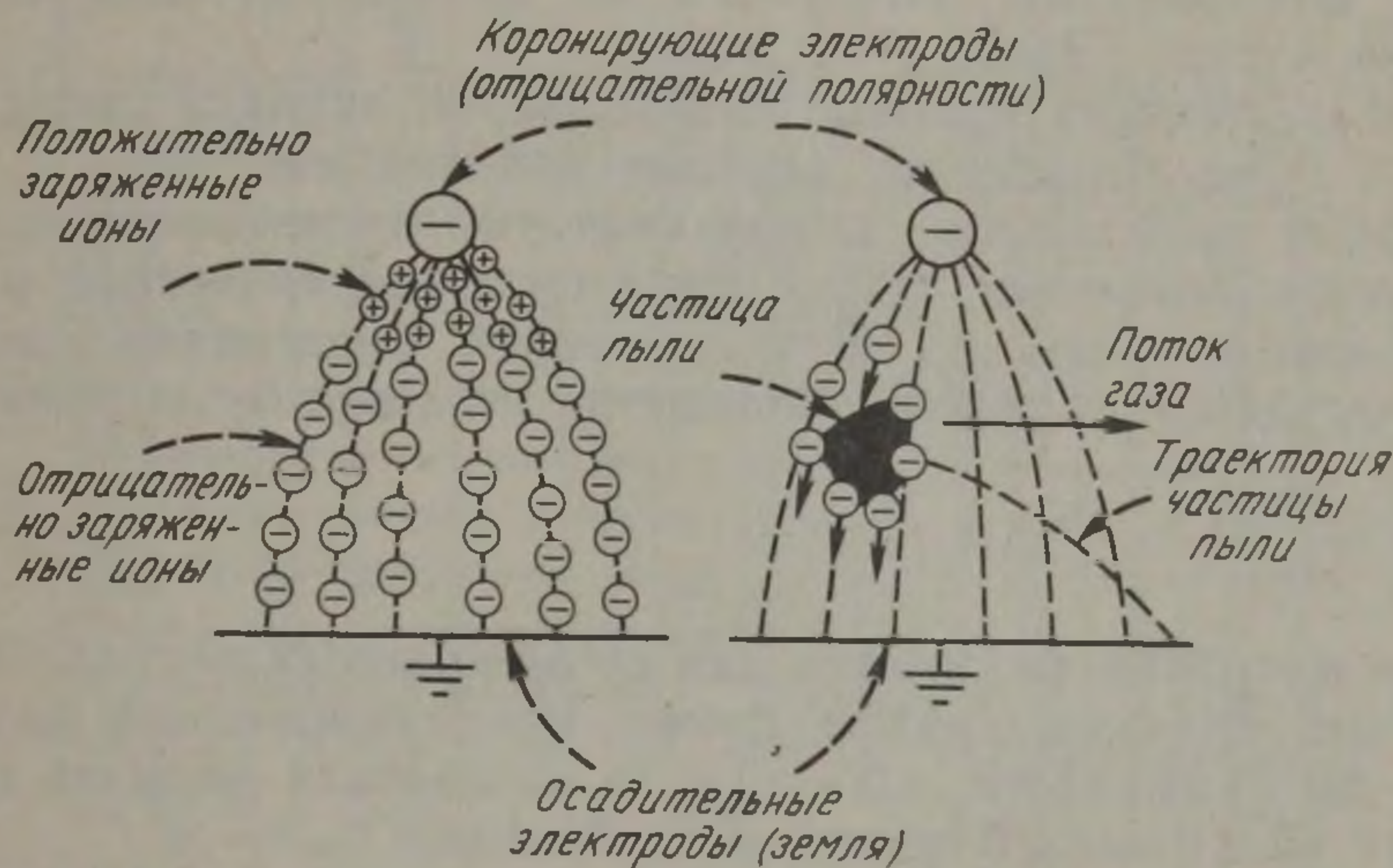


Рис. 21-9. Схема зарядки и осаждения частиц в поле коронного разряда электрофильтра

представляет собой ряд коронирующих проводов между плоскими пластинами, в трубчатых — система коаксиальных цилиндров или провод внутри цилиндра.

Коронный разряд возникает при достижении определенной величины напряженности электрического поля. Этому соответствует критическое напряжение, подаваемое на электроды U_0 . В системе электродов трубчатого фильтра критическое напряжение начала коронного разряда определяется по формуле

$$U_0 = E_0 R_1 \ln (R_2 / R_1),$$

для пластинчатого фильтра

$$U_0 = E_0 R_1 \left(\frac{\pi H}{d} - \ln \frac{2\pi R_1}{d} \right),$$

где E_0 — критическая напряженность электрического поля, В/м; R_1, R_2 — радиус коронирующего и осадительного электрода, м; H — межэлектродное расстояние, м; d — расстояние между соседними коронирующими электродами, м.

В промышленных электрофильтрах значение критического напряжения находится в пределах 20—40 кВ. С увеличением напряжения выше U_0 соответственно растет и ток короны, интен-

сифицируется процесс зарядки и осаждения частиц. При величине $U_{пр}$ наступает пробой межэлектродного промежутка. Наибольшая эффективность электрофилтра достигается при напряжении близком к пробойному.

Величину предельного заряда q_m (Кл), приобретаемого под воздействием поля E частицей диаметра d_q , можно рассчитать по формуле

$$q_m = AE d_q^2,$$

где A — коэффициент, зависящий от диэлектрических свойств материала частиц. Здесь $E < E_{пр}$.

Для большинства промышленных пылей зарядка происходит за 1—2 с и не лимитирует процесс улавливания.

В первом приближении можно считать, что движение частицы определяется действием только двух сил: электрической и силы сопротивления среды по Стоксу. Тогда предельная скорость дрейфа частицы при условии равенства этих сил будет равна, м/с

$$\omega_q = \frac{q_m E C_K}{3\pi\mu d_q} \approx E^2 d_q,$$

где C_K — поправка Канингема для субмикронных частиц. Отсюда видно, что скорость дрейфа прямо пропорциональна квадрату средней напряженности поля и надо стремиться держать напряжение на электродах близким к пробойному.

К сожалению, количественная оценка скорости дрейфа на основе приведенных формул имеет небольшую точность. В теоретическом расчете не может быть учтено все множество факторов, влияющих на скорость частиц.

Степень улавливания частиц для данной фракции пыли хорошо аппроксимируется зависимостью, предложенной Дейчем

$$\eta_i = 1 - \exp\left(-\frac{2\omega_q L}{\omega_r H}\right),$$

где ω_r — скорость газа в активном сечении электрофилтра, м/с; ω_q — скорость дрейфа частиц размером d_q , м/с; L — активная длина электрофилтра, м; H — расстояние между коронирующим и осадительным электродами (для трубчатого филтра — радиус трубчатого электрода), м.

При выборе нужного типоразмера электрофилтра часто пользуются опытными данными филтра, работающего в аналогичных условиях, с известной степенью улавливания, или полученными на модели. При выборе аналога учитывают характеристики пылегазового потока, скорость газа в активном сечении, способ встряхивания электродов, электрический режим аппарата.

Конструкции электрофилтров разнообразны, так как определяются технологическими условиями его работы. К ним относятся: состав и свойства пыли и газов, их температура, давле-

ние и влажность, степень очистки, условия компоновки газового тракта и др.

Все типы электрофильтров можно классифицировать по нескольким признакам:

по размещению зон зарядки и осаждения — на двухзонные, где зарядка происходит в ионизаторе, а осаждение в осадителе, и однозонные, где совмещены зоны зарядки и осаждения. Первые применяются ограниченно в основном для тонкой очистки воздуха в схемах аспирации, вторые — в большинстве отраслей

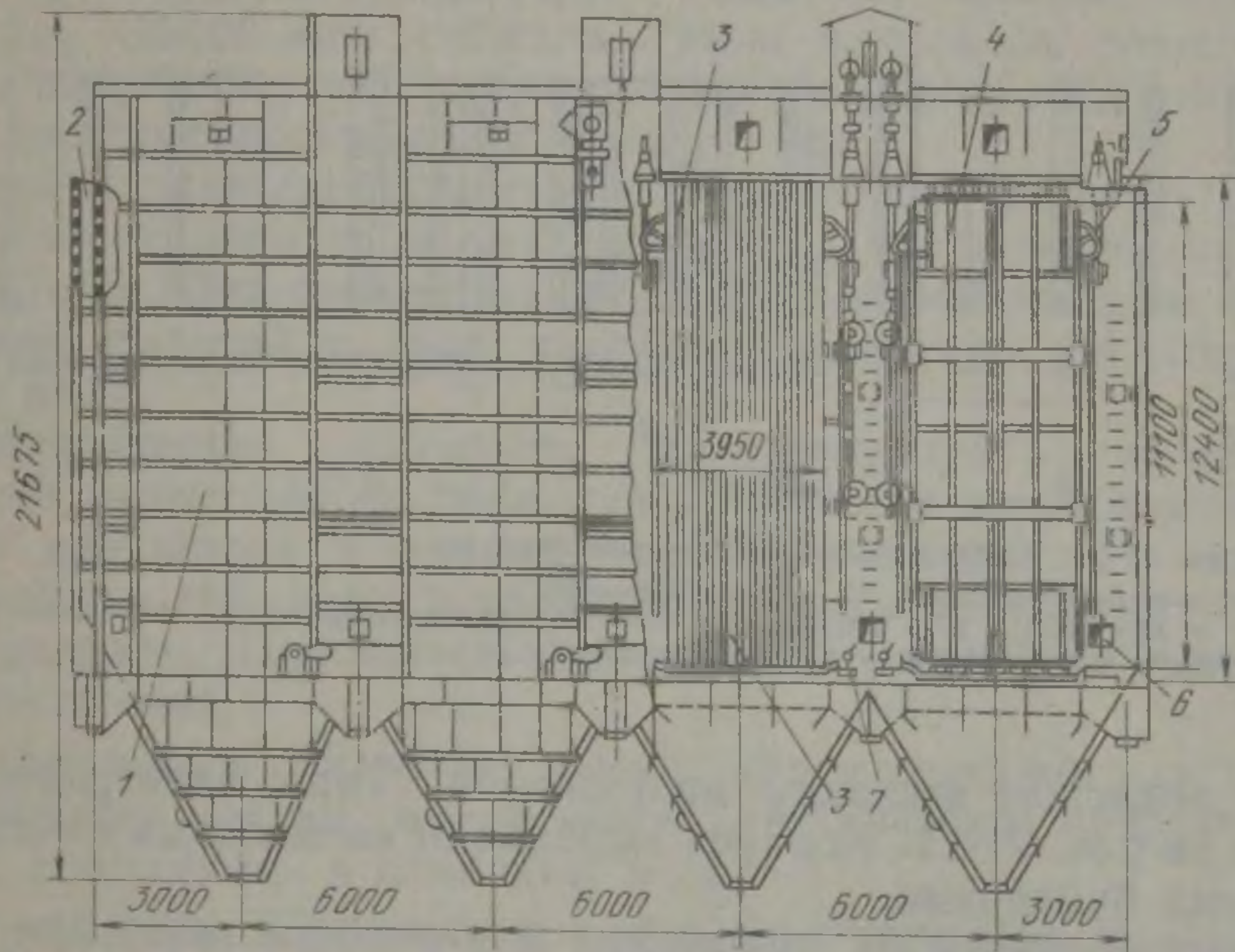


Рис. 21-10. Схема электрофильтра:

1 — корпус; 2 — газораспределительное устройство; 3 — осадительный электрод; 4 — коронирующий электрод; 5 — устройство для подвеса коронирующих электродов; 6 — люк для обслуживания

промышленности для очистки газов, как технологических, так и выбрасываемых в атмосферу;

по направлению газового потока в активной зоне — на горизонтальные и вертикальные;

по способу удаления пыли с электродов — на сухие и мокрые;

по количеству последовательно расположенных электрических полей — на одно- и многопольные;

по числу параллельных секций фильтра — на односекционные и многосекционные;

по типу электродной системы — на трубчатые и пластинчатые.

Кроме того, электрофильтры различной производительности отличаются друг от друга высотой электродов, длиной активного сечения полей по ходу газа, площадью активного сечения.

Схема электрофильтра приведена на (рис. 21-10).

С 1970 г. промышленностью освоен выпуск унифицированных сухих горизонтальных электрофильтров типа ЭГ трех габаритов, которые имеют высоту электродов соответственно 4; 7,5 и 12 м. Длина электрического поля — 2,5 м. В зависимости от площади активного сечения бывает от двух до четырех полей.

Осадительные электроды широкополосные С-образного сечения, коронирующие — ленточно-игольчатые. Межэлектродное расстояние — 275 мм. Коронирующие электроды с шагом 180 мм объединяют в раму с автономным подвесом, системой встряхива-

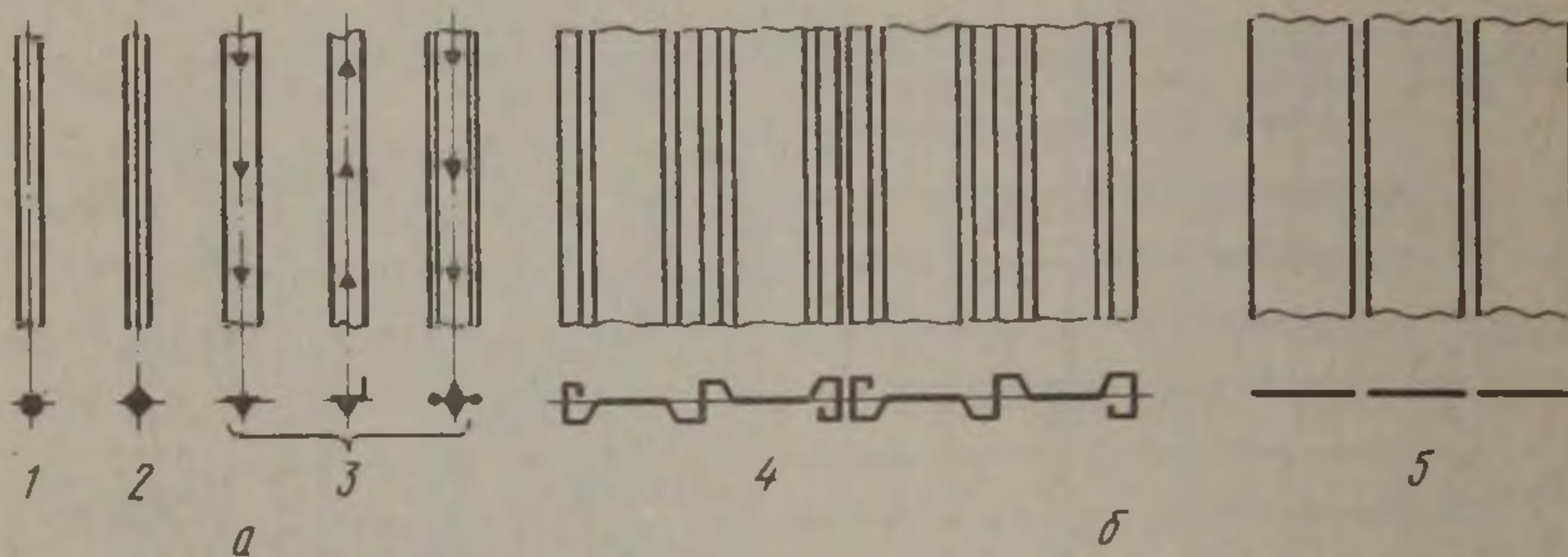


Рис. 21-11. Типы промышленных электродов:

a — коронирующие; *б* — осадительные;
 1 — круглый; 2 — штыковой; 3 — ленточно-игольчатый; 4 — С-образные пластины; 5 — гладкие пластины

ния и подводом высокого напряжения. Типы электродов приведены на рис. 21-11. Корпуса выполняют со щелевыми и пирамидальными бункерами.

Электрофильтры ЭГ применяют для очистки газов при температуре до 250 °С. Допустимое давление внутри корпуса до 0,5 кПа или разрежение 3,5 кПа.

Агрегаты питания, снабжающие электрофильтры выпрямленным током высокого напряжения (60—80 кВ), являются неотъемлемой частью установки. В состав агрегата питания входит повысительный трансформатор, полупроводниковый выпрямитель, регулятор напряжения и пульт управления. На один электрофильтр устанавливают обычно столько агрегатов, сколько в нем полей, т. е. каждое электрическое поле имеет самостоятельное питание.

Регулятор напряжения служит для поддержания его на максимально высоком предпробивном уровне. Пробивное напряжение, зависящее от многих факторов и прежде всего от величины и параметров пылегазового потока, колеблется в значительных пределах. Поэтому эффективность работы электрофильтра в значительной степени зависит от регулятора.

Хорошие результаты дают регуляторы, основанные на искровом принципе, когда напряжение поддерживается на уровне искрового разряда и не допускается развитие дугового разряда.

Удельный ток короны i , приходящийся на единицу длины коронирующего электрода, определяют расчетным или экспериментальным путем (обычно $i = 0,18—0,25$ мА/м). По суммарной длине электродов приходящейся на одно поле l , можно установить номинальный ток агрегата питания, А

$$I = il10^3,$$

и выбрать агрегат питания.

На работу электрофильтров оказывают влияние различные факторы. Среди них: скорость газов, начальная концентрация пыли, параметры газа, загрязнение электродов, величина удельного электросопротивления пыли и др.

Оптимальная скорость газа, установленная из опыта эксплуатации электрофильтров, для большинства типов пылей составляет 0,8—1,5 м/с. Она определяет время пребывания частицы в активной зоне фильтра и имеет решающее значение для вторичного уноса пыли.

Электрическая прочность межэлектродного промежутка, которую характеризует величина пробивного напряжения, зависит от параметров и состава газа. Рост плотности и снижение температуры газа ведет к увеличению $U_{пр}$ и устойчивости коронного разряда. Положительное действие оказывает повышение влажности газа.

Существенное значение имеют характеристики дисперсной фазы: размер частиц, их удельное электрическое сопротивление (УЭС), способность к слипанию и др.

По величине УЭС пыли принято делить на три группы:

1) низкоомные пыли УЭС ниже 10^4 Ом·см. При осаждении частицы пыли мгновенно отдают свой заряд и могут быть снова вынесены потоком, если их адгезионные свойства низки;

2) хорошо улавливаемые пыли с УЭС от 10^4 до 10^{10} Ом·см. Скорость их разрядки такова, что способствует образованию осадка на электродах, который при встряхивании осаждается в бункер;

3) высокоомные пыли УЭС выше $10^{10}—10^{11}$ Ом·см. Трудность улавливания в электрофильтре пыли этой группы вызвана образованием так называемой «обратной» короны в микротрещинах осажденного слоя. Пробивное напряжение, заряд частиц, а с ними и эффективность улавливания, при этом резко снижаются.

Кондиционирование газа небольшими добавками водяного пара, серного ангидрида или аммиака, снижает УЭС пыли и способствует подавлению обратной короны. Для большинства пылей зависимость УЭС от температуры имеет экстремальный характер — максимальные значения УЭС приходятся на диапазон температур 100—200 °С. Поэтому в большинстве случаев стремятся снижать температуру газов перед электрофильтром.

ОЧИСТКА ГАЗОВ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

В доменном производстве осуществляется технологическая очистка доменного газа и очистка газовых выбросов в атмосферу.

1. Характеристика запыленности доменного газа

Доменный или колошниковый газ получается в процессе доменной плавки как газообразный продукт окислительно-восстановительной реакции. Газ содержит 30—35 % горючих, состоящих в основном из CO, и имеет теплоту сгорания 3,5—4 МДж/м³. Это делает его пригодным к применению в качестве топлива. Выход газа составляет 2000—2500 м³/т чугуна.

Доменный газ на выходе из печи содержит колошниковую пыль, которая состоит из частиц, образованных в результате механического измельчения шихтовых материалов, и частиц возгонного происхождения. При повышенном давлении на колошнике пылевынос составляет 15—20 г/м³, при нормальном — 50—60 г/м³ или соответственно 25—75 и 50—150 кг на 1 т чугуна.

По размеру пыль относится к грубодисперсным — массовое содержание частиц размером от 100 до 800 мкм составляет от 40 до 50 %, а частиц размером меньше 20 мкм — до 10 %.

Химический состав пыли отражает состав шихты, %: 33—40 оксиды железа, 8—15 SiO₂; 10—12 CaO, 4—5 MgO, 4—5 Al₂O₃, 30—32 C.

Как химический, так и дисперсный составы пыли зависят от многих факторов: состава шихтовых материалов, режима ведения плавки, марки выплавляемого чугуна и т. д.

2. Методы очистки доменного газа

В связи с требованием низкой конечной запыленности доменный газ проходит две — три ступени очистки. Обычно схема газоочистки содержит ступени грубой, полутонкой и тонкой очистки. Каждая ступень состоит из аппаратов одного — двух типов (рис. 22-1).

Грубая очистка предназначена для улавливания наиболее крупной фракции колошниковой пыли, размером более 100 мкм. Как правило, ее осуществляют в аппаратах сухой очистки — радиальных или тангенциальных пылеуловителях. В них используется инерционный принцип охлаждения. В радиальном пылеуловителе диаметром 5—8 м загрязненный газ поступает по оси аппарата сверху и удаляется после осаждения крупной пыли также через верх. Частицы выпадают за счет поворота потока на 180° и резкого снижения скорости (с 20 м/с в подводящей трубе до 0,6—1 м/с в аппарате). Инерционный эффект складывается

с гравитационным. Пыль из бункера удаляется при помощи шнека, смачиваемого водой. Грубая очистка позволяет снизить запыленность доменного газа до $5-9 \text{ г/м}^3$, при этом осаждается до 60—70 % колошниковой пыли.

В некоторых схемах газоочистки на печах, работающих без повышенного давления, в ступени грубой очистки применяют тангенциальные пылеуловители. Эффективность их несколько выше, чем радиальных, но выше и потери давления.

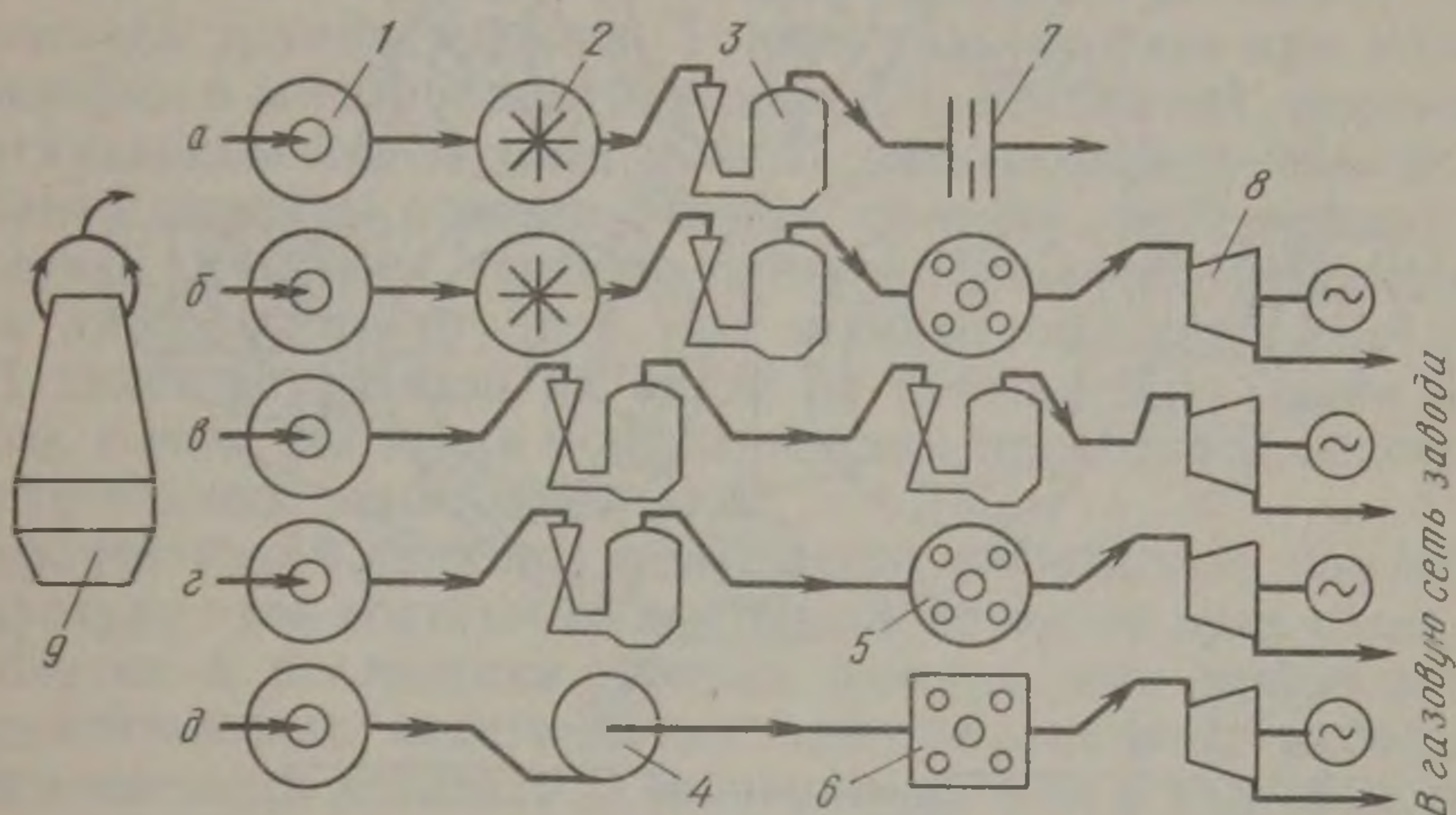


Рис. 22-1. Схемы очистки доменного газа:

а—д — варианты; 1 — радиальный пылеуловитель; 2 — форсуночный скруббер; 3 — скруббер Вентури; 4 — центробежный аппарат; 5 — мокрый электрофильтр; 6 — сухой пластинчатый электрофильтр; 7 — дроссельная группа; 8 — ГУБТ; 9 — доменная печь

Полутонкую очистку газа в большинстве доменных газоочисток выполняют с помощью полых форсуночных скрубберов, низконапорных скрубберов Вентури и дроссельной группы (рис. 22-2). Процесс сопровождается коагуляцией частиц на каплях. После этой ступени очистки газ содержит не более $0,5-1 \text{ г/м}^3$ пыли размером до 20 мкм. Доменные скрубберы имеют диаметр 6—9 м и высоту 25—35 м. Газ подводится снизу, со скоростью 1—2 м/с проходит скруббер и отводится сверху. Орошение осуществляется с помощью двух—четырёх ярусов форсунок, распределённых равномерно по сечению в верхней части скруббера. Удельный расход воды 4—6 л/м³ газа. Очистка газа сопровождается его охлаждением с 250—300 до 40—50 °С и полным насыщением влагой. Уловленная пыль в виде шлама выводится через гидрозатвор.

На большинстве работающих печей отечественных заводов полутонкая очистка завершается в низконапорных скрубберах Вентури. Две—четыре параллельно включенных трубы Вентури с индивидуальными каплеуловителями работают с перепадом давления до 5 кПа. Удельный расход воды 0,2—0,5 л/м³, скорость газа в горловине 50—80 м/с.

Ступень полутонкой очистки может состоять только из скрубберов Вентури, которые способны охладить и очистить газ до нужной концентрации перед тонкой очисткой.

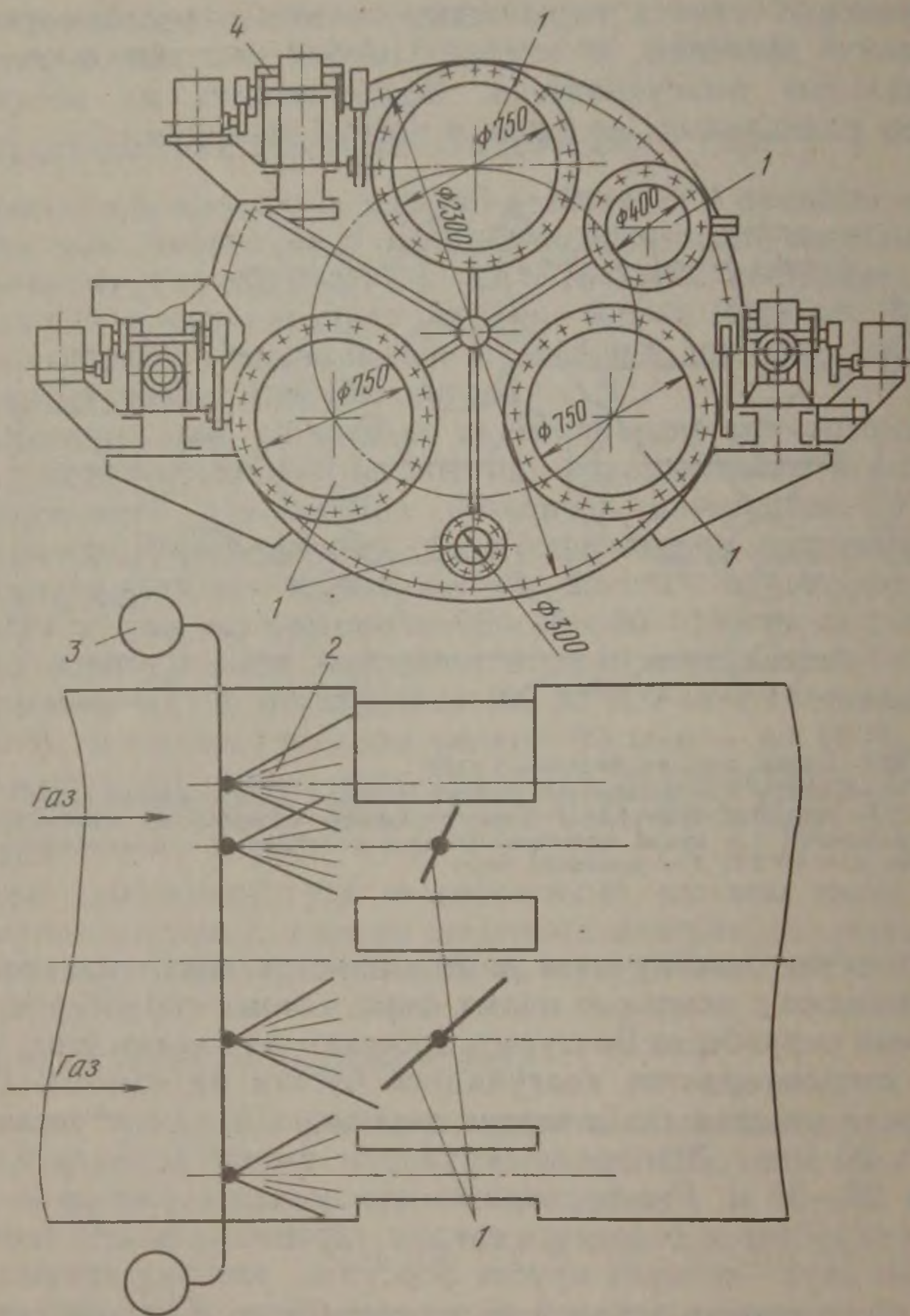


Рис. 22-2. Дрессельная группа:

1 — поворотный дроссель; 2 — водяная форсунка; 3 — водяной коллектор; 4 — электропривод дросселя

Тонкая очистка до остаточной запыленности 5—10 мг/м³ может быть осуществлена в дрессельной группе, мокром электрофилт্রে или скруббере Вентури с перепадом 12—15 кПа.

Дрессельная группа, предназначенная в первую очередь для регулирования давления на колошнике доменной печи, устанавливается на горизонтальном участке газопровода и состоит из четы-

рех дроссельных клапанов, перед которыми имеется подвод воды. При подаче воды 0,4—0,6 л/м³ в дроссельной группе протекает процесс аналогичный процессу в трубе Вентури. При перепаде давления 20—25 кПа скорость в дросселях достигает 200—250 м/с, в результате чего после каплеуловителя остаточная запыленность доменного газа не выше 2—5 мг/м³. Недостаток — высокие невосполнимые потери давления доменного газа.

В более экономичных схемах газоочистки с применением турбин ГУБТ роль гидравлического сопротивления выполняет вместо дроссельной группы турбина. Тонкая очистка газа при этом осуществляется в электрофильтрах типа ДМ. Трубчатый, однозонный, с вертикальным ходом газа, мокрый электрофильтр обеспечивает не только высокую степень очистки от пыли, но и осушку газа. На случай остановки турбины предусматривается байпасная линия с дроссельной группой. По техническим условиям работы ГУБТ температура газа на входе не должна быть ниже 100 °С. В связи с этим газ после мокрой очистки приходится подогревать в смесительных теплообменниках.

Перспективной является схема сухой газоочистки, при которой температура газа достаточно высока. В проектах этих схем, которые близки к реализации, тонкая очистка газа осуществляется в горизонтальных пластинчатых электрофильтрах, работающих при повышенных давлении и температуре, или в тканевых рукавных фильтрах, а полутонкая — в сухих механических (центробежных) аппаратах.

Наибольшее распространение в схемах мокрой газоочистки имеет обратная система водоснабжения. Общий расход воды на очистку доменного газа крупного металлургического предприятия составляет 10 % общего водопотребления завода или около 10 тыс. м³/ч. Вода, выходящая из аппаратов, выносит уловленную пыль и содержит растворенные газовые компоненты. Обратный цикл водоснабжения включает сооружения для осветления воды (радиальные отстойники, гидроциклоны), охлаждения и нейтрализации воды, насосы для перекачки воды и для переработки шлама.

3. Очистка вредных выбросов в атмосферу

Причиной загрязнения атмосферы в доменном цехе являются неорганизованные выбросы. Основные виды вредных загрязнений — это пыль и оксид углерода, которые поступают с выбросами колошникового газа из межконусного пространства. Выброс пыли происходит также на тракте движения сырья, в подбункерном помещении и при движении продуктов плавки на литейном дворе. Выброс колошникового газа в атмосферу осуществляется в момент ссыпки шихты из скипа в приемную воронку колошника и выпуска газа из межконусного пространства. Выбросы пыли достигают 4 кг/т чугуна, а выбросы СО до 2 кг/т чугуна.

Радикальным средством подавления этих выбросов является подача в межконусное пространство компримированного газа с давлением больше, чем в печи (рис. 22-3). В результате чего туда в момент открытия большого конуса не поступает газ из печи, а при открытии малого конуса в атмосферу выбрасывается чистый газ.

Второе место по выбросам занимают аспирационные системы подбункерных помещений. Выброс пыли в узлах пересыпки сыпу-

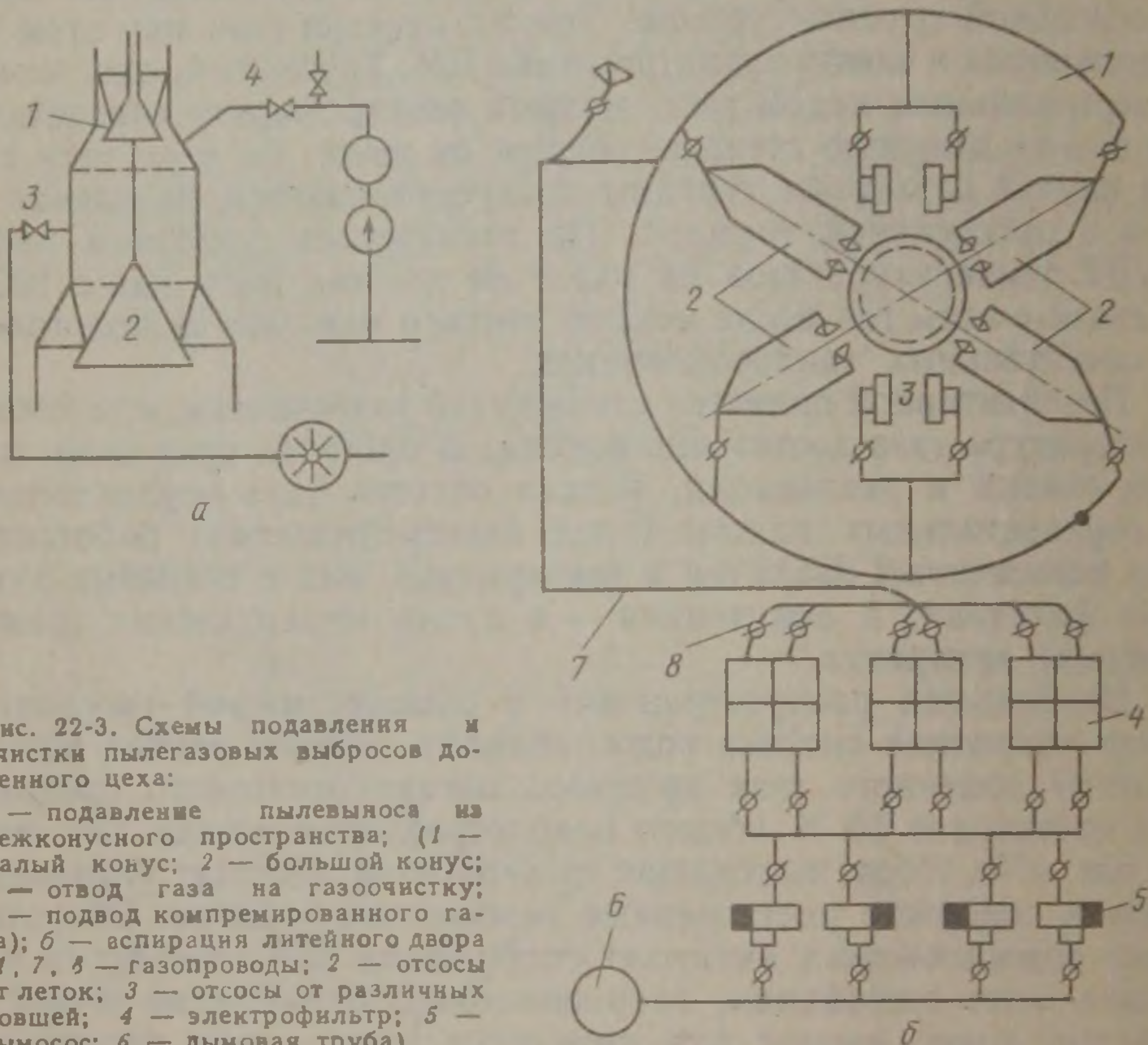


Рис. 22-3. Схемы подавления и очистки пылегазовых выбросов доменного цеха:

а — подавление пылевых выбросов из межконусного пространства; (1 — малый конус; 2 — большой конус; 3 — отвод газа на газоочистку; 4 — подвод компримированного газа); б — аспирация литейного двора (1, 7, 8 — газопроводы; 2 — отсосы от леток; 3 — отсосы от различных ковшей; 4 — электрофильтр; 5 — дымосос; 6 — дымовая труба)

чих в вагон-весы и скип и через трубы аспирационных систем достигает 1200 г/т чугуна, а запыленность воздуха в подбункерном помещении доходит до 500 мг/м³. Существенного сокращения выбросов можно добиться при переходе на транспортную подачу сырья, при герметизации узлов пересыпки и совершенствовании систем аспирации. Опыт показывает, что на печах объемом 2000 и 5000 м³ выбросы удастся сократить до 100 г/т чугуна. Очистку воздуха аспирационных систем чаще выполняют в скрубберах, эффективность которых достигает 90—95%. Выделение пыли и газов на литейном дворе происходит в основном вблизи леток, желобов и мест слива металла в ковши (рис. 22-3, б). Средняя концентрация пыли в воздухе вблизи желоба в период выпуска чугуна составляет 150—1500 мг/м³, размер частиц 15—20 мкм. Вы-

брос, поступающий в воздушный бассейн через фонари здания и аспирационную систему, составляет, кг/т: пыли 0,4—0,7; оксида углерода 0,7—1,0. Объем поступающего на очистку аспирационного воздуха литейного двора крупных печей достигает 1 млн. м³/ч. Очистку производят в сухих электрофилтрах.

Сокращение неорганизованных выбросов можно достичь, повышая газоплотность печи, арматуры и трубопроводов, совершенствуя конструкции укрытий желобов и леток, схему промышленной вентиляции.

Глава 23

ОЧИСТКА ГАЗОВ В СТАЛЕПЛАВИЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

1. Очистка отходящих газов мартеновских и двухванных печей

Характеристика запыленности отходящих газов

Основная доля вредных выбросов в атмосферу поступает с отходящими газами, которые состоят из продуктов сгорания топлива, газообразных продуктов реакций, протекающих в ванне, газовыделений из нагреваемой шихты и большого количества мелкодисперсной пыли.

Газовый тракт печи до газоочистки имеет достаточно большую протяженность и включает такие элементы, как вертикальные каналы печи, шлаковик, регенераторы, боров и котел-утилизатор. В связи с неплотностью стен газового тракта, который находится под разрежением, по тракту имеют место значительные подсосы. Это приводит к тому, что количество, состав, запыленность и температура газов перед газоочисткой существенно отличаются от начальных на выходе из печи. В среднем на 1 т стали считают величину выбросов газов равной 2800 м³ при температуре 290 °С. Температура газов снижается с 600—700 °С на выходе из печи до 250—300 °С перед газоочисткой.

Средний состав газов при подаче кислорода в факел, %: 10—15 CO₂, 16—17 H₂O, 6—7 O₂, остальное N₂. Запыленность газов изменяется по ходу плавки и резко возрастает с увеличением расхода кислорода при продувке ванны (рис. 23-1). Кроме того, на пылеобразование заметное влияние оказывают конструкция и число кислородных фурм, температура металла, скорость выгорания углерода и т. д.

В период завалки и прогрева шихты запыленность 1,5—3 г/м³. Пыль крупная, образованная в результате механического и термического разрушения железной руды, известняка и других материалов.

Основной вынос пыли происходит в период плавления, когда идет продувка ванны кислородом. Максимальной запыленности 50 г/м^3 соответствует середина периода продувки. Пыль возгонного происхождения. Цвет дыма — бурый. Ниже приведен усредненный дисперсный состав пыли:

Размер частиц, мкм	≤ 1	1—5	> 5
Содержание, %	60	34	6
Средний медианный размер d_{50} , мкм	0,2—0,4		
Основная часть	Оксиды железа		

В период доводки и последующей полировки, несмотря на продувку кислородом, запыленность составляет $4—8 \text{ г/м}^3$. Удельные выбросы пыли $5—8 \text{ кг/т}$ стали.

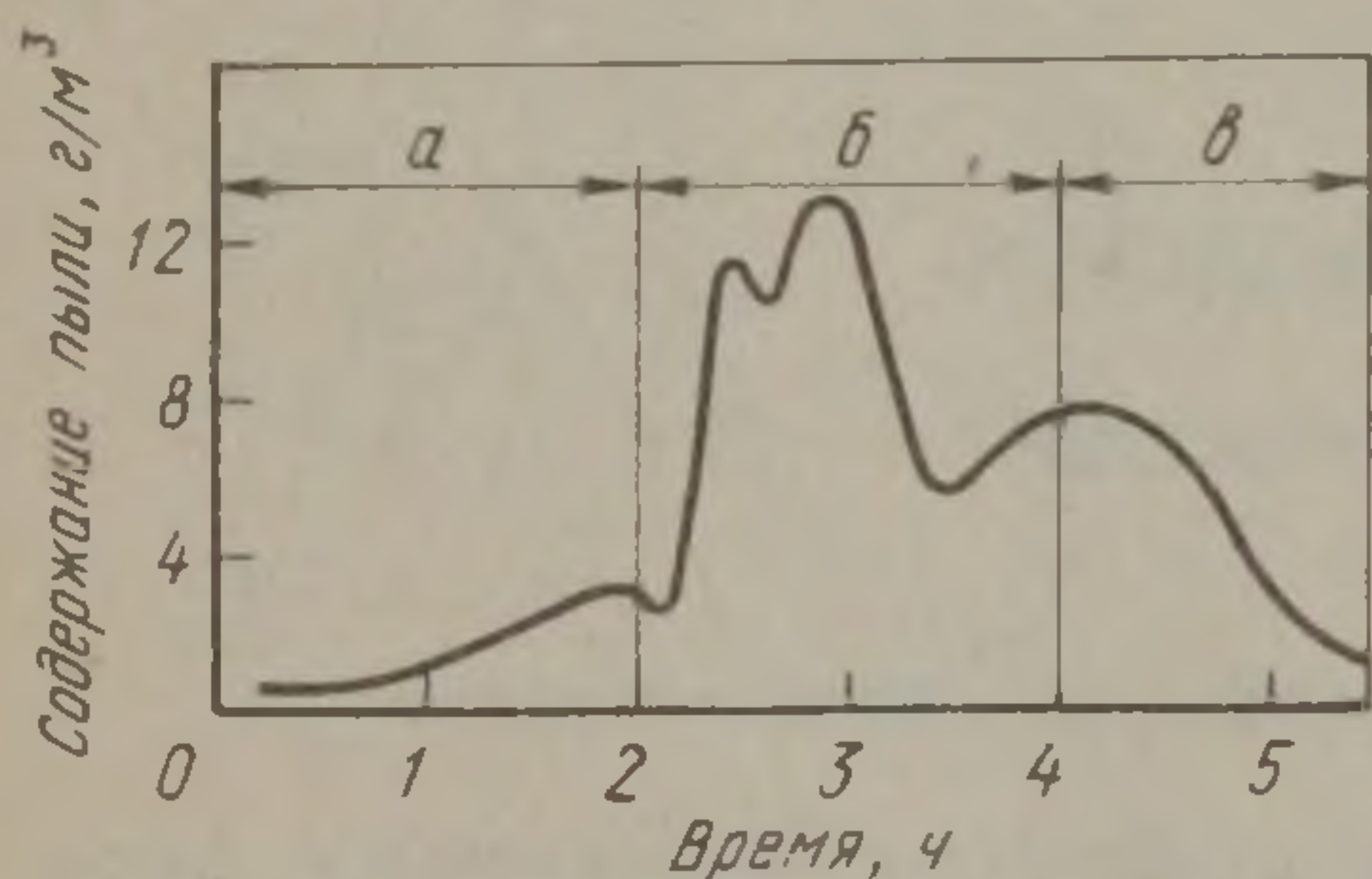


Рис. 23-1. Изменение запыленности мартеновских газов по периодам плавки:

а — завалка, прогрев; б — расплавление (подача кислорода); в — доводка

Запыленность газов и дисперсный состав пыли изменяются по тракту от печи до газоочистки. Больше половины всей массы пыли осаждаются в шлаковике и регенераторах.

На входе в газоочистку запыленность газов во время продувки кислородом составляет $3—6 \text{ г/м}^3$, а между продувками $0,4—0,7 \text{ г/м}^3$. Примерный химический состав пыли, соответствующий периоду

продувки, %: $92,7 \text{ Fe}_2\text{O}_3$; $0,9 \text{ Al}_2\text{O}_3$; $1,65 \text{ CaO}$; $0,9 \text{ MgO}$; $1,1 \text{ MnO}$; $0,8 \text{ SiO}_2$.

Удельное электросопротивление составляет $10^7—10^{10} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при температуре $20—300 \text{ }^\circ\text{C}$, т. е. пыль по УЭС относится ко второй группе пылей, которые хорошо улавливаются в электрофильтрах.

Среди других вредных примесей газы мартеновской плавки содержат $200—400 \text{ мг/м}^3$ оксидов азота и $30—50 \text{ мг/м}^3$ оксидов серы, выброс которых длится $10—30 \%$ времени плавки.

Схемы мартеновских газоочисток

Газы, отходящие от крупных печей, проходят охлаждение в котлах-утилизаторах типа КУ и очищаются от пыли перед выбросом в атмосферу в скрубберах Вентури или электрофильтрах (рис. 23-2). Газовый тракт печи при этом является ступенью грубой очистки.

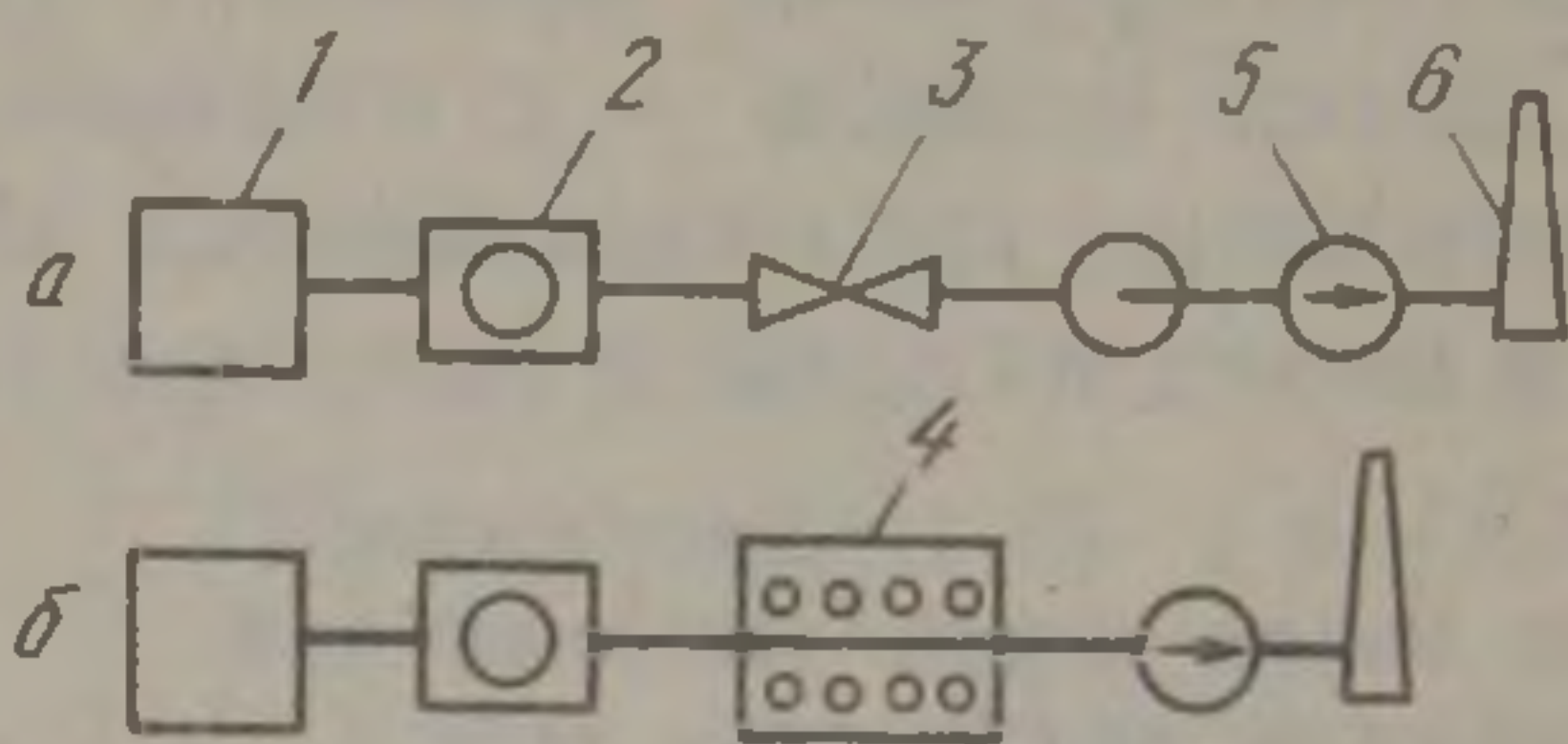
В схемах с мокрой очисткой устанавливают блоки высоконапорных труб Вентури цилиндрического или прямоугольного сечения с регулируемым сечением горловины. Плотность орошения поддерживается на уровне $1,0—1,3 \text{ л/м}^3$, перепад давления обеспечивает скорость газа в горловине $100—120 \text{ м/с}$. Выбрасываемые в атмосферу газы содержат не более 100 кг/м^3 пыли, что, как пра-

вило, обеспечивает концентрацию ее в приземном слое не выше ПДК.

В схемах сухой очистки в электрофилтрах УГ достигается высокая степень очистки газов — 98—99 %. Отсутствие специального цикла оборотного водоснабжения, меньшие удельные

Рис. 23-2. Принципиальные схемы мокрой (а) и сухой (б) очистки мартеновских газов.

1 — печь; 2 — котел-утилизатор; 3 — скруббер Вентури; 4 — электрофилтр; 5 — дымосос; 6 — дымовая труба



энергозатраты на очистку, невысокие эксплуатационные расходы — делают схему сухой электроочистки более предпочтительной по сравнению с мокрой.

Газоочистка двухванных печей

Количество отходящих газов двухванных сталеплавильных агрегатов на 1 т выплавляемой стали примерно соответствует количеству отходящих газов мартеновского производства. В связи с более высокой интенсивностью продувки кислородом содержание пыли в газах двухванных агрегатов несколько больше, чем в отходящих газах мартеновских печей. Присосы по тракту увеличивают количество газов в четыре раза. Это обусловлено тем, что в связи с отсутствием регенераторов, газы двухванной печи после шлаковика при температуре 1400—1500 °С в начале охлаждаются подачей воды до 900—1000 °С, а затем в борове подсосом через специальные люки холодного воздуха — до 700 °С. Мало отличаются как химический, так и дисперсный состав пыли, в которой частиц фракции до 3 мкм более 70 %.

В связи с этим схемы газовых трактов двухванных печей, как и мартеновских, выполняют со скрубберами Вентури или электрофилтрами типа УГ или ЭГ.

На некоторых заводах охлаждение газов с 700 до 200—250 °С для подачи в электрофилтр производится в испарительных форсуночных скрубберах. Запыленность газов перед скруббером или котлом-утилизатором 7—8 г/м³, после очистки на выходе из трубы 90—100 мг/м³.

2. Очистка конвертерных газов

Характеристика запыленности отходящих газов

Состав и количество отходящих газов зависят от способа отвода (с дожиганием или без дожигания) и конструкции охладителя газов.

Удельный расход газов для различного состава шихты и флюсов находится в пределах 70—90 м³/т стали. В зависимости от ин-

тенсивности продувки кислородом удельные выбросы составляют от 13 до 25 кг/т при подаче руды, а при подаче руды и лома 21—32 кг/т.

Дисперсный состав пыли также зависит от интенсивности продувки. При увеличении подачи кислорода от 3 до 6 м³/(т·мин) количество крупной фракции увеличивается вдвое.

Способ отвода — с полным дожиганием или без дожигания — практически не сказывается на составе пыли. Дисперсный состав пыли перед входом в газоочистку дан в табл. 23-1 (по данным института ВНИПИЧерметэнергоочистка).

Таблица 23-1. Дисперсный состав пыли перед газоочисткой при полном дожигании газа

Период продувки, мин	Содержание фракций, мкм. % (по массе)			
	0-3	3-60	60-250	>250
1-5	60	15	15	10
8-14	82	3	5	10
18-22	86	5,5	5	3,5

Плотность пыли около 4,0 г/см³. Основная масса пыли перед газоочисткой при полном дожигании состоит из Fe₂O₃, а при частичном дожигании — из FeO. Средняя концентрация пыли в конвертерных газах составляет 150—350 г/м³.

При любом способе отвода и охлаждения газов газоочистка должна обеспечить очистку настолько, чтобы при выбросе газов

в атмосферу в приземном слое концентрация пыли не превышала санитарную норму.

Содержание СО в отходящих газах при отводе их по схеме с полным дожиганием не превышает 5 %, при отводе по схеме без дожигания — более 85 %.

Из-за высокой вероятности образования взрывоопасных концентраций газа около 80 % всех кислородно-конвертерных цехов оборудованы схемами мокрой газоочистки.

Схемы мокрой газоочистки

Основными аппаратами схем мокрой газоочистки являются скрубберы-охладители, скрубберы Вентури с различного рода сепараторами капель и мокрые электрофильтры (рис. 23-3).

Первой ступенью газоочистки мокрого или сухого типа, как правило, является скрубберный охладитель — полый цилиндр с бункером внизу и форсунками по высоте. Они широко применяются при температуре газов перед аппаратом 600—700 °С, а в некоторых случаях и 1200—1400 °С. В процессе охлаждения газов одновременно идет и осаждение пыли крупной фракции.

В зависимости от количества воды, идущей на охлаждение, скрубберы делятся на водяные и испарительные. Водяные скрубберы выполняются по противоточной и прямоточной схеме. Роль прямоточного скруббера иногда играет наклонная часть газоотводящего тракта, в верхней части которого производится подача воды. Газ и вода движутся в одном направлении. Температура

воды в такого рода скрубберах всегда ниже температуры газов. Интенсивность орошения до $5-8 \text{ кг/м}^3$, скорость газов $12-20 \text{ м/с}$, температура газов на выходе до $60-80 \text{ }^\circ\text{C}$.

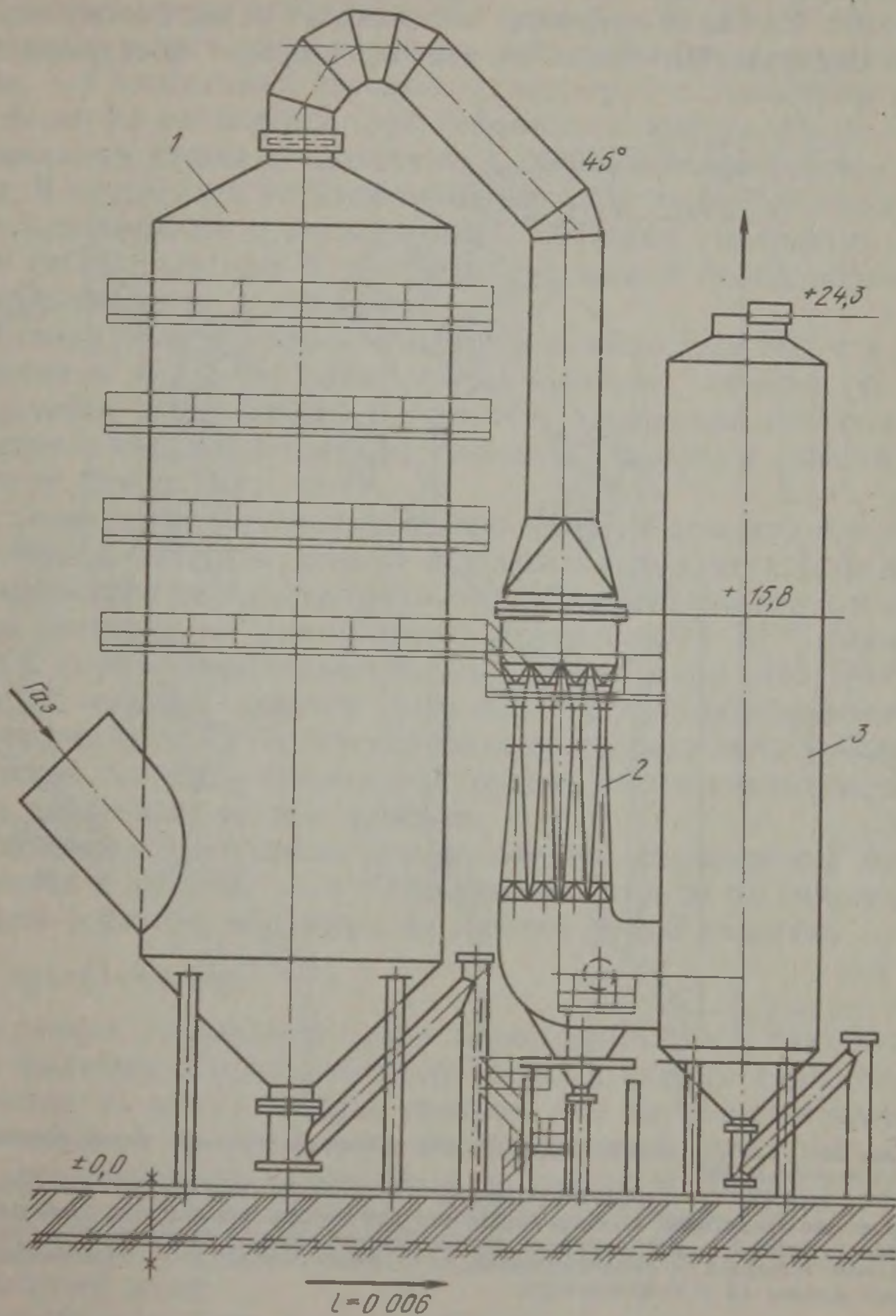


Рис. 23-3. Схема мокрой очистки конвертерных газов:
 1 — скруббер-охладитель, 2 — блок труб Вентури, 3 — прямоточный
 циклон-каплеуловитель

В противоточных вертикальных цилиндрических скрубберах скорость газов принимают $1,5-2 \text{ м/с}$. В зависимости от температуры газа на входе скруббер может быть футерован или нет. Например, газы после радиационного котла-охладителя могут поступать при температуре $1100-1300 \text{ }^\circ\text{C}$, а это требует защиты металла футеровкой.

Плотность орошения в водяных скрубберах достигает 15—20 кг/м³. В испарительных скрубберах количество подаваемой воды таково, что вся вода испаряется, охлаждая тем самым газ до 70—250 °С. Такие аппараты часто ставят перед высоконапорной трубой Вентури (80—100 кПа) или перед сухим электрофильтром.

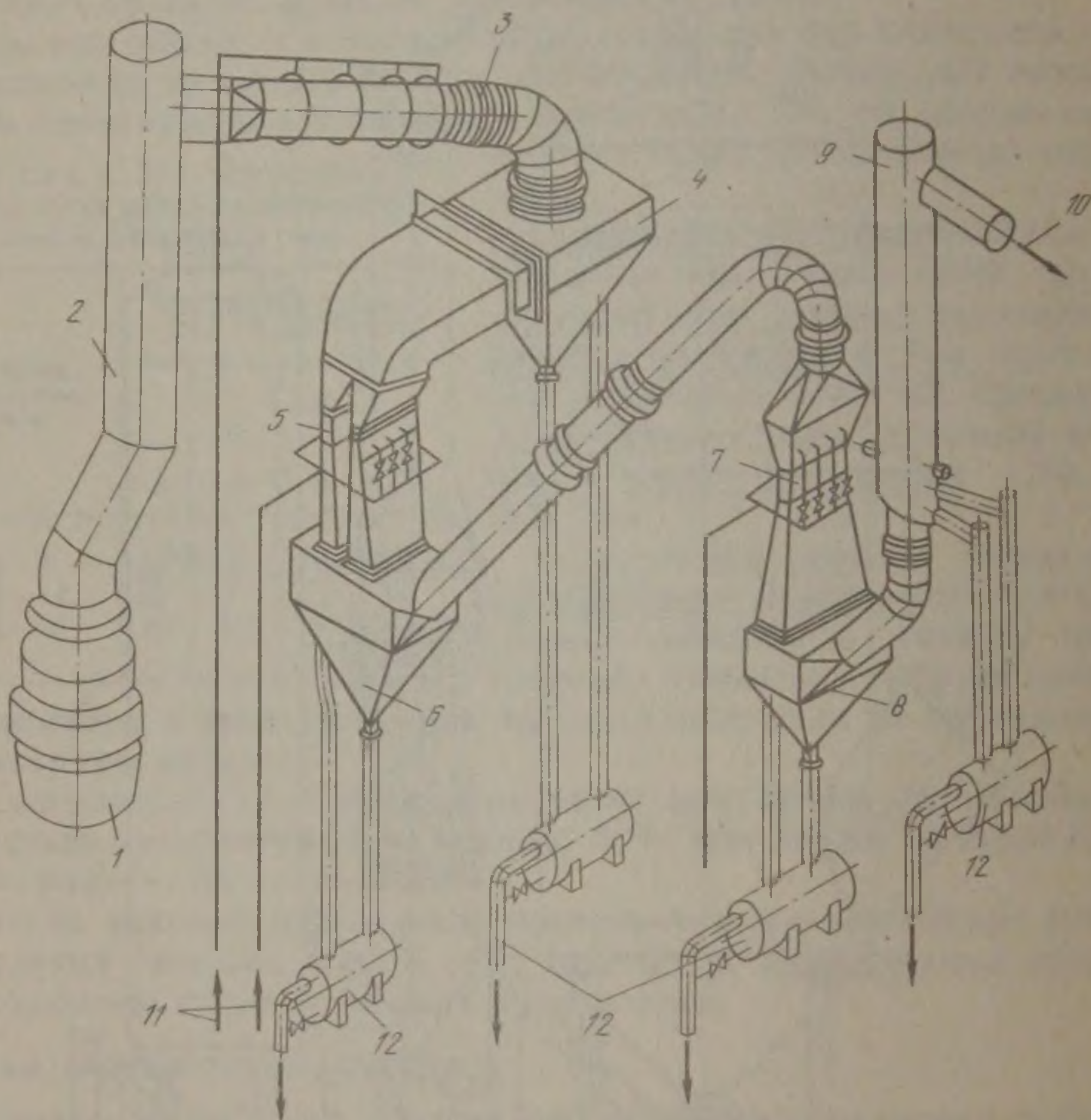


Рис. 23-4. Схема газоотводящего тракта с мокрой очисткой газов конвертеров емкостью 300 т:

1 — конвертер; 2 — котел-охладитель; 3 — орошаемый газоход; 4 — бункер орошаемого газохода; 5 — две трубы Вентури первой ступени; 6 — бункер первой ступени; 7 — регулируемая труба Вентури второй ступени; 8 — бункер второй ступени; 9 — каплеуловитель; 10 — к эксгаустеру; 11 — вода из оборотного цикла; 12 — гидрозатворы

В скрубберах Вентури с небольшим сопротивлением (~4 кПа) в результате адиабатного расширения в конфузоре капли испаряются, при этом происходит быстрое пересыщение водяного пара, а затем в горловине и диффузоре трубы — медленная конденсация. Пар конденсируется на частицах пыли, ускоряя их коагуляцию. Наибольший эффект пылеулавливания достигается в тех случаях, когда на выходе из трубы Вентури температура газов близка к точке росы (70 °С). На таком принципе работает газоочи-

стка типа Соливор (фирмы «Ирсид—Кафл»). Расчетная скорость в горловине труб около 40 м/с. При отклонении от расчетного режима эффект конденсации снижается.

Высоконапорные скрубберы Вентури (8—15 кПа) в конвертерных схемах имеют разнообразные конструктивные решения. От батареи из нескольких десятков малых труб с диаметром горловины 90 мм до одиночных труб большого диаметра. По условиям обслуживания схемы с одиночными трубами более удобны и надежны. В системах с регулируемым отводом газов без дожигания трубы выполняются с регулируемым сечением горловины. Независимо от расхода газа в таких трубах можно поддерживать постоянную скорость в горловине.

В схемах очистки газов конвертеров емкостью 300 т и выше применяются прямоугольные трубы Вентури, сечение которых регулируется подвижными створками. Орошение пленочное по периметру с подачей воды в переливные карманы и форсуночные по центру трубы (рис. 23-4).

В схемах мокрой газоочистки при отводе с дожиганием иногда применяют в качестве второй ступени мокрые электрофилтры. Предварительно перед электрофилтром газ охлаждается в скруббере до температуры полного насыщения влагой 70 °С. Электрофилтр с трубчатыми осадительными электродами (449 труб диаметром 245 мм) при скорости газов около 2,5 м/с обеспечивает степень очистки до 99,5 %. Электрофилтры такого типа нуждаются в надежной системе обмывки электродов во избежание наростов пыли и связанных с этим пробоев.

Необходимость создания систем очистки сточных вод мокрых газоочисток и высокие эксплуатационные затраты на очистку стимулируют создание надежных аппаратов сухой очистки.

Схемы сухой очистки

В этих схемах используют сухие электрофилтры и тканевые рукавные филтры. Сухие электрофилтры в схемах конвертерных газоочисток на отечественных заводах еще не применяются. Однако в мировой практике есть положительный опыт (рис. 23-5). Сухие электрофилтры применяют не только в схемах с полным дожиганием, но и в схемах с частичным дожиганием ($\alpha = 0,3$) или без дожигания. Перед подачей в электрофилтр газ кондиционируют подачей воды.

Взрывобезопасность системы обусловлена рядом конструктивных особенностей электрофилтра. Корпус цилиндрического сечения диаметром 9,7 м без пылевых бункеров, что предотвращает образование застойных зон. Пыль удаляется конвейером периодически, между кислородными продувками. Снаружи филтр покрыт теплоизоляцией, что обеспечивает стабильность температуры газов (около 200 °С). Корпус рассчитан на возможные взрывы газовой смеси с резким возрастанием давления (около 200 кПа). Опыт промышленной эксплуатации показал, что такого уровня давле-

ния во время хлопков не достигается. Кроме того, на крышках корпуса предусматриваются предохранительные клапана на 2 кПа.

Три электрических поля состоят из 30 рядов С-образных осадительных и игольчатых коронирующих электродов. Скорость газов в аппарате 1,5 м/с, напряжение 45—60 кВ при плотности тока 0,3—0,5 мА/м². При входной запыленности до 100 г/м³ степень очистки — 99,9 %.

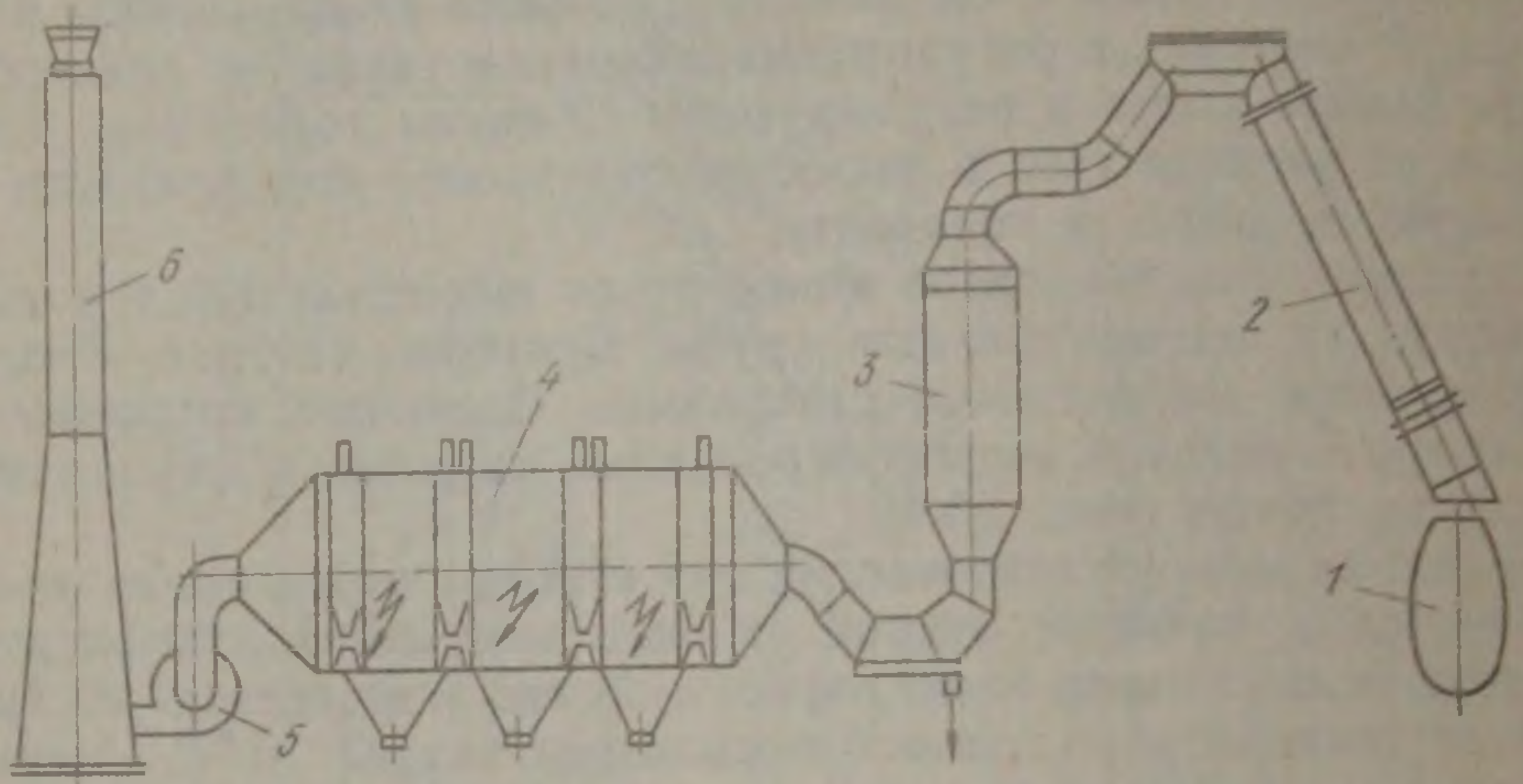


Рис. 23-5. Схема очистки конвертерных газов в сухом электрофилтре:

1 — конвертер; 2 — котел-охладитель; 3 — скруббер; 4 — электрофилтр; 5 — дымосос; 6 — свеча с дожигающим устройством

В табл. 23-2 приведены сравнительные результаты эксплуатационных показателей мокрой и сухой очистки в электрофилтре.

Срок окупаемости капитальных затрат на сухую очистку — 1—2 года.

Т а б л и ц а 23-2. Показатели мокрой и сухой очистки (вторая ступень) конвертерных газов¹

Параметры	Показатели очистки	
	в сухом электрофилтре	в скруббере Вентури
Потребление электроэнергии в течение плавки, кВт·ч	179	1158
В том числе:		
дымососами	66	998
насосами	20	93
электрофилтром	93	—
установкой очистки сточных вод	—	67
Расход воды в течение плавки, м ³ :		
на испарение	15	19
со шламом и на продувку	—	20
Потери давления, кПа	1,5	18

¹ Емкость конвертера 200 т, продолжительность плавки 40 мин продолжительность продувки кислородом 16 мин, расход газов 130×10^6 м³/ч.

Для очистки конвертерных газов начинают применять тканевые рукавные фильтры. Интерес к ним возник в связи с получением тканей требуемых свойств. В одном из фильтров материал ткани «тергаль» обеспечивает остаточную запыленность до 20 мг/м^3 (за 50-т конвертером) при температуре до 145°C . Система регенерации — встряхиванием.

К недостаткам рукавных фильтров относятся большие габариты, связанные с низкой удельной нагрузкой на ткань, и повышенный расход электроэнергии на 1 т стали.

3. Очистка газов электросталеплавильных печей

Количество и состав газов, образующихся в процессе плавки в дуговых печах, зависят от состава шихты и количества подаваемого интенсификатора — кислорода. В отходящих газах содержится, %: $15\text{—}25 \text{ CO}$; $5\text{—}11 \text{ CO}_2$; $0,5\text{—}3,5 \text{ H}_2$; $3,5\text{—}10 \text{ O}_2$.

Отходящие газы дуговых электропечей отводятся одним из трех способов: от четвертого отверстия в своде (три отверстия для электродов), через арку рабочего окна или от зонта, расположенного над печью.

Удельный выход газов при отсосе через четвертое отверстие в своде составляет $80\text{—}110 \text{ м}^3/\text{т}$, а при отводе под зонт — $350\text{—}450 \text{ м}^3/\text{т}$.

В зависимости от способа отвода в газоотводящий тракт печи подсасывается различное количество воздуха, что сказывается на составе и концентрации пыли в газе.

Устранить подсосы полностью невозможно, так как в связи с подъемом и поворотом свода и наклоном ванны, герметичность газового тракта нарушается. Кроме того, подсос воздуха необходим для дожигания CO.

Средняя концентрация пыли в газах составляет $15\text{—}30 \text{ г/м}^3$, а удельный вынос $6,5\text{—}9,5 \text{ кг/т}$ стали. Причем, меньшие значения соответствуют печам емкостью 100 т, большие — печи емкостью 5 т. Период максимального пыле-

выделения длится около 30 мин. Основная масса пыли (до 70 %) имеет размер частиц до 3 мкм и состоит из оксидов железа (60—80 %).

Дисперсный состав по периодам плавки изменяется мало. Пример дисперсного состава пыли при плавке хромистых и среднеуглеродистых сплавов дан в табл. 23-3.

Для пыли электросталеплавильных печей характерно высокое УЭС — до $10^{11} \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

Т а б л и ц а 23-3. Дисперсный состав пыли по периодам плавки

Период плавки	Количество частиц, % (по массе), по фракциям, мм			
	0,0—0,7	0,7—7,0	7,0—80,0	> 80,0
Расплав- ление	47,9	29,9	15,5	6,7
Продувка	42,2	35,5	15,7	6,6
Доводка	44,5	30,6	13,5	11,4

Кроме оксидов углерода в составе отходящих газов содержатся оксиды азота — до 300 г/т стали.

В связи с большой величиной подсосов по газовому тракту и под зонт, требуется увеличивать размеры газоочистки, мощность дымососов и т. д. Поэтому одной из наиболее важных задач является задача сокращения объема газов, идущих на очистку. Для этого разрабатываются узлы уплотнения электродных зазоров и рабочих окон.

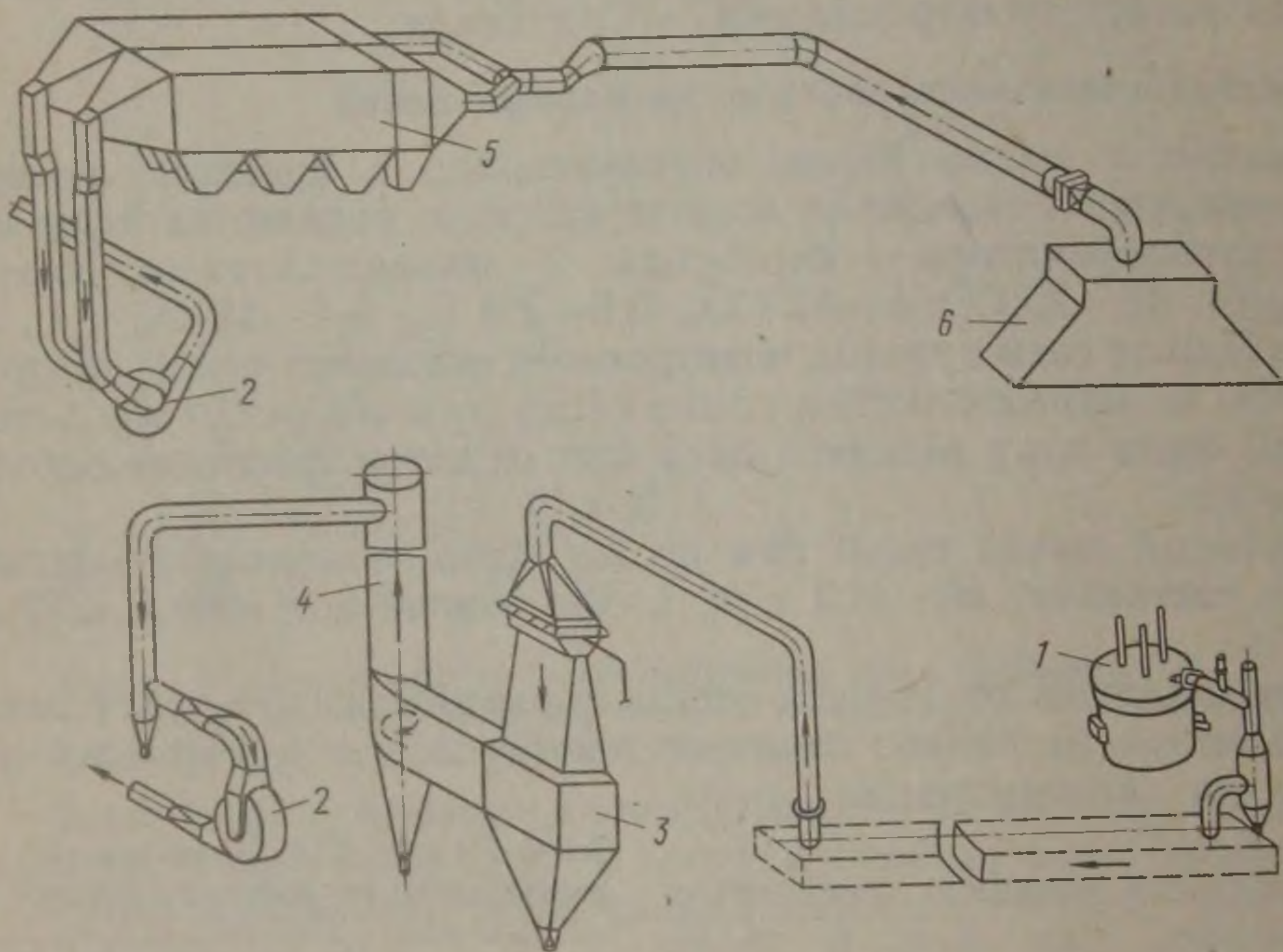


Рис. 23-6. Схема очистки газов дуговой сталеплавильной печи:
1 — печь; 2 — дымосос; 3 — труба Вентури; 4 — каплеуловитель; 5 — рукавный фильтр; 6 — зонт

В большинстве случаев схема газоочистки дуговых электропечей состоит из ступени предварительного охлаждения газов и последующей тонкой очистки в скруббере Вентури (рис. 23-6).

Сухая очистка в электрофильтрах не получила здесь распространения. Причина в небольших расходах и трудности улавливания высокоомной пыли. Однако, опыт установки электрофильтра за крупной (200 т) дуговой сталеплавильной печью, показал рентабельность их применения на печах большой емкости.

Хорошие результаты дает вариант с комбинированной схемой газоочистки. Газы от печи (от четвертого отверстия) после охлаждения в скруббере подаются вентилятором на группу высоконапорных труб Вентури с центробежным сепаратором. Разбавленные газы, поступающие под зонт над печью, очищаются в тканевом рукавном фильтре.

В электросталеплавильном производстве газоочистка размещается в отдельном помещении, что дает возможность сократить число резервных аппаратов.

ОЧИСТКА ГАЗОВ ПЕЧЕЙ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Очистке газов и, в частности, пылеулавливанию, в цветной металлургии отводится важная роль. На заводах цветной металлургии в таких процессах, как обжиг, агломерация, шахтная плавка, конвертирование, рафинирование, процесс сопровождается образованием значительного количества запыленных газов. Стоимость компонентов, содержащихся в пыли и газе, в 3—4 раза превышает затраты на улавливание и поэтому делает экономически целесообразным сооружение дорогих, но высокоэффективных газоочисток.

Система очистки газов, отходящих от технологических агрегатов, обычно состоит из двух ступеней очистки: грубой и тонкой. Как правило, очистке газов предшествует охлаждение в поверхностных охладителях, котлах-утилизаторах или в орошаемых водой аппаратах, которые также выполняют функцию пылеуловителей крупных частиц.

Все аппараты газоочистки в производстве цветных металлов по принципу действия не отличаются от применяемых в черной металлургии и других отраслях промышленности, однако имеют ряд особенностей конструктивного выполнения.

В качестве ступени грубой очистки используют инерционные пылеуловители, скрубберы и циклоны. Для тонкой очистки — скрубберы Вентури, мокрые и сухие электрофильтры, рукавные фильтры.

При переработке сульфидных руд иногда в отходящих газах содержание сернистых соединений доходит до 4 % (объемн.) и более. Тогда такие газы после дополнительной очистки в электрофильтрах подаются на сернокислотное производство. При этом себестоимость серной кислоты оказывается на 30 % ниже, чем при получении традиционным способом из пирита. Известно, что технология производства того или иного металла зависит от состава сырья. При этом существенно различаются и схемы газоочистки. Примерами такого различия являются производства никеля и меди из окисленных и сульфидных руд.

Рассмотрим основные особенности схем очистки газов в производстве ряда тяжелых цветных металлов.

1. Пылеулавливание в производстве свинца, цинка и олова

Свинцовое производство

В свинцовом производстве очистке подвергаются отходящие газы печей обжига, спекания, шахтных печей, конвертеров и т. д.

В процессе спекания шихты в пыль переходит до 2 % свинца. На агломашинах с дутьем сверху отходящие газы содержат 0,5—

1,5 % SO_2 , имеют температуру 130—180 °С и запыленность 1,5—2,5 г/м³. Пыль возгонного происхождения, средний размер частиц 0,5—1 мкм. Перед выбросом в атмосферу газы проходят грубую очистку от пыли в циклонах, охлаждаются и увлажняются в полом скруббере и очищаются в сухих электрофильтрах или рукавных фильтрах (рис. 24-1) до санитарных норм (до 100 мг/м³).

На агломашинах с дутьем снизу образуются так называемые богатые (5—6 % SO_2) и бедные (1,5—2 % SO_2) газы. Богатые газы после очистки от пыли направляются в сернокислотное производ-

ство, где проходят дополнительную очистку от тумана серной кислоты.

В схемах с очисткой бедных газов в рукавных фильтрах температура газов предварительно снижается организованным подсосом воздуха до 110—170 °С. Скорость фильтрации в них не превышает 1 м/мин. Скорость газов в электрофильтрах также невелика и находится обычно в пределах 0,2—0,7 м/с.

В процессе плавки в шахтных печах в пыль переходит от 0,5 до 2 % выплавляемого

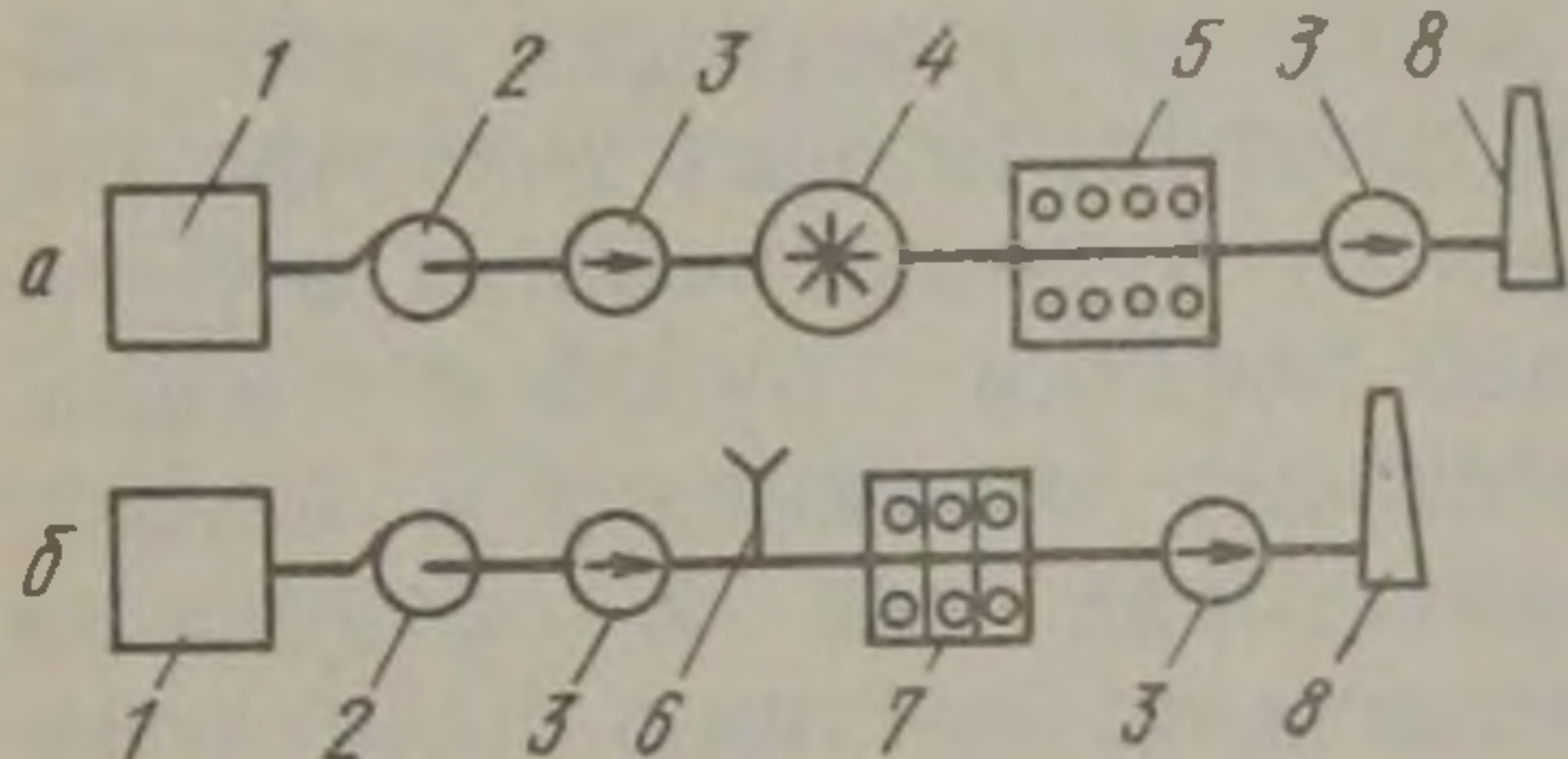


Рис. 24-1. Принципиальная схема очистки газов спекательных машин свинцового производства:

а — очистка в электрофильтре; б — очистка в рукавном фильтре.
1 — печь, 2 — циклон, 3 — дымосос, 4 — скруббер, 5 — электрофильтр, 6 — подсос воздуха, 7 — рукавный фильтр, 8 — дымовая труба

свинца или до 1% перерабатываемой шихты. Отходящие газы имеют температуру 200—300 °С, запыленность до 20 г/м³. Средний размер частиц 0,6—0,8 мкм. Удельное сопротивление пыли $\sim 10^{11}$ Ом·см. Газы выбрасываются в атмосферу.

Схемы очистки могут быть основаны как на сухом, так и на мокром принципе, так как низкое содержание SO_2 в газах не вызывает опасности сернокислотной коррозии.

Наибольшее распространение имеет схема, состоящая из циклона, полого испарительного скруббера и рукавного фильтра. После очистки от крупной фракции пыли в циклоне газ охлаждается до 100—110 °С в скруббере. После рукавного фильтра концентрация пыли не превышает 20—40 мг/м³.

Мокрая схема основана на применении скруббера Вентури. Концентрация пыли на выходе 100—200 мг/м³ (рис. 24-2).

Значительными выбросами в атмосферу отличаются шлаковозгоночные установки (ШВУ). В них перерабатываются шлаки с целью извлечения из них олова, свинца и цинка. Обычно ШВУ состоит из отражательной печи для расплавления холодных шлаков, электрокопильника для их перегрева, фьюминговой печи и электроотстойника штейна. Газы от всех агрегатов при температуре 1200 °С, содержащие возгоны металлов и оксиды серы, собираются в сборном коллекторе и подаются в котел-утилизатор.

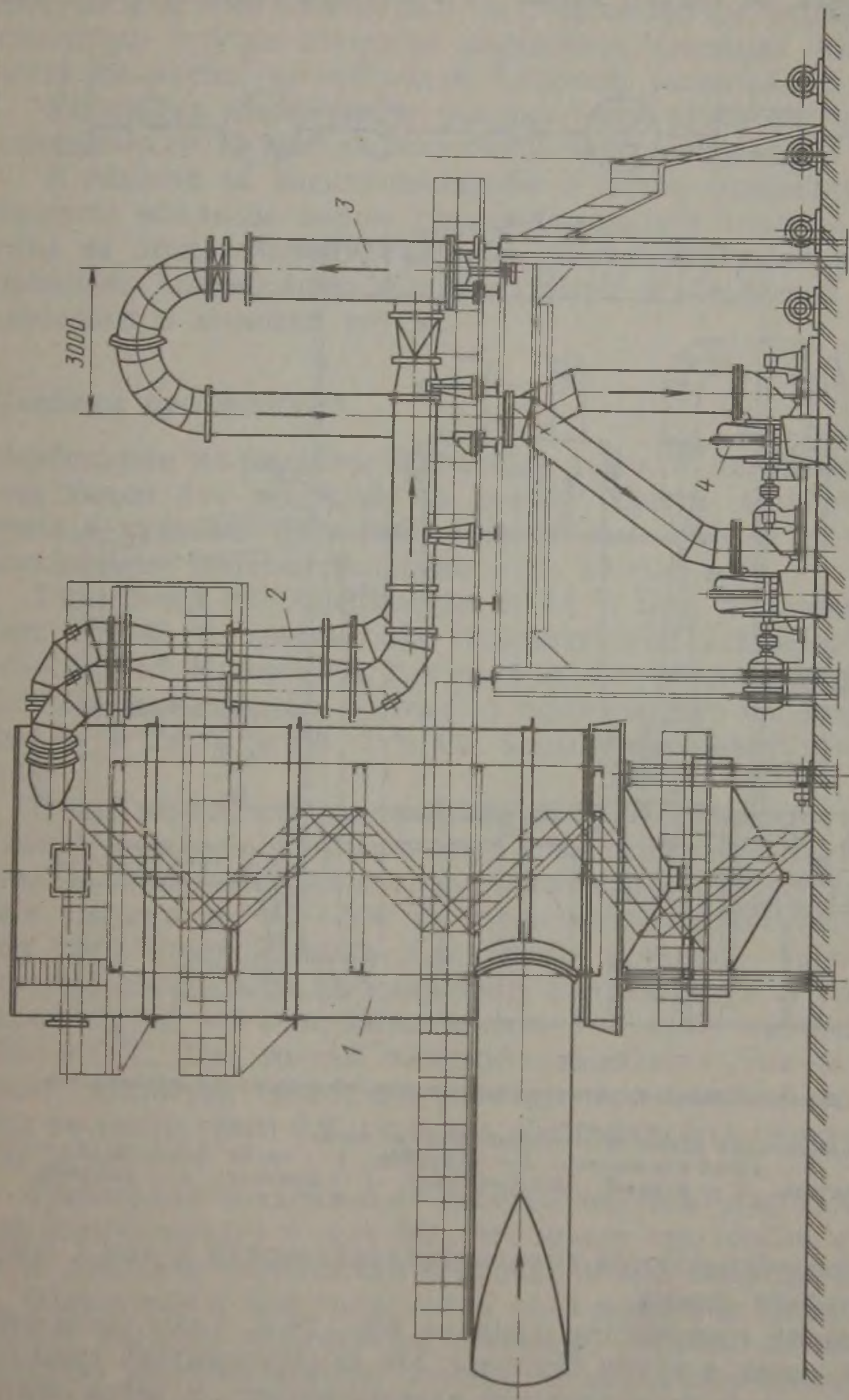


Рис. 24-2. Схема мокрой очистки газов шахтной печи:
 1 — скруббер; 2 — труба Вентури; 3 — каплеуловитель; 4 — эксгаустер

После охлаждения в котле до 230—250 °С, газы с концентрацией пыли 20—40 г/м³ поступают в отделение газоочистки.

Газы ШВУ подвергаются сухой или мокрой очистке. В рукавных фильтрах очищают газы до 20—40 мг/м³. Мокрая очистка позволяет уловить не только пыль, но и оксиды серы. Уловленные

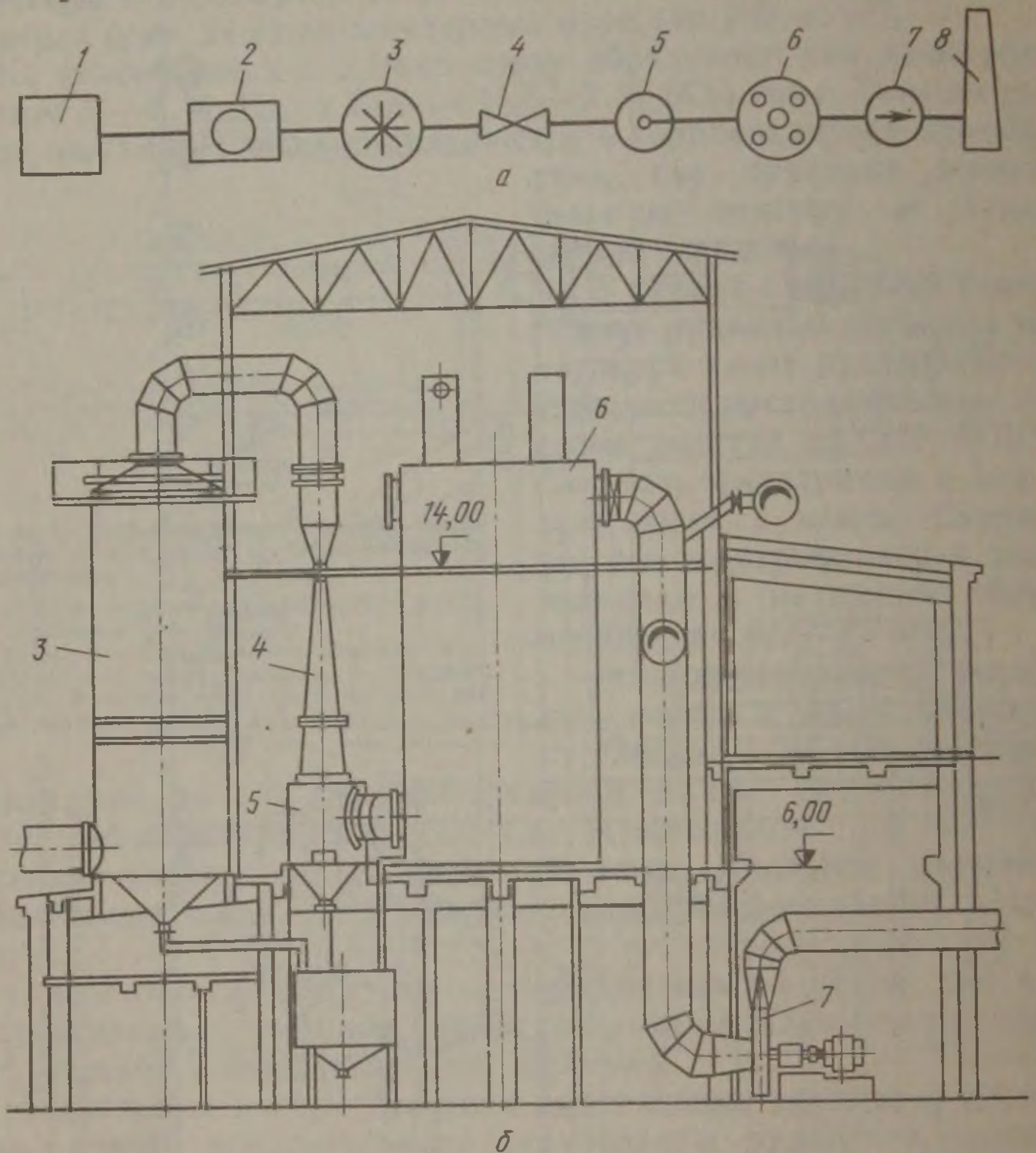


Рис. 24-3. Принципиальная схема и компоновка оборудования газоочистки ШВУ:

a — принципиальная схема, *б* — компоновка в цехе,
 1 — ШВУ; 2 — котел-утилизатор; 3 — скруббер; 4 — труба Вентури; 5 — каплеуловитель; 6 — мокрый электрофильтр; 7 — дымосос; 8 — дымовая труба

возгоны перерабатываются гидрометаллургическим путем с получением сульфата цинка.

Схема такой газоочистки дана на рис. 24-3. Газы поступают в скруббер, затем в трубу Вентури. Из каплеуловителя газы поступают в мокрый вертикальный электрофильтр, а затем вентилятором выбрасываются в атмосферу.

Скруббер с помощью двух рядов эвольвентных форсунок орошается обратным раствором. Труба Вентури имеет диаметр гор-

ловины 470 мм, впрыск раствора через центральную форсунку. Скорость газов в горловине до 90 м/с, удельный расход жидкости 0,5—0,7 л/м³. Электрофильтр выполнен для работы в агрессивных средах. Electroды из свинца. Осадительные — свободно подвешенные пластины толщиной 3 мм с шагом 260 мм, коронирующие — свинцовые прутки сечением «звездочка». Осевшая пыль периодически смывается чистой водой. Скорость газов около 1 м/с.

Установка обеспечивает очистку газов шлаковозгонки с запыленностью до 12 г/м³ до остаточной запыленности 35—45 мг/м³.

В газоход за электрофильтром в поток очищенного и насыщенного водяным паром газа добавляются горячие отходящие газы из отопительной котельной. Такая подсушка газов предупреждает конденсацию водяного пара и коррозию дымососов, газоходов и дымовой трубы.

Цинковое производство

Наибольшее количество отходящих газов в цинковом производстве имеют два передела: за печами обжига цинкового концентрата в кипящем слое (КС) — до 20 тыс. м³/ч, и за трубчатыми вельцпечами переработки кека — до 10 тыс. м³/ч.

Газы печей КС содержат до 9—14 % SO₂, а пылевынос достигает 30—40 % шихты, что соответствует концентрации пыли 60—130 г/м³. Кроме того, газ имеет высокую температуру (~850—900 °С). Пыль ценная, состоит из обожженного продукта и содержит 40 % Zn, 4 % Pb, 2 % Cu. Газы проходят ступенчатую очистку.

После первой ступени очистки от грубой пыли в инерционной камере, которую устанавливают в непосредственной близости от печи, газ охлаждается в котле-утилизаторе или в воздухоохлаждаемых стояках до 400—500 °С. Здесь также осаждаются значительная часть крупной пыли. Следующая ступень — циклоны. Дисперсный состав пыли за циклонами характеризуется средним размером частиц ~3 мкм, запыленность 3—6 г/м³, температура газов 350—400 °С. Для тонкой очистки применяют сухие пластинчатые электрофильтры, способные работать при высокой температуре. При скорости газов 0,6 м/с в них обеспечивается очистка до 100—150 мг/м³.

Требования поддержания высокой температуры вызваны высокой концентрацией в газе SO₂, что может при снижении температуры повысить вероятность сернокислотной коррозии.

Очищенные в электрофильтре газы подаются на производство серной кислоты контактным способом. В этом отделении газы проходят дополнительную очистку от пыли, соединений мышьяка (As₂O₃) и селена (SeO₂), которая заключается в промывке газов серной кислотой в полых и насадочных скрубберах и очистке в мокрых трубчатых электрофильтрах (две ступени). Такие схемы работают надежно, с высокой эффективностью. За второй ступенью

электрофильтров газы содержат следы соединений мышьяка и селена и до 5 мг/м^3 тумана H_2SO_4 .

Газы вальцпечей бедные по содержанию SO_2 после очистки от пыли выбрасываются в атмосферу. Температура газов на выходе из пылевой камеры печи $500\text{—}700^\circ\text{C}$, содержание пыли 100 г/м^3 , средний размер частиц $\sim 1,5 \text{ мкм}$. Уловленная пыль возвращается в производство, так как содержит $60\text{—}70\%$ Zn . Повышенное удельное электросопротивление пыли создает затруднения для надежной работы сухих электрофильтров. В связи с этим типовая схема газоочистки состоит из поверхностного охладителя (кулера), совмещающего функцию аппарата грубой очистки, и рукавного фильтра. При газовой нагрузке $0,8\text{—}1 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$ рукавный фильтр очищает газ до конечной концентрации пыли 40 мг/м^3 . Защита ткани от высокой температуры газов осуществляется организованным подсосом воздуха перед фильтром.

Производство олова

Обжиговое, плавильное и рафинировочное отделения выбрасывают в атмосферу большое количество газов, которые проходят тонкую очистку от пыли. Содержание олова в пыли достигает от 20 до 60% . Высокой летучестью обладают соединения олова SnS и SnCl_2 .

На выходе из плавильных печей газы имеют температуру $800\text{—}1000^\circ\text{C}$. Для снижения температуры, грубой очистки от пыли и увлажнения с целью снижения УЭС пыли газы подаются в полые испарительные скрубберы. Температура газов снижается до $150\text{—}200^\circ\text{C}$. В газах плавильных печей нет агрессивных примесей. За обжиговыми печами в газах содержится до $1,5\text{—}2\%$ SO_2 , в результате чего необходим контроль за коррозией элементов газового тракта.

Тонкая очистка производится в пластинчатых и трубчатых электрофильтрах или в тканевых рукавных фильтрах. Мокрая очистка в скрубберах Вентури для газов заводов по производству олова неприменима в связи с опасностью образования мышьяковистого водорода.

При скорости газов в электрофильтрах $0,4\text{—}0,6 \text{ м/с}$ достигается степень очистки до $98\text{—}99\%$ при входной запыленности $3\text{—}10 \text{ г/м}^3$.

Хорошие результаты при очистке газов рафинировочных котлов дают рукавные фильтры, в которых используется двойной лавсан.

2. Пылеулавливание в производстве меди и никеля

Переработка первичного медного сырья

Отходящие газы сушилок медного концентрата имеют температуру не выше 250°C и запыленность до 30 г/м^3 . Перед выбросом в атмосферу газы от каждой сушилки в количестве $20\text{—}25 \text{ тыс. м}^3/\text{ч}$ очищаются в циклонах и сухом горизонтальном электрофильтре.

Отходящие газы печей КС для обжига медных концентратов аналогично газам от печей для обжига цинковых и никелевых концентратов проходят очистку от пыли и подаются в сернокислотное производство. Газы после пылевой камеры при температуре 600—700 °С поступают в воздушные охладители или котел-утилизатор и в группу циклонов. В результате температура снижается до 250—300 °С и улавливается пыль крупной фракции, концентрация пыли с 800—900 г/м³ снижается до 10—30 г/м³. Тонкая очистка осуществляется в сухих горизонтальных электрофильтрах, где при скорости 0,5—0,6 м/с достигается концентрация пыли 100 мг/м³.

Газы шахтных, отражательных печей, печей кислородно-взвешенной плавки (КФП) и конвертеров поступают на утилизацию оксидов серы в сернокислотный цех. Принципиальная технологическая схема очистки газов от пыли в качестве ступени тонкой очистки включает сухие электрофильтры. Скорость газов в них не превышает 0,6—0,7 м/с, что обеспечивает высокую эффективность (98—99 %).

Перед тонкой очисткой газы проходят охлаждение с 300—500 °С за шахтными и отражательными печами и с 900—1200 °С за конвертерами и КФП до 250—300 °С в поверхностных охладителях (кулерах) и котлах-утилизаторах. Кроме того, газы увлажняются в испарительных скрубберах. Уловленная пыль содержит 10—20 % Cu, 10—20 % Pb.

Переработка вторичного медного сырья и медно-серные производства

Газы печей по переработке вторичного сырья практически нейтральны и после очистки от пыли выбрасываются в атмосферу. Перед очисткой они охлаждаются в поверхностных охладителях, котлах-утилизаторах или в испарительных скрубберах. Одновременно в них осаждается грубая пыль. Выносимая из агрегата пыль является ценным продуктом, она содержит, %: 60—65 Zn; 10—15 Pb; 0,5—1,0 Cu; до 10 Sn. Тонкая очистка с высокой эффективностью производится в рукавных фильтрах. Ткань фильтров защищается от повышенных температур регулируемым подсосом воздуха перед аппаратом. В мешочных фильтрах подсос достигает 60 % от расхода газа.

Электрофильтры на этих газах работают неустойчиво, так как в пыли в большом количестве содержатся оксиды цинка, повышающие электросопротивление слоя пыли на осадительных электродах и образование обратной короны.

Наличие высокодисперсных возгонов цинка повышает пожароопасность осевшей на ткани пыли. Для снижения количества металлического неокисленного цинка в газовом тракте организуется его дожигание.

На медно-серных заводах отходящие газы с высоким содержанием сернистых соединений очищаются от пыли в сухих электро-

фильтрах специальной конструкции. После каталитической очистки от серы и обработки в орошаемых известняковых поглотительных башнях газы выбрасываются в атмосферу. Газы шахтных печей содержат много крупной пыли. При начальной запыленности до 90 г/м^3 около 60 % частиц крупностью 60 мкм и выше осаждаются в первой ступени — инерционных камерах. Вертикальные пластинчатые электрофильтры защищены от агрессивного действия паров элементарной серы — стены камеры кирпичные, электроды из высокохромистой стали.

Очистка газов никелевых заводов

Отходящие газы при переработке никелевых руд, как правило, не содержат возгонов металлов и поэтому частицы пыли относительно крупные, не менее 40 мкм. Такие частицы легко улавливаются в батарейных циклонах.

В качестве основного пылеулавливающего аппарата батарейные циклоны применяются в газовых трактах спекательных машин и шахтных печей. Несмотря на большие выбросы, утилизация пыли (содержание Ni до 2 %) и газов (содержание SO_2 до 2 %) не производится.

Однако отходящие газы руднотермических печей при переработке сульфидных руд, конвертеров при продувке штейнов и особенно печей КС для обжига никелевого фанштейна, содержат ценные компоненты.

Газы руднотермических печей, содержащие 6—12 % SO_2 и конвертеров, в которых содержание SO_2 доходит до 5 %, проходят обеспыливание в сухих электрофильтрах и используются в сернокислотном производстве. Пыль, содержащая до 12—18 % Ni и 12—15 % Cu, из бункеров электрофильтров возвращается в технологический процесс.

Газы печей КС практически нейтральны, запыленность 50—60 г/м^3 при среднем размере частиц 1—5 мкм, содержание никеля в пыли достигает 60—70 %. Это требует высокоэффективных пылеулавливающих аппаратов.

Для осаждения крупных фракций за печами КС устанавливают пылевые камеры и циклоны. Перед входом в электрофильтр концентрация пыли 2—15 г/м^3 . При скорости газов 1—1,2 м/с в электрофильтрах достигается степень очистки 98 % и выше.

Глава 25

ШАХТНЫЕ ПЕЧИ

1. Особенности теплообмена в слое

Топливные печи широко применяются в черной металлургии. Их используют для получения чугуна из железной руды, в них выплавляют сталь, нагревают металл перед обработкой давлением и осуществляют термическую обработку. Все топливные печи черной металлургии могут быть подразделены на две большие группы: слоевые и пламенные.

В слоевых печах с плотным (фильтрующим) слоем используется твердое кусковое топливо. Их применяют для выплавки чугуна из руды, расплавления металла перед литьем, обжига железных руд, известняка, магнезита и доломита. Слоеые печи относятся к шахтным печам, важнейшими из которых являются доменные печи — основные агрегаты любого предприятия с полным металлургическим циклом.

В пламенных печах используется газообразное или жидкое топливо, которое (как говорит само название печей) сжигается с образованием пламени (факела) в рабочем пространстве печей. Факельный метод сжигания топлива применяется в мартеновских печах при выплавке стали, в нагревательных печах прокатных и кузнечных цехов, в печах для термической обработки стали.

К исследованию теплообмена в условиях слоя кусковых материалов,двигающихся навстречу потоку газов, как это имеет место в шахтных печах, многие десятилетия привлечено внимание ученых и инженеров. В нашей стране наиболее значительные работы в этой области выполнены во Всесоюзном научно-исследовательском институте металлургической теплотехники (ВНИИМТ) и Уральском политехническом институте.

Теплообмен в слое представляет собой крайне сложный случай теплообмена. Плотный слой образуется кусками различной формы и размеров, имеющими различные теплофизические свойства. Сложный характер движения кусков значительно затрудняет определение реальной поверхности теплообмена. Различная величина зазоров между кусками влияет не только на особенности омывания их газами, но делает неразделимыми процессы теплопроводности, излучения и конвекции, действующие в слое. Поэтому приходится применять общий коэффициент, учитывающий все три вида теплообмена. Из-за неопределенности поверхности теплообмена более удобно использовать объемный коэффициент теплоотдачи α_v [Вт/(м³·К)]. Связь его с обычным коэффициентом теплоот-

дачи α [Вт/(м²·К)] выражается следующим образом: $\alpha_v = \alpha F$, где F — поверхность нагрева, заключенная в 1 м³ слоя кусковых материалов, м².

Кроме того, слой кусковых материалов характеризуется порозностью f , которая представляет собой отношение объема пустот к полному объему слоя. Для движущегося слоя, перемещающегося вертикально сверху вниз по высоте какой-то шахты H , используют понятие объемного напряжения сечения шахты ρ [м³/(м²·с)], показывающего, какой объем кусковых материалов перемещается через 1 м² сечения шахты в течение 1 ч, т. е. $H = \rho t$, где t — время полного перемещения сверху вниз, с.

Как уже подчеркивалось, шихтовые материалы в слоевых печах обычно имеют самые разнообразные размеры и теплофизические свойства. Мелкие куски, например, железорудного сырья, обладающие относительно высокой теплопроводностью, приближаются по свойствам к термически тонким телам, а крупным кускам агломерата и особенно известняка присущи свойства, характерные массивным в тепловом отношении телам. В результате этого необходимо выполнять анализ условий нагрева кусков шихты в очень широком диапазоне значений их теплового сопротивления. Очень часто в шахтных печах нагрев слоя кусков шихты происходит в условиях наличия источников (стоков) тепловой энергии.

В большинстве шахтных печей движение шихты и газов происходит по принципу противотока. В доменной печи к тому же противоточная схема движения сред дополняется завершенностью теплообмена в результате значительной величины поверхности нагрева и интенсивного охлаждения газов.

Рассмотрим, следуя работам Б. И. Китаева, ряд наиболее важных аспектов теплообмена в плотном слое при противотоке. Общее уравнение теплового баланса можно написать следующим образом:

$$G_M c_M dT_M = G_G c_G dT_G, \quad (25-1)$$

где G_M и G_G — массовый расход соответственно нагреваемого материала и охлаждающихся газов, кг/ч; c_M и c_G — теплоемкость материала и газов, кДж/(кг·К); dT_M и dT_G — изменение температуры материала и газов, К.

Применяя водяные эквиваленты, это выражение можно записать так:

$$W_M dT_M = W_G dT_G. \quad (25-2)$$

Очевидно, что изменение температур dT_M и dT_G будет зависеть от соотношения между величинами W_M и W_G . Возможны три случая такого соотношения, изображенные на рис. 25-1.

В первом случае, когда $W_G > W_M$, конечная температура нагреваемого материала (обозначения ясны из рис. 25-1) практически достигает начальной температуры газов. Газы при любой высоте слоя не могут отдать всего своего тепла нагреваемому мате-

риалу и выходят из состояния теплообмена с высокой конечной температурой, что является неизбежным.

При $W_r = W_m$ и $dT_r = dT_m$ охлаждение газов на 1°C обеспечивает нагрев металла также на 1°C . Следовательно, на всей высоте слоя разность температур между T_r и T_m будет одинаковой, что обеспечивает прямолинейный характер изменения этих температур по высоте слоя.

Если $W_r < W_m$, то при достаточной поверхности нагрева газы отдадут все свое тепло материалу ($T_r \approx T_m$), однако этого тепла не хватит, чтобы нагреть материал до начальной температуры газов.

Как будет показано ниже, в разных частях доменной печи возможны случаи, когда $W_r > W_m$ и $W_m > W_r$, поэтому рассмотрим подробнее теплообмен при $W_r > W_m$ сначала для случая термически тонких кусков. С этой целью выделим элементарный участок слоя, через который в единицу времени проходит объем материала V_m с поверхностью F .

Количество тепла, переданное материалу, может быть записано следующим образом:

$$G_m c_m dT_m = \alpha F V_m (T_r - T_m) dt, \quad (25-3)$$

где α — коэффициент теплоотдачи от газов к поверхности кусков, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

При отсутствии тепловых потерь для противотока характерно, что в любом сечении по высоте слоя (см. рис. 25-1).

$$G_r c_r T_r - G_m c_m T_m = G_r c_r T_r^*, \quad (25-4)$$

$$\text{откуда } T_r = T_r^* + \frac{G_m c_m}{G_r c_r} T_m. \quad (25-5)$$

Подставив выражение (25-5) в уравнение (25-3), можно получить после соответствующих преобразований исходное дифференциальное уравнение

$$dT_m + \alpha F V_m \left(\frac{1}{G_m c_m} - \frac{1}{G_r c_r} \right) T_m dt - \frac{\alpha F V_m}{G_m c_m} T_r^* dt = 0, \quad (25-6)$$

решением которого будет

$$T_m = T_r^* \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{\alpha F V_m}{G_m c_m} \left(1 - \frac{G_m c_m}{G_r c_r} \right) t \right] \right\}. \quad (25-7)$$

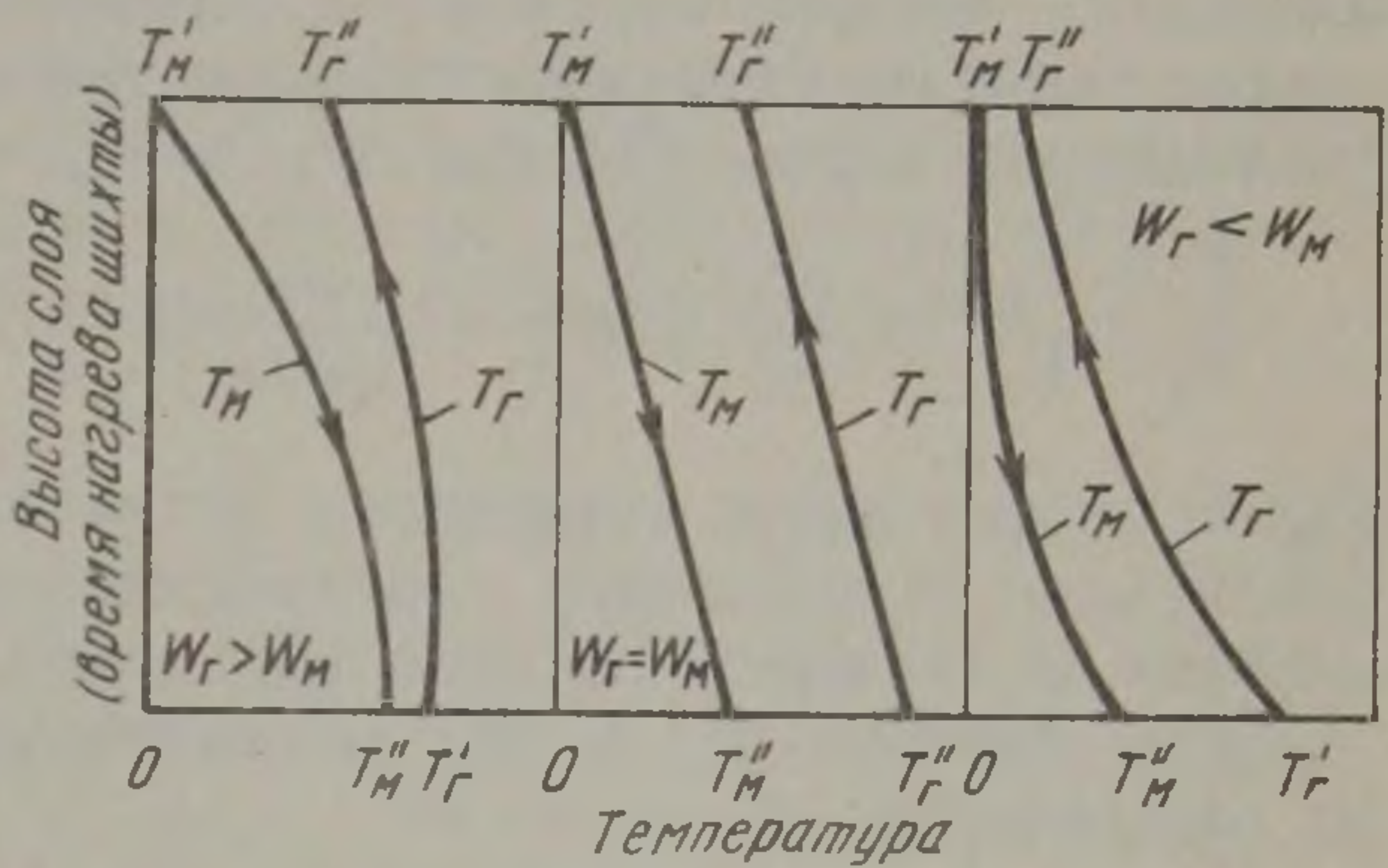


Рис. 25-1. Распределение температур газа и нагреваемого материала при противотоке для разных соотношений водяных чисел

Из последнего выражения следует, что при $t = \infty$ (высота слоя ∞) температура кусков материала на выходе из слоя T_m^* достигнет температуры газов на входе в слой T_g' . Если учесть, что для этого момента времени $T_g' \approx T_m^*$, то из выражения (25-5) можно получить

$$T_g' = T_g' \left(1 - \frac{G_m c_m}{G_g c_g} \right). \quad (25-8)$$

Учитывая, что $\alpha_V = \alpha F$, $t = H/\rho$ и $G_m c_m/V_m = c_m \rho_{нас}$ ($\rho_{нас}$ — плотность насыпного слоя) и, перейдя к безразмерной форме, можно записать следующее выражение для условий завершеного теплообмена ($T_g' \approx T_m^*$) при $W_g > W_m$:

$$\frac{T_g' - T_g}{T_g' - T_m} = \frac{W_m}{W_g} \exp \left[- \frac{\alpha_V}{c_m \rho_{нас}} \left(1 - \frac{W_m}{W_g} \right) \frac{h}{\rho} \right]. \quad (25-9)$$

Приведенные выше выражения устанавливают связь между всеми основными величинами, определяющими изменение температуры материала в слое и температуры газов.

Для случая $W_m > W_g$ аналогичные рассуждения приводят к выражению

$$\frac{T_g' - T_g}{T_g' - T_m} = -1 - \exp \left[- \frac{\alpha_V}{c_m \rho_{нас}} \left(\frac{W_m}{W_g} - 1 \right) \frac{H}{\rho} \right].$$

Уместно напомнить, что все вышеприведенные рассуждения относятся к нагреву кусков, представляющих собой термически тонкие тела, т. е. без учета внутреннего теплообмена в кусках. В действительности реальные куски могут не быть термически тонкими телами, т. е. не будет иметь место равенство $t_\lambda = t_{\lambda=\infty}$, где t_λ , $t_{\lambda=\infty}$ — время прогрева кусков соответственно с реальной и с бесконечно большой теплопроводностью. Для реальных кусков можно говорить о какой-то условной величине отношения $t_\lambda/t_{\lambda=\infty}$, которое будет зависеть от критерия Bi . Поскольку куски бесформенны, то для них практически невозможно определить точно величину линейного размера, входящего в критерий Bi . Если с определенной степенью приближения считать, что куски имеют форму шара, то

$$t = t_{\lambda=\infty} = t_\lambda \frac{1}{1 + \frac{1}{5} Bi},$$

где $Bi = \alpha R/\lambda$; R — радиус шара.

После соответствующей подстановки в уравнение (25-7) можно получить выражение

$$T_m = T_g' \left\{ 1 - \exp \left[\frac{\alpha_V}{c_m \rho_{нас}} \left(1 - \frac{W_m}{W_g} \right) \frac{t_\lambda}{1 + \frac{1}{5} Bi} \right] \right\},$$

которое позволяет делать необходимые расчеты нагрева слоя, состоящего из реальных кусков.

Во все приведенные выражения, естественно, входят величины коэффициентов теплоотдачи, которые определяются экспериментальным путем.

Большой практический интерес представляет определение гидравлического сопротивления слоя. Хаотическое распределение кусков, неопределенность сечений для прохода газов — все это делает возможным, по существу, лишь эмпирический путь исследования этих вопросов. В результате неопределенности формы и размеров пор между кусками определения отдельных элементов местных сопротивлений выполнить невозможно, поэтому они учитываются общим коэффициентом $K_{сл}$, входящим в нижеприведенную формулу для определения потерь напора в слое, Па:

$$\Delta p = K_{сл} \frac{w_{об}^2 \rho}{2} \frac{1}{f^3},$$

где $K_{сл} = 4\xi (H/d_{экив})$; $w_{об}$ — скорость, отнесенная к общему сечению шахты, м/с; f — порозность слоя; ρ_r — плотность газов, кг/м³; H — высота слоя, м; $d_{экив}$ — эквивалентный диаметр, м; $d_{экив} = (0,45 \div 0,47) d$; d — средний диаметр кусков слоя, м; ξ — коэффициент сопротивления, зависящий от критерия Re и определяемый при турбулентном режиме при $250 < Re < 5000$ по формуле $\xi = 1,56/Re^{0,15}$.

Турбулентный режим в слое наступает при низких значениях критерия Re. Это объясняется турбулизацией потока при внезапных расширениях и сужениях, резких поворотах при прохождении газа через слой кусковых материалов.

2. Доменные печи

Устройство доменной печи

Доменная печь — самый крупный и сложный плавильный агрегат, работающий без перерыва в течение 5–6 лет. В печь непрерывно загружаются железорудные материалы и кокс, подается воздух (дутье), а из печи отводится доменный газ. Тепло, выделяемое в результате горения топлива, расходуется на нагрев и расплавление материалов шихты и на образование чугуна и шлака. Чугун и шлак, накапливаясь в печи, выпускаются периодически через 2–2,5 ч. Чугун в доменной печи получается путем восстановления железа из оксидов железорудных материалов.

В доменной плавке применяют подготовленную шихту из спекшихся кусков сфлюсованного агломерата или окомкованных и обожженных окатышей. Основным видом топлива служит кокс. В целях экономии дефицитного и дорогостоящего кокса применяют частично природный газ или мазут, а для интенсификации домен-

Т а б л и ц а 25-1. Основные размеры доменных печей

Параметры	Размеры печей полезным объемом, м ³				
	1000	1500	2000	3000	5000
Полезная высота печи, м	25,5	27,8	29,4	31,2	32,2
Высота горна, м	2,9	3,2	3,6	3,9	4,5
Высота шахты, м	14,5	16,3	18,2	18,7	19,5
Диаметр горна, м	7,2	8,6	9,7	11,6	14,9
Число фурм	14	18	20	28	36

ного процесса — кислород. Основные размеры доменных печей приведены в табл. 25-1.

Важнейшей характеристикой доменной печи является ее объем. Рабочий объем печи представляет собой высокую шахту круглого сечения, внутренняя часть которой выложена огнеупорными материалами (рис. 25-2). Верхняя часть печи называется колошником 1, далее следует шахта 2. Шахта постепенно расширяется книзу и переходит в самую широкую часть печи — распар 3. Нижняя часть печи — горн 7 соединяется с распаром через зп-плечики 4. На нижнем уровне горна на высоте 0,5—2 м от лещади расположены отверстия для выпуска чугуна — чугунные летки 6 (одна, две, три или четыре в зависимости от объема печи). Расстояние между чугунной леткой и лещадью оставляется для предохранения лещади от размывания чугуном. В средней части горна расположены отверстия для выпуска шлака — шлаковые летки 5 (одна или две). В верхней части горна имеются отверстия для воздушных фурм 8. Шахту и распар печи выкладывают из шамотного кирпича высокого качества, а горн и нижнюю часть лещади — углеродистыми блоками. В верхней центральной части лещади применяют высокоглиноземистые большемерные блоки. Это уменьшает число швов кладки и увеличивает стойкость лещади. Для увеличения срока службы лещади применяют воздушное охлаждение снизу.

Давление газов в доменной печи достигает 0,3—0,5 МПа, поэтому огнеупорная кладка печи заключена в стальную броню (кожух) толщиной 25—40 мм. Толщина кладки в верхней части шахты 900—1000 мм, в нижней — 1300—1500 мм. Чтобы предотвратить перегрев и разрушение огнеупорной кладки, ее охлаждают. Для этого между металлическим кожухом и огнеупорной кладкой установлены водо- и пароохлаждаемые холодильники. Водой охлаждают также арматуру фурменных приборов и шлаковых леток. Футеровка колошника с внутренней стороны защищена от ударного и истирающего воздействия кусков шихты металлическими плитами.

В верхней части доменной печи расположен засыпной аппарат, который состоит из большого конуса с воронкой и малого конуса

с вращающейся воронкой. Большой конус перекрывает колошник и тем самым отделяет его от наружной атмосферы. Малый конус обеспечивает нужное распределение шихты по окружности колошника при ее загрузке в печь.

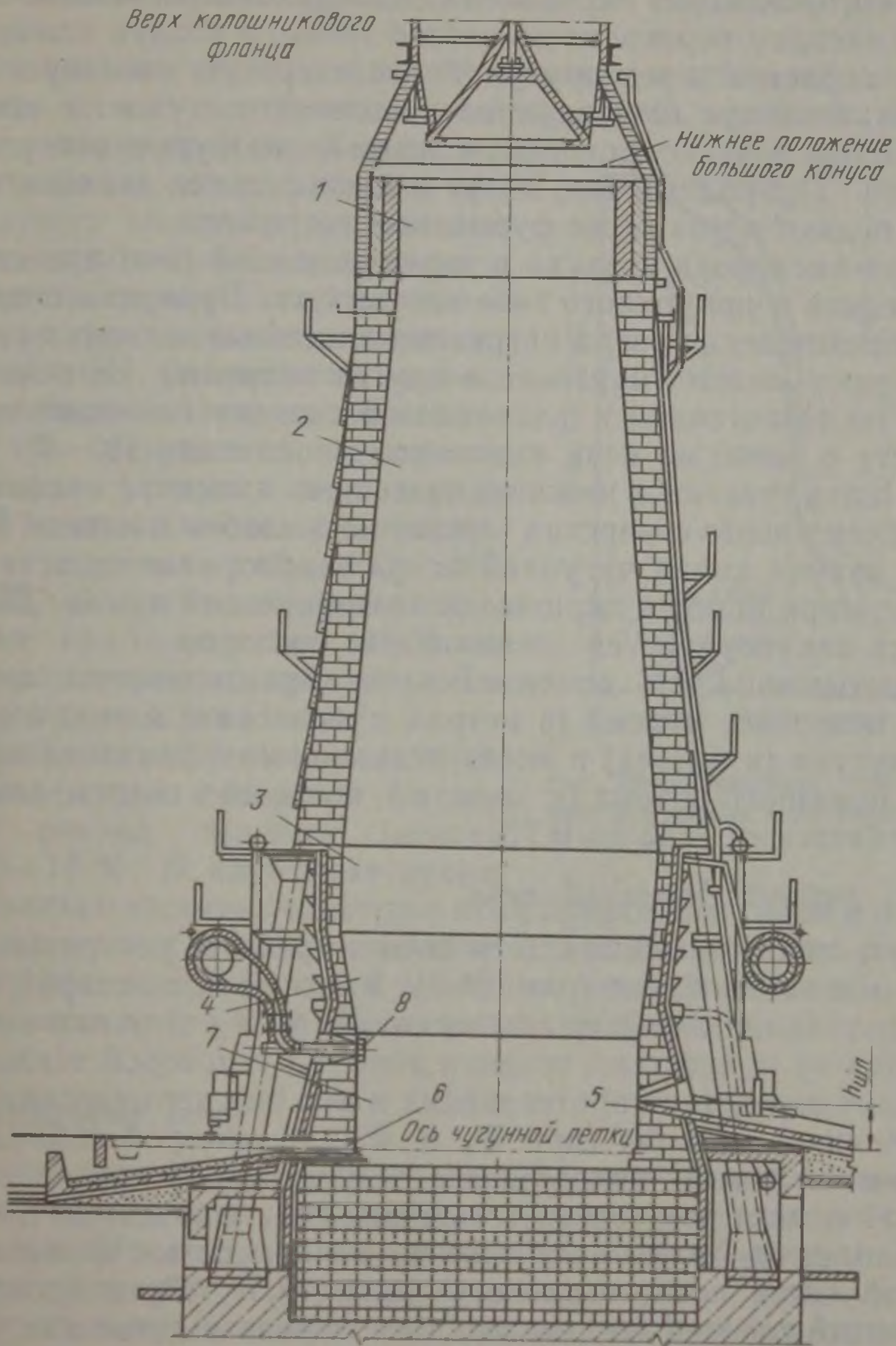


Рис. 25-2. Доменная печь

Доменная печь стоит на массивном фундаменте из огнеупорного бетона. На него опираются основные колонны печи, на которых лежит опорное кольцо, воспринимающее всю массу кладки, и стальные конструкции верхней части печи.

Воздух, вдуваемый в горн доменной печи, нагревается в воздухонагревателях регенеративного типа до 1000—1250 °С (см.

гл. 16). Современная доменная печь имеет четыре отдельно расположенных воздухонагревателя, которые работают поочередно: насадка трех из них нагревается дымовыми газами, через четвертую в это время подается холодный воздух (дутье). Период дутья 0,9—1,5 ч. Затем происходит переключение воздухонагревателей. Охлажденную насадку переводят на нагрев газом, а воздух для доменной печи подается через другую более нагретую насадку и т. д.

Нагретый воздух из воздухонагревателей поступает к печи по футерованным воздухопроводам, а затем через фурменные устройства в печь. Природный газ, мазут и кислород под давлением 1—1,2 МПа подают через те же фурменные устройства.

За счет кислорода воздуха в горне доменной печи происходит горение кокса и природного газа или мазута. Продукты сгорания по мере прохождения вверх нагревают шихтовые материалы и восстанавливают железо, марганец и другие элементы. Из печи газы выходят по газоотводам и удаляются в систему газоочистки, так как вместе с газом из печи выносятся много пыли (10—20 г/м³). Чугун и шлак стекают в нижнюю часть печи и по мере накопления их выпускают через отверстия (летки) по желобам в ковши. После выпуска чугуна канал чугунной летки закупоривается огнеупорной массой при помощи поршневой электрической пушки. Шлаковая летка закупоривается специальным стопором.

Производительность доменной печи характеризуется отношением ее полезного объема (в метрах кубических) к суточной выплавке чугуна (в тоннах) и носит название коэффициента использования полезного объема (к. и. п. о.), который в современных печах колеблется от 0,43 до 0,75.

Тепловая работа доменной печи

Доменную печь по высоте в условиях работы разграничивают на три зоны теплообмена (рис. 25-3). Верхняя I, в которой теплообмен происходит в условиях, когда $W_r > W_m$ и тепло газа используется не полностью; средняя зона II, в которой теплообмен происходит вследствие протекающих в ней экзотермических реакций, и нижняя зона III (при $W_r < W_m$), в которой наблюдается самый интенсивный теплообмен.

Это объясняет ряд известных положений, замеченных на практике. Например, тепло нагретого дутья полностью используется в нижней части печи, поскольку здесь $W_r < W_m$ и происходит интенсивный теплообмен; введение кислорода в дутье или уменьшение удельного расхода кокса снижает температуру колошника благодаря тому, что уменьшаются количество газов и значение W_r .

В шахтных печах теплопередача происходит не только конвекцией, но и излучением. В верхних горизонтах, где преобладают относительно низкие температуры, чаще всего наблюдается конвективная теплопередача, а в нижних горизонтах шахты возрастает доля излучения. Однако вследствие очень малого пространства между кусками конвективная теплоотдача сохраняет свое влияние

вплоть до самых высоких температур газа. В доменной печи кладка практически не участвует в теплообмене, поэтому футеровка сбильно охлаждается для увеличения ее стойкости. Работу доменной печи характеризуют материальный и тепловой балансы, составляемые по исходным данным и конечным результатам плавки.

Физическое тепло газов используется в доменной печи очень хорошо, и в этом отношении доменная печь является весьма совершенным агрегатом. Химически же связанное тепло углерода используется не полностью, так как в печи необходимо поддерживать восстановительную атмосферу, поскольку основное назначение доменной печи заключается в восстановлении железа из его окислов. В результате неполного окисления углерода и водорода влаги в колошниковом газе содержатся горючие газы CO , H_2 , и CH_4 . С колошниковым газом уходит приблизительно 44 % от тепла, получаемого при сгорании кокса и природного газа.

Применение высокотемпературного дутья позволяет уменьшить расход топлива (кокса) на 10—15 %. В настоящее время повсеместно частично заменяют кокс природным газом и повышают содержание кислорода в дутье, что дало возможность резко увеличить производительность доменных печей и повысить производительность труда обслуживающего персонала.

3. Обжиговые печи

В черной металлургии обжиговые шахтные печи применяют главным образом для обжига железных руд, известняка, магнезита и доломита. По виду используемого топлива обжиговые шахтные печи разделяются на пересыпные и с выносными топками.

Пересыпные шахтные печи применяют преимущественно для обжига тугоплавких материалов: известняка, доломита и др. Топливом служит коксовая мелочь, загружаемая в печь вместе с известняком. В нижней части шахты устанавливают механическое устройство для выгрузки обожженного продукта и регулирования схода шихты. Воздух подают через решетку разгрузочного устройства. Иногда для улучшения распределения шихты на колошнике печи устанавливают засыпной аппарат с одной вращающейся воронкой и конусом. Подогрев и обжиг материалов осу-

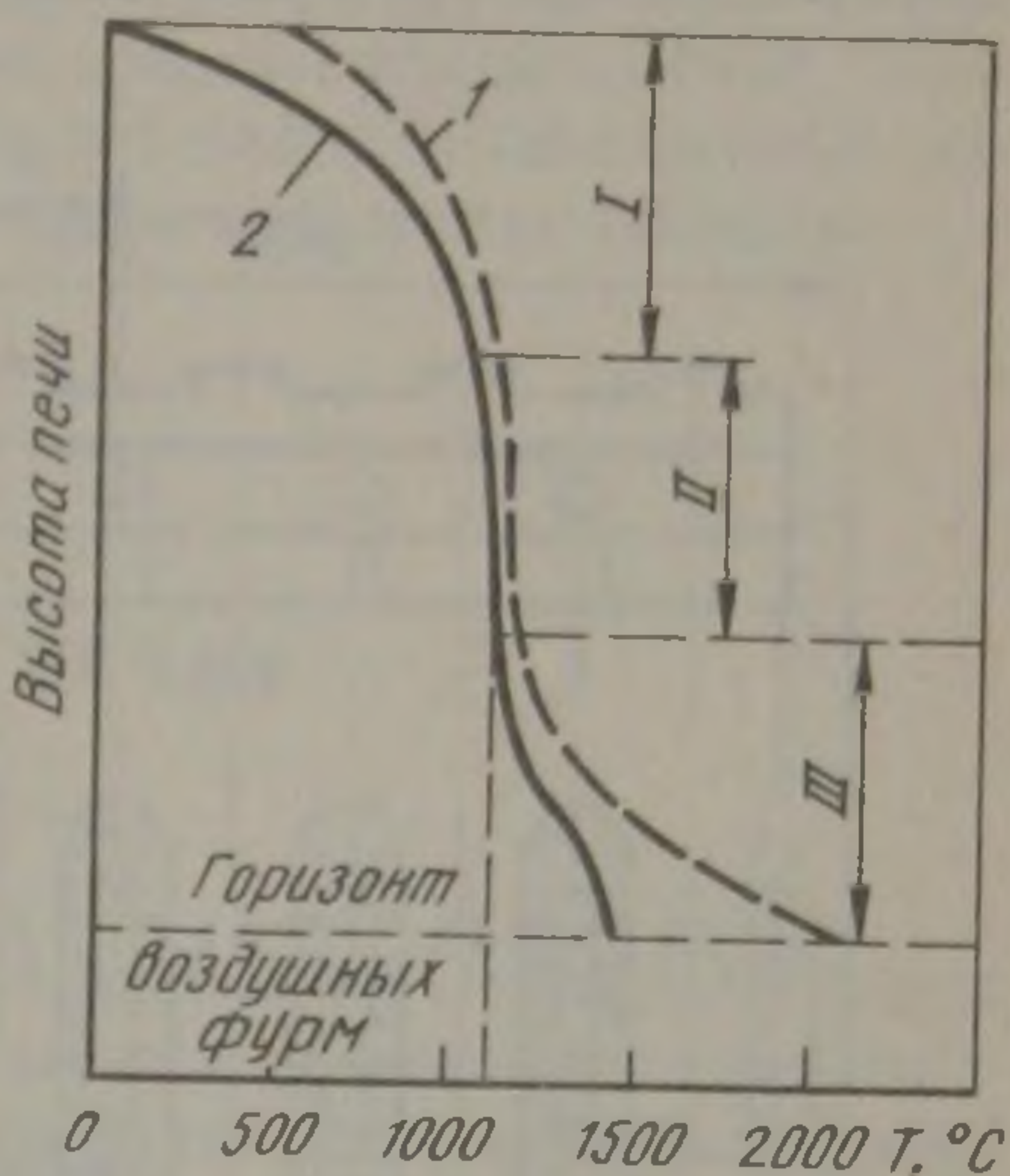


Рис. 25-3. Изменение температуры газа 1 и шихты 2 по высоте доменной печи

осуществляется в верхней части шахты. В нижней части обожженный материал охлаждается и одновременно подогрывается воздух.

Шахтные печи с выносными топками применяют для обжига сравнительно легкоплавких железных руд. Нагрев и обжиг материала осуществляется продуктами сгорания, поступающими из топок в среднюю часть шахты по специальным каналам. Топки располагают около шахты, они могут иметь с ней общие стенки. В качестве топлива используют горючие газы любого вида, мазут и каменный уголь. Нижняя часть шахты как и в пересыпных печах,

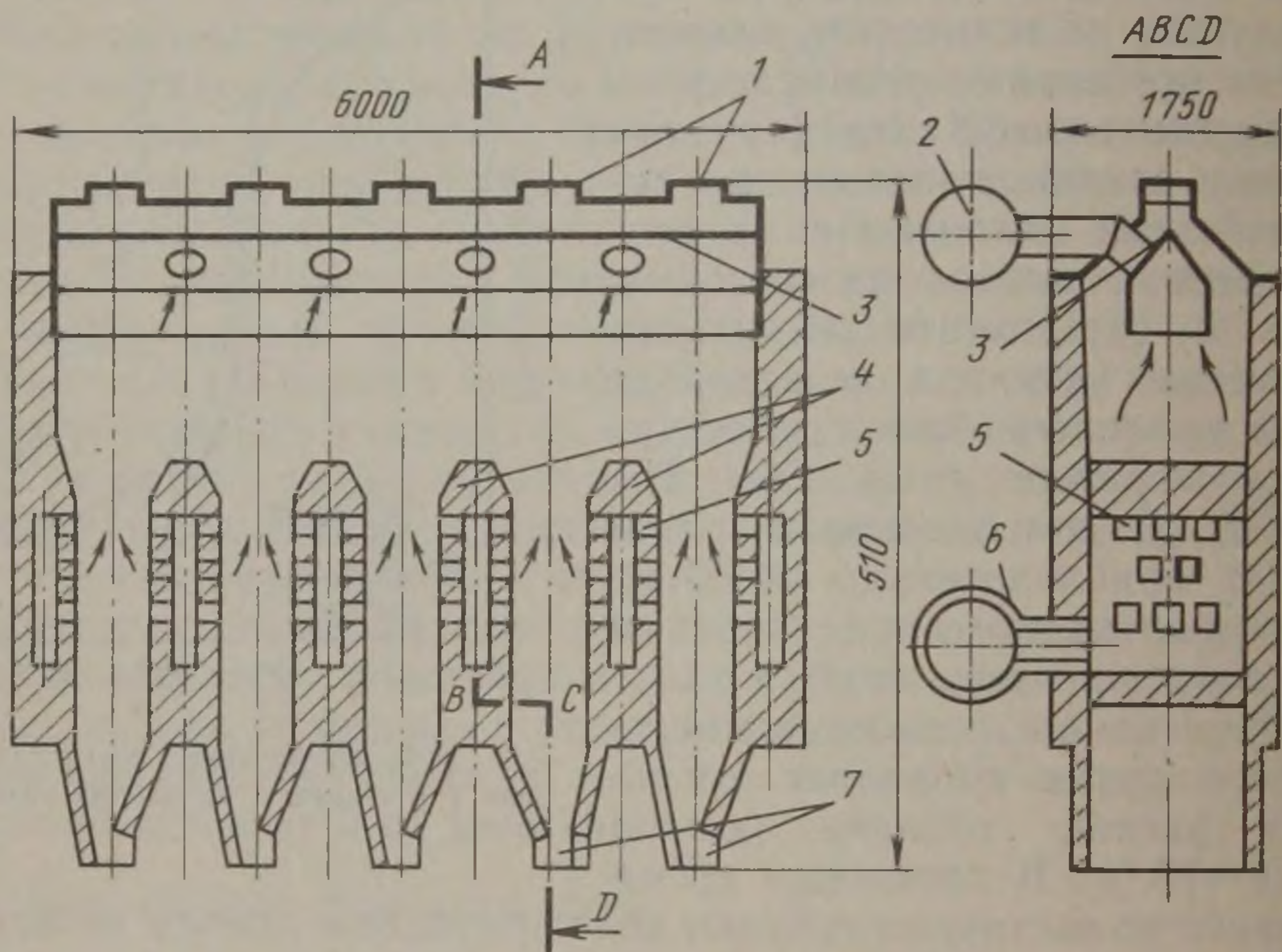


Рис. 25-4. Схема шахтной печи для обжига сидеритов:

1 — люки для загрузки шихты; 2 — газопровод для отходящих газов; 3 — гребень (разбойник), направляющий руду к стенкам печи; 4 — поперечные стенки (керны); 5 — каналы для подвода горячих газов в слой обжигового материала; 6 — футерованный газопровод для продуктов сгорания газообразного топлива; 7 — люки для выгрузки обожженного материала

служит для охлаждения обожженного материала. Для этого через нее пропускают определенное количество воздуха, который нагревается и в средней части печи смешивается с продуктами сгорания, поступающими из топок.

Продукты сгорания, подводимые по каналам через стенки шахты, устремляются в основном по наиболее легкому пути в периферийных областях слоя. Чтобы прогреть центральные области слоя шихтовых материалов, шахты печей делают узкими (с вытянутым поперечным сечением). В некоторых печах нижнюю часть шахты перегораживают огнеупорными стенками (кернами), в которых предусмотрены каналы для подачи продуктов сгорания в центральные области. Схема такой печи, предназначенной для обжига сидеритов (железных руд, содержащих до 20 % Fe), представлена на рис. 25-4.

Удельная производительность обжиговых шахтных печей значительно ниже, чем для вагранок, около 0,5—1,0 т/(м²·ч). Расход условного топлива зависит от содержания влаги и карбонатов в обжигаемом материале. При обжиге известняка он составляет 180—200 кг на 1 т готового продукта.

Для повышения производительности и замены кокса на газообразное топливо в зоне горения известковых печей стали устанавливать горизонтальные водоохлаждаемые балки с вмонтированными в них или под ними газовыми горелками. Куски известняка проходят между этими балками через пламя горящего газа. При установлении по высоте печи двух рядов балок в шахматном порядке достигается значительное улучшение качества обжига.

Глава 26

ТЕПЛООБМЕН В ПЛАМЕННЫХ ПЕЧАХ

1. Общая характеристика

Как уже отмечалось, теплообмен в пламенных печах представляет собой весьма сложный процесс, который складывается из теплоотдачи излучением и конвекцией. В высокотемпературных печах с рабочей температурой более 750—800 °С преобладает теплообмен излучением, в низкотемпературных печах с рабочей температурой менее 400—450 °С преобладает конвекция, в промежуточной области одинаково значимую роль играют оба вида теплообмена. В плавильных печах и печах для нагрева металла перед обработкой давлением преобладающим видом теплообмена является излучение. В процессе передачи тепла излучением в рабочем пространстве таких печей участвуют практически три компонента: пламя (раскаленные газы), кладка и нагреваемый (проплавляемый) материал. Всем им свойственны свои температуры и радиационные характеристики. Требуемая рабочая температура в печи определяется ее назначением и, как указывалось выше (см. гл. 5), обеспечивается выбором соответствующего топлива и метода его сжигания.

Радиационные характеристики компонентов теплообмена оказывают очень серьезное влияние как на физическую сторону процесса теплообмена в целом, так и на методы его расчета. Наиболее простым анализ и расчет процесса теплоотдачи излучением становится в том случае, когда радиационные характеристики компонентов теплообмена принимаются соответствующими серому излучению (см. том 1). Однако исследования последних лет показали, что ни футеровка печи, ни поверхность расплавленного или нагреваемого металла не имеют характеристик, соответствующих серому излучению.

В качестве примера на рис. 26-1 представлены радиационные характеристики некоторых материалов, участвующих в процессе радиационного теплообмена в рабочем пространстве промышленных печей. Приведенные на рис. 26-1 кривые являются типичными, что позволяет сделать вывод о том, что подавляющая часть материалов (не говоря уже о пламени и раскаленных газах), участвующих в радиационном теплообмене в печах, не имеет радиационных характеристик, соответствующих серому излучению.

Это обстоятельство потребовало разработки методов расчета лучистого теплообмена с учетом селективных свойств компонентов

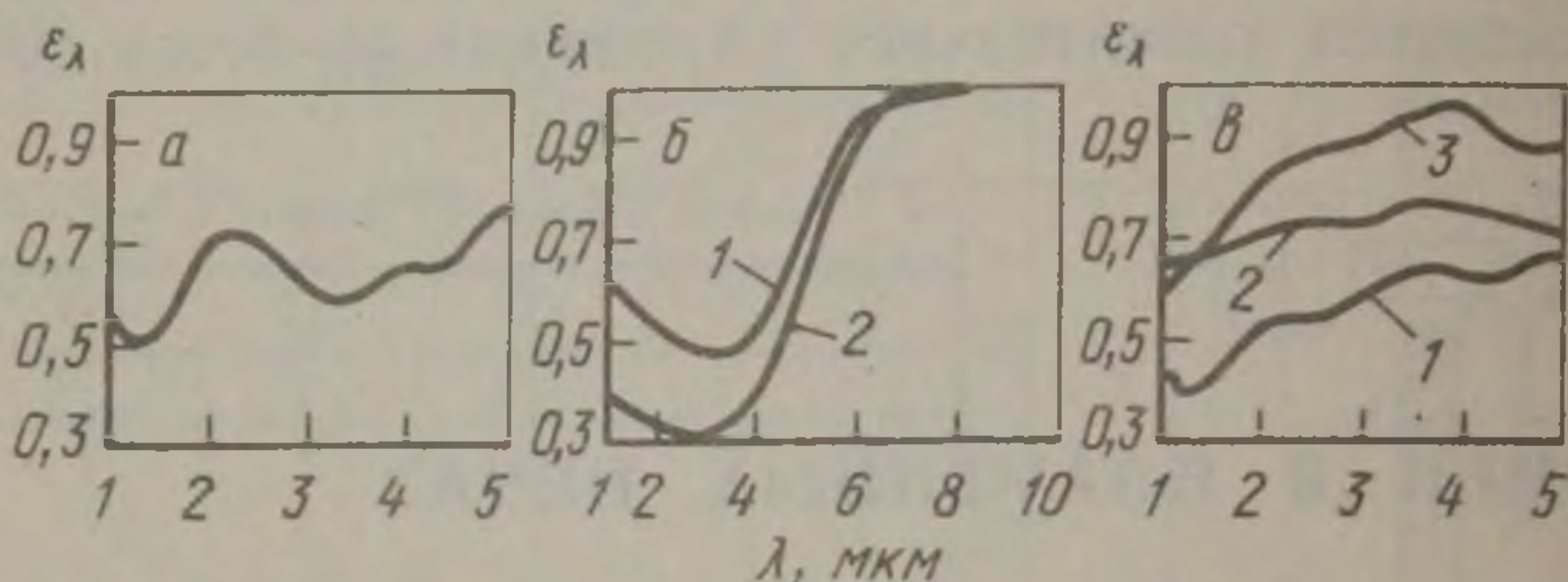


Рис. 26-1. Изменение степени черноты ϵ_λ по спектру следующих материалов: а — расплавленный мартеновский шлак (период расплавления, сталь Армко); б — высокоглинземистого огнеупорного материала ($Al_2O_3 \approx 80\%$) при нагреве до 1400 К в нейтральной среде (кривая 1) и на воздухе (кривая 2); в — стали 18ХНЧВА при нагреве до температуры 800 °С (кривая 1), 1100 и 1200 °С (соответственно кривые 2 и 3)

теплообмена. Однако уже первые шаги в этом направлении показали, что метод расчета лучистого теплообмена по селективной модели значительно превосходит по своей сложности аналогичный метод расчета по серой модели. В силу этого было необходимо установить целесообразные границы использования того и другого методов расчета. Было установлено, что ошибка, возникающая при расчете лучистого теплообмена по серой модели, т. е. без учета селективных радиационных свойств компонентов теплообмена, изменяется в достаточно широких пределах и зависит от конструкции печи и особенностей ее тепловой работы. Поэтому в настоящее время применяются как те, так и другие методы расчета.

Большое влияние на теплообмен в пламенных печах оказывает характер подвода топлива: торцевой, боковой или сводовый. Многие годы в методических нагревательных печах использовалось торцевое отопление. При таком отоплении старались обеспечить равномерную теплотдачу на металл по длине печи, для чего использовали длиннопламенные горелки. Температура газов (пламени) при этом падает по мере удаления от горелки и теплотдача на металл снижается. Для поддержания температуры и теплообмена на желаемом уровне приходится делать несколько пережимов в печи. Пережимы не улучшают, а скорее ухудшают тепловую работу печи, однако они являются неизбежными при торцевом расположении горелочных устройств. Стремление интенсифицировать теплообмен на нагреваемый металл как за счет

повышения излучения кладки, так и за счет более равномерной по длине и ширине печи теплоотдачи на металл привело к разработке нового и весьма перспективного метода сводового отопления, получающего в настоящее время все более широкое развитие, прежде всего в результате создания плоско-пламенных горелок (см. гл. 6).

Большое влияние на теплообмен в нагревательных пламенных печах оказывает взаимный характер движения теплоотдающих раскаленных газов (пламени) и теплопотребляющего металла. Здесь возможны два случая: противоточное и прямоточное движение теплоносителей. Как следует из вышеизложенного (см. гл. 17), противоток является наиболее совершенной схемой взаимного движения теплоносителей, поскольку холодный теплоноситель может нагреться до температуры, превышающей конечную температуру более нагретого теплоносителя. Подобное положение при прямотоке невозможно. В силу этих причин методические нагревательные печи до последнего времени в подавляющем большинстве работали по противоточной схеме движения раскаленных газов и нагреваемого металла. Однако, в прямоточной схеме движения теплоносителей, в начальной ее части, где имеет место очень большой перепад температур между горячим и холодным теплоносителем, заключены большие резервы для интенсификации теплообмена на поверхность нагреваемого металла. Этот перепад температур быстро уменьшается и делать печь, работающую целиком по принципу прямотока нецелесообразно, но создание печей со смешанным прямоточно-противоточным характером движения газов и металла представляется весьма перспективным. В этом направлении сделаны уже первые шаги — в мире работает несколько прямоточно-противоточных печей, одна из которых будет рассмотрена ниже.

2. Особенности лучистого теплообмена в пламенных печах

Серая модель

Общеизвестно, что серому излучению свойственны не только независимость степени черноты от длины волны и температуры, но и равенство интегральных и спектральных величин излучательных (степеней черноты) и поглощательных способностей тел, т. е. $\epsilon = A$ и $\epsilon_\lambda = A_\lambda$.

Применительно к печам это значит, что степени черноты всех компонентов теплообмена в рабочем пространстве печей (кладки, металла, раскаленных газов) принимаются постоянными, не зависящими ни от длины волны, ни от температуры. К настоящему времени наиболее известным решением для расчета по серой модели теплообмена излучением в рабочем пространстве печей является формула В. Н. Тимофеева, полученная, кроме того, с рядом

дополнительных упрощений, наиболее важными из которых являются следующие:

температуру и лучистые характеристики газов принимают неизменными по всему объему рабочего пространства;

температуру различных точек поверхности металла также принимают постоянной;

кладку по отношению к падающему на нее лучистому потоку принимают адиабатной, считая, что тепловой поток, передаваемый от газов к кладке конвекцией, равен тепловому потоку, теряемому кладкой в окружающую среду.

Формулу В. Н. Тимофеева для технических расчетов обычно используют в виде

$$Q_{\text{луч}} = C_{\text{г.к.м}} F_{\text{м}} \left[\left(\frac{T_{\text{г}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{м}}}{100} \right)^4 \right], \quad (26-1)$$

где $Q_{\text{луч}}$ — количество тепла (Вт), получаемое металлом (результатирующий поток на металл), зависящее в значительной степени от величины $C_{\text{г.к.м}}$, которую называют приведенным коэффициентом излучения газов и кладки на металл, причем

$$C_{\text{г.к.м}} = C_0 \epsilon_{\text{м}} K \quad \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

$$\text{здесь } K = \frac{1/\varphi + 1 - \epsilon_{\text{г}}}{[\epsilon_{\text{м}} + \epsilon_{\text{г}}(1 - \epsilon_{\text{м}})] \frac{1 - \epsilon_{\text{г}}}{\epsilon_{\text{г}}} + \frac{1}{\varphi}}. \quad (26-2)$$

В этих выражениях $\epsilon_{\text{м}}$, $\epsilon_{\text{г}}$ — степень черноты металла и дымовых газов; φ — угловой коэффициент получения от стенок печи на металл.

Величина $1/\varphi = \omega$, входящая в выражение для $C_{\text{г.к.м}}$, характеризует степень развития кладки. Ее численное значение приблизительно равно отношению суммарной внутренней поверхности всех стенок и свода печи $F_{\text{н}}$ к воспринимающей тепловое излучение поверхности металла $F_{\text{м}}$, т. е. $1/\varphi = \omega = F_{\text{н}}/F_{\text{м}}$.

Роль кладки как посредника в передаче тепла теснейшим образом связана с размерами и конструктивными формами печи. Из выражения (26-2) видно, что величина $C_{\text{г.к.м}}$, а следовательно $Q_{\text{луч}}$ и $\alpha_{\text{изл}}$, равный $\alpha_{\text{изл}} = Q_{\text{луч}}/[(T_{\text{г}} - T_{\text{м}}) F]$, зависят от таких величин, как степень развития кладки, степень черноты газов, температура кладки. Подобные расчеты, иллюстрирующие это влияние, были выполнены проф. И. С. Назаровым еще в сороковых годах, но до сих пор не потеряли своего смысла и наглядности. Результаты этих расчетов приведены на рис. 26-2, 26-3, 26-4.

Очевидно, чем выше расположен свод печи, тем больше величина степени развития кладки. Из рис. 26-2 видно, что увеличение степени развития кладки ω приводит к росту величины $C_{\text{г.к.м}}$. Однако увеличение высоты свода дает эффект только в том случае, если пламя заполняет весь объем рабочего пространства. Чрезмерное увеличение высоты свода приводит к возрастанию тепловых потерь и излишнему расходу огнеупорных и других

материалов. Обычно величина степени развития кладки лежит в пределах 2—3,5.

Кладка участвует в теплообмене с пламенем и металлом, поэтому ее температура зависит от значения величин, определяющих этот теплообмен. На рис. 26-3 приведены данные, полученные для $T_r = 1450^\circ\text{C}$ и $T_m = 1250^\circ\text{C}$, из которых видно, что при прочих равных условиях понижение свода (уменьшение величины ω) влечет за собой понижение температуры кладки. Как и следовало ожидать, увеличение излучательной способности пламени

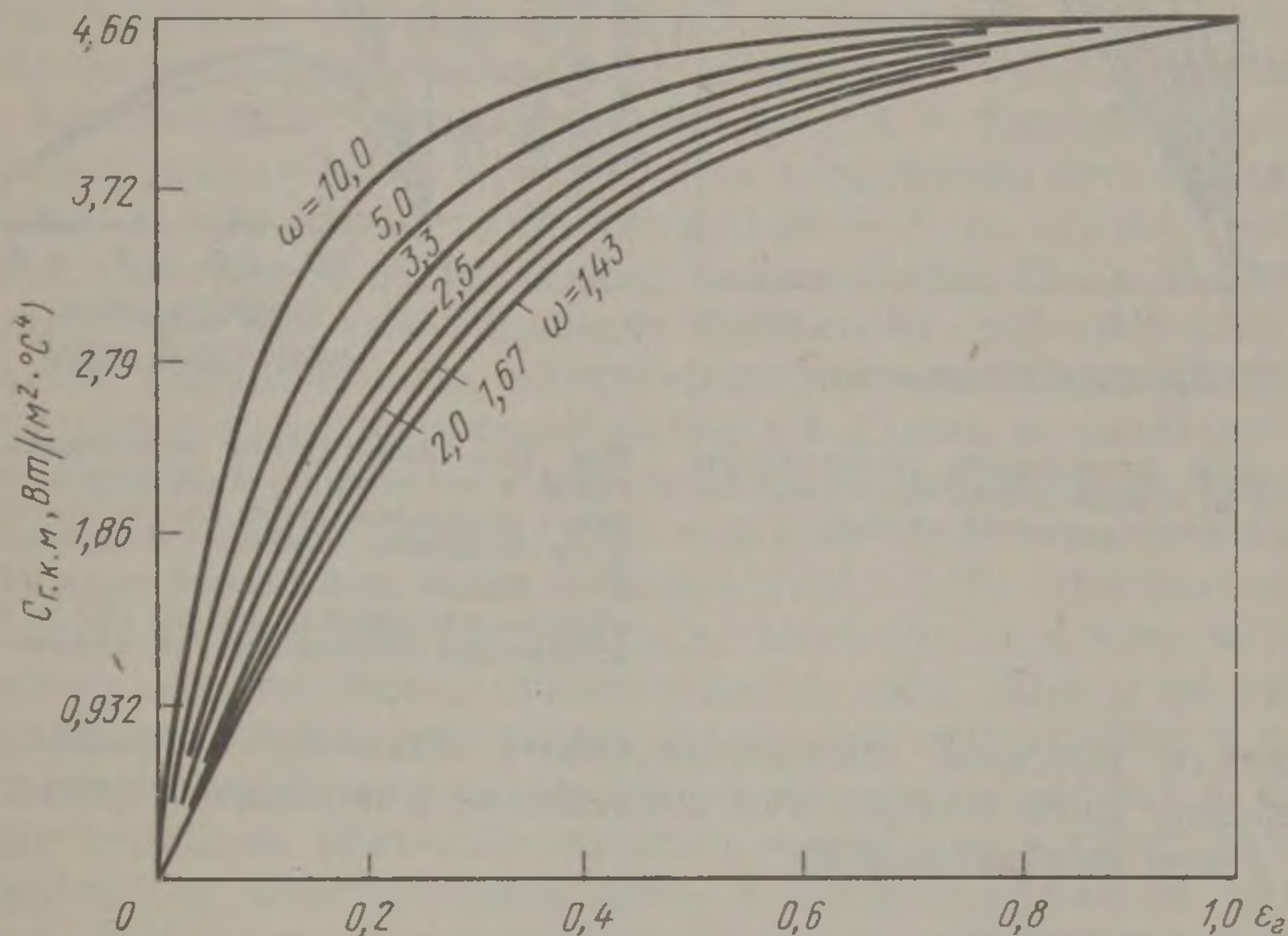


Рис. 26-2. Зависимость коэффициента $C_{г.к.м}$ от степени черноты газов ϵ_g и степени развития кладки ω

приводит к увеличению температуры кладки. Понижение температуры кладки в печах, работающих по радиационному режиму, нецелесообразно, если только оно диктуется стойкостью огнеупоров.

Как уже указывалось, возможны такие случаи, когда пламя (излучающие газы), характеризующееся высокой температурой и излучательной способностью, не полностью заполняет объем рабочего пространства печи, удалено от свода и приближено к металлу. Такое расположение пламени соответствует прямому направленному радиационному теплообмену. В этом случае температура поверхности кладки будет зависеть не от соотношения F_k/F_m , а от соотношения между поверхностью кладки и теплоотдающей поверхностью факела (пламени) F_k/F_ϕ .

Роль кладки как посредника в передаче тепла может быть иллюстрирована данными, приведенными на рис. 26-4 и полученными для двух случаев соотношения поверхностей:

$$F_k/F_m = F_\phi/F_m = 2,5 \text{ (сплошные линии)}$$

и

$$F_k/F_m = 2,5; F_\phi/F_m \approx 1,7 \text{ (штриховые линии).}$$

Эти данные подтверждают отмеченный выше (см. гл. 2) факт, что увеличение степени черноты пламени приводит к уменьшению доли теплоотдачи от кладки в общем теплообмене и что при воз-

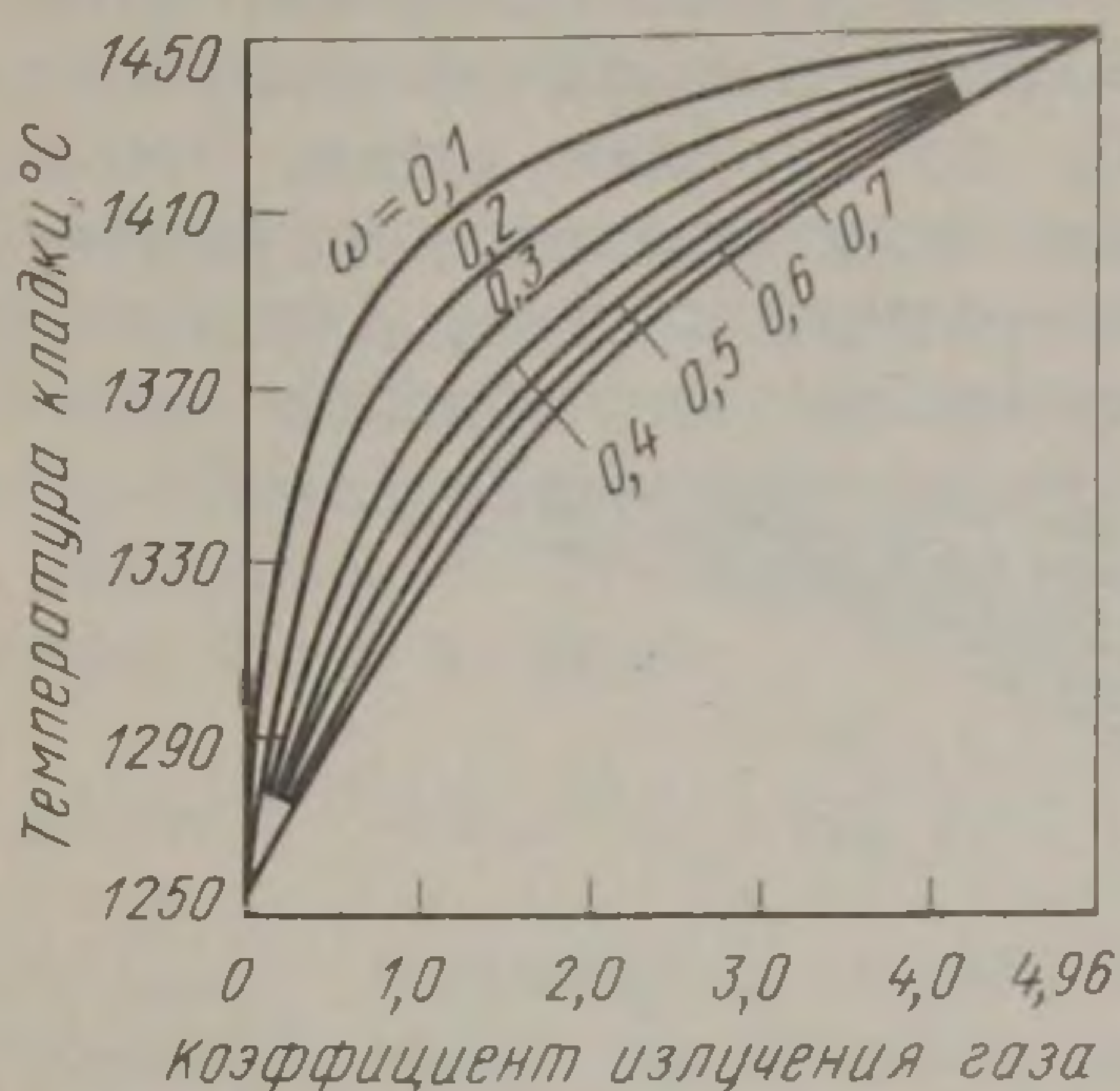


Рис. 26-3. Зависимость температуры кладки от коэффициента излучения газов и степени развития кладки

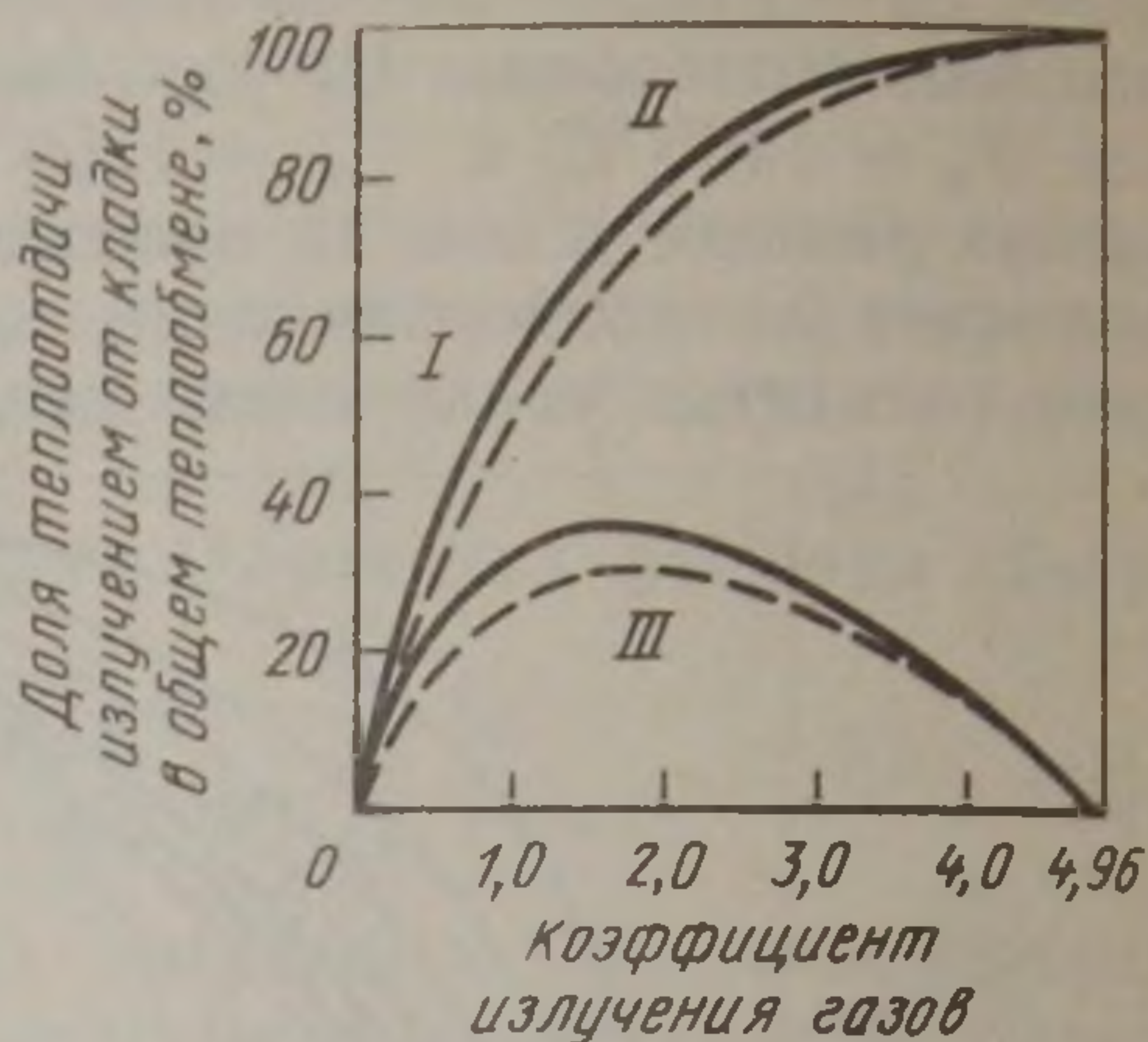


Рис. 26-4. Зависимость теплоотдачи от газов и от поверхности кладки к металлу от коэффициента излучения газов и соотношения величин поверхности: I — область несвещающихся газов; II — область свещающихся газов; III — теплопередача излучением от кладки

никновении условий, соответствующих прямому направленному теплообмену роль кладки как посредника в передаче тепла становится менее значительной.

Селективная модель

Уместно напомнить, что само понятие серого тела абстрактно — в природе таких тел нет. Реальные тела в отдельных случаях могут иметь радиационные характеристики, приближающиеся к аналогичным для серого тела, однако это бывает достаточно редко. Поверхности и среды, участвующие в теплообмене излучением в рабочем пространстве металлургических печей, характеризуются ярко выраженными селективными свойствами (см. рис. 26-1), при которых отсутствует равенство степени черноты и поглощательной способности. Использование серой модели неминуемо приведет к ошибочным результатам. Необходимо в расчетах учитывать селективность компонентов теплообмена, что, естественно, окажет серьезное влияние на расчет величины результирующего потока на металл, усложняя расчет и делая его практически невозможным без использования ЭВМ.

Наиболее строгим в этом случае методом является такой, при котором расчет выполняется для бесконечно малого спектрального интервала $\Delta\lambda$ с последующим интегрированием по всему спектру. Такой метод расчета крайне трудоемок и громоздок. Поэтому чаще применяют методы квазисерой аппроксимации, при которой весь интересующий диапазон длин волн разбивается на

ряд интервалов конечного размера, в пределах которых все компоненты системы принимаются как серые, т. е. принимается равенство $\epsilon_{\Delta\lambda} = A_{\Delta\lambda}$. Конечный результат определяется суммированием по выбранным интервалам. Этим методом с достаточной точностью может быть решена практически любая задача, однако и при этом упрощении расчет обычно получается достаточно громоздким и сложным, чем и объясняется то обстоятельство, что пока получены результаты для относительно простых случаев.

В качестве примера, характеризующего расчеты подобного рода и величины возможных ошибок, приведем результаты расчета лучистого теплообмена (выполненного в МИСиСе) для сечения печи, заполненного поглощательной средой — газообразными продуктами сгорания (CO_2 , H_2O , N_2) или продуктами сгорания, и взвешенными в них, сажистыми частицами — т. е. средой, имитирующей несветящееся и светящееся пламя (табл. 26-1). Весь расчет был выполнен для спектрального диапазона от 1 до 9 мкм, спектральные радиационные характеристики газообразных продуктов сгорания и сажистых частиц были выбраны по наиболее современным данным. Стены и свод печи были выбраны из шамота со своими, вполне реальными селективными свойствами. В качестве нагреваемого металла была выбрана сталь X18, спектральные характеристики которой определены достаточно надежными методами.

Результаты расчетов, приведенные в табл. 26-1 и многие другие, убеждают в том, что расчет лучистого теплообмена в пламенных печах с использованием серой модели приводит к существенным ошибкам, величина которых зависит от многих факторов, определяемых конструкцией печи и особенностями ее тепловой работы. Здесь есть еще много нерешенных конкретных задач; достигнутые результаты не могут быть описаны в рамках данного учебника и освещаются в специальной литературе.

Т а б л и ц а 26-1. Сравнительные результаты расчетов радиационного теплообмена по квазисерой и серой модели

Среда, заполняющая печь	Температура, К				Отношение результирующих потоков, определенных по квазисерой модели, к полученным по серой модели
	металла	стен печи	свода печи	среды	
Газообразные продукты сгорания	300	950	900	1000	1,17
Газообразные продукты сгорания и сажистые частицы	1500	1950	1900	2000	1,13

3. Теплообмен при торцовом отоплении

Для того чтобы направить факел (пламя) вдоль печи, обычно необходимо в своде печи делать пережимы, освобождая пространство для конструктивного размещения горелочных устройств (см.

рис. 27-12). Использование торцевого отопления обычно преследуют цель обеспечения относительно равномерного по длине печи теплового потока на нагреваемый металл. Чаще всего при этом используют двухпроводные горелки, которые в результате плохого смешения топлива с воздухом дают растянутое, светящееся в его начальной части, пламя. Продвигаясь вдоль печи, раскаленные газы отдают часть своего тепла металлу и кладке и теряют температуру. Для поддержания температуры печи на достаточно высоком уровне на протяжении значительной длины печи приходится

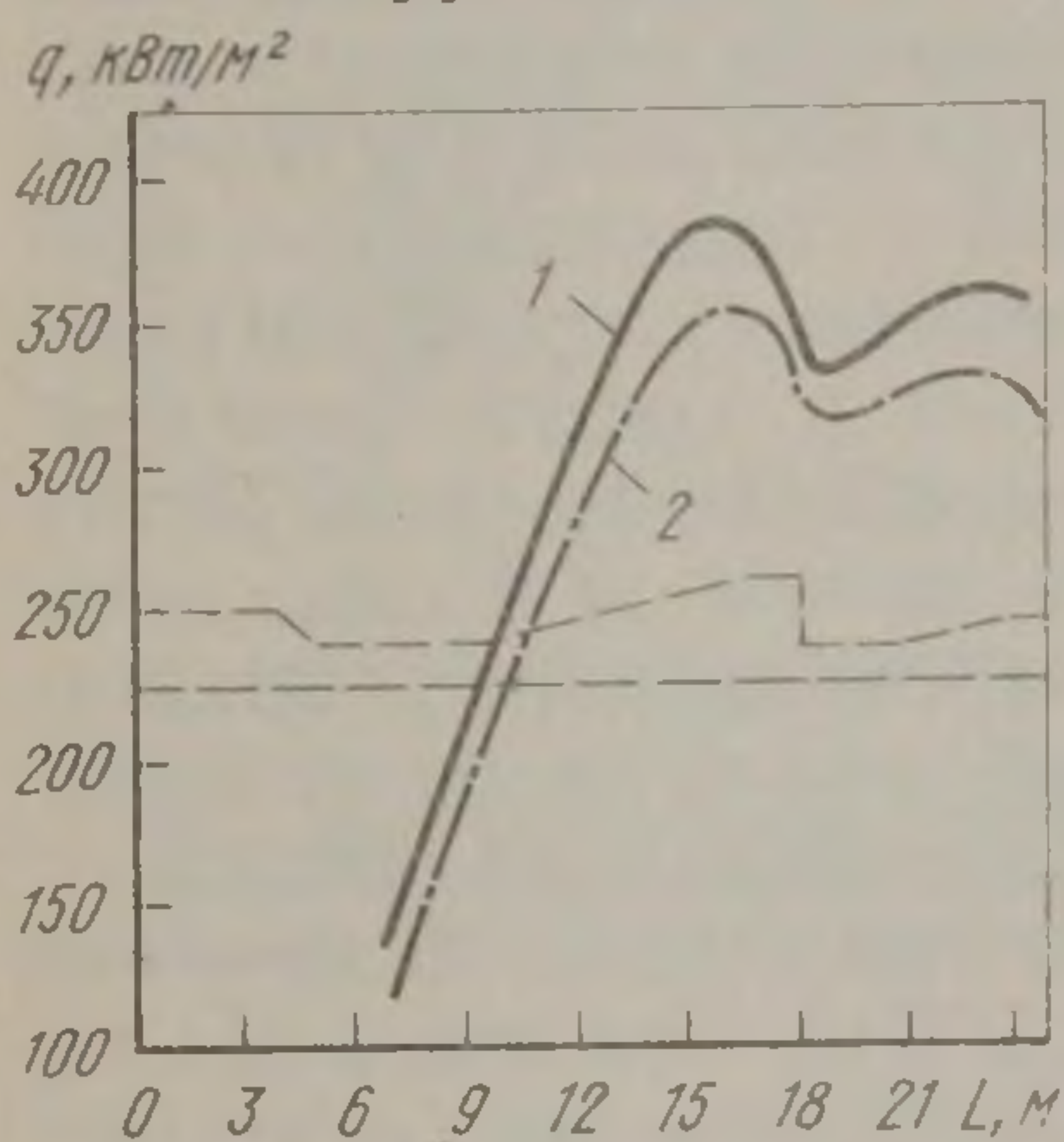


Рис. 26-5. Изменение величин падающих тепловых потоков на металл:

1 — полного; 2 — радиационного

делать несколько пережимов и устанавливать несколько зон торцевых горелок.

Значительный практический интерес представляет вопрос о том, как изменяются тепловые потоки на металл при торцевом расположении горелок. На рис. 26-5 приведены результаты измерения полных и радиационных падающих на металл тепловых потоков вдоль сварочной и томильных зон, выполненных на одной из трехзонных методических печей. Данные рис. 26-5 указывают на весьма значительное уменьшение величины падающих на металл тепловых потоков по ходу газов. Необходимо отметить, что

пережим оказывает на величину тепловых потоков крайне неблагоприятное влияние. Все это говорит в пользу широкого развития сводового отопления. Вместе с тем, одной из существенных возможностей интенсификации теплообмена в методических печах, в том числе и с торцевым отоплением, является активизация теплообменных возможностей кладки.

Выше отмечалось, что кладка играет наибольшую роль в теплообмене в тех печах, в которых имеет место несветящийся факел. В современных условиях большинство нагревательных печей работает на газообразном топливе, которое чаще всего сгорает, не давая светящегося пламени. Положениями общей теории печей М. А. Глинкова установлено, что в таких случаях повышение степени черноты кладки повышает результирующий поток на металл. Однако большинство используемых в промышленности огнеупоров, не бывших в употреблении, имеет низкую степень черноты. Иными словами новая футеровка печи, выполненная при ее строительстве или при ремонте, не обладает желаемыми радиационными свойствами.

Это положение иллюстрируется данными, приведенными на рис. 26-6. Причем пониженная степень черноты имеет место как раз в том спектральном интервале, в котором осуществляется в соответствии с температурным уровнем работы печей наиболь-

шая доля теплообмена излучением. Как видно из рис. 26-6, степень черноты огнеупорной футеровки во время ее службы в печи в результате действия самых разнообразных факторов постепенно повышается, однако достигает желаемого уровня лишь после 1,5 и более лет эксплуатации. Для того чтобы ликвидировать этот недостаток, целесообразно новую кладку сразу после строительства или ремонта покрывать специальными обмазками, повышающими

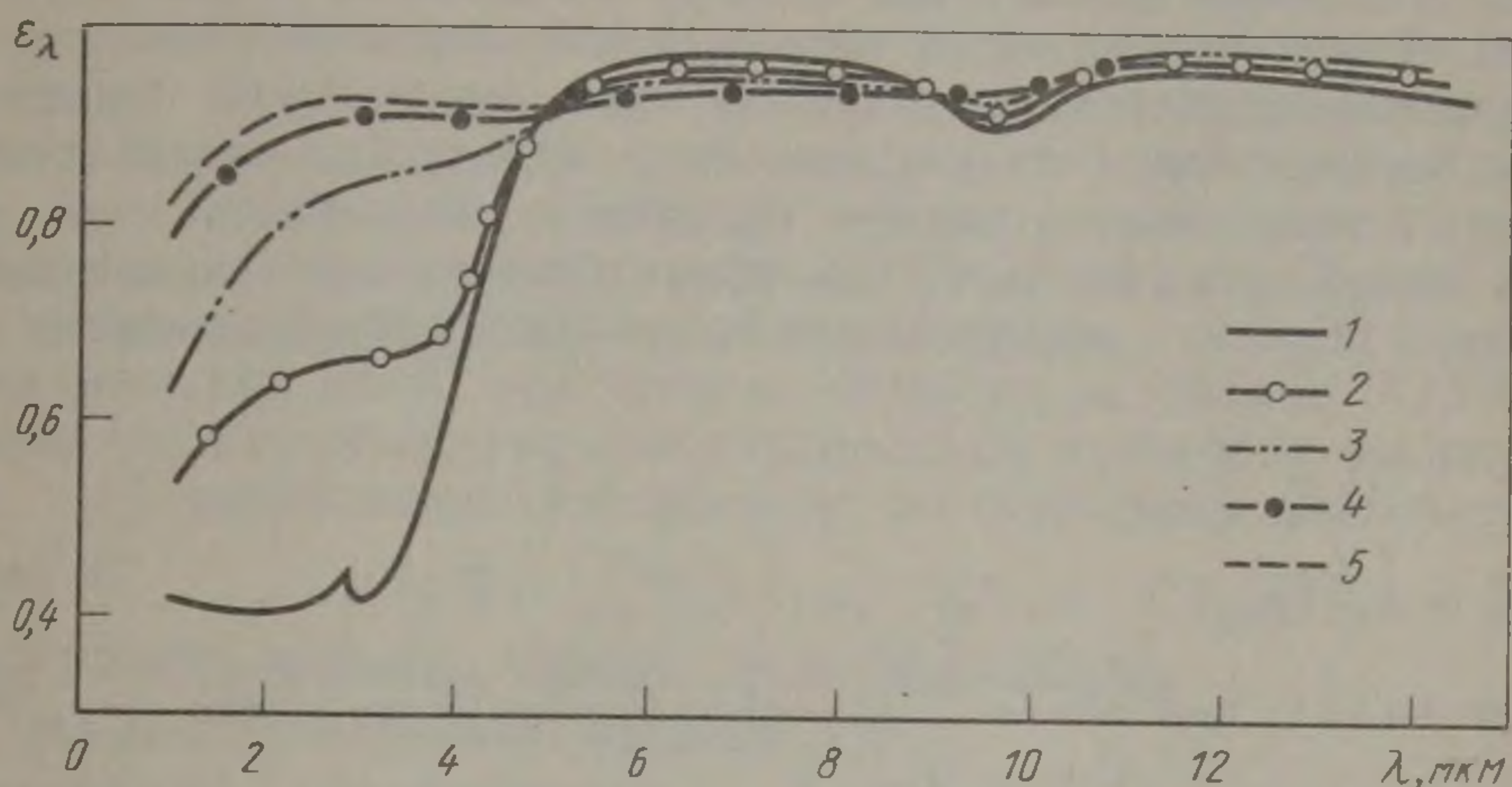


Рис. 26-6. Зависимость спектральной степени черноты ϵ_{λ} алюмосиликатных огнеупоров от длины волны λ после службы в томильных и сварочных зонах методических печей:

1 — новый огнеупор; 2—5 — соответственно после 0,5; 0,75; 1,5 и 2,5 года службы огнеупора

степень черноты до желаемого уровня. Опыт использования таких обмазок в промышленных печах показал их хорошую стойкость и высокую эффективность.

4. Теплообмен при сводовом отоплении

При рассмотрении особенностей разомкнутого факела плоско-пламенных горелок (см. гл. 6) отмечалось, что газовый слой, прилегающий к керамической поверхности, в котором развиваются процессы горения, имеет весьма малую толщину (~100—150 мм). Поэтому вся печь по высоте может быть разделена на две неравно-великие части: зону горения и зону теплообмена, заполненную остывающими продуктами сгорания. Тепло, выделяющееся в зоне горения конвекцией и излучением, передается керамической поверхности, которая обеспечивает основную часть теплового потока на металл. Таким образом печи такого типа работают в условиях косвенного радиационного режима теплообмена. Тепловой поток от кладки на металл частично ослабляется газами, заполняющими основной объем печи — зону теплообмена. Вследствие этого печи, оборудованные плоско-пламенными горелками, нецелесообразно делать высокими. Высота такой печи должна быть не-

большой, достаточной лишь для того, чтобы обеспечить необходимое выравнивание температуры. Зоны горения и теплообмена каждая характеризуется своими температурой и степенью черноты.

Печи косвенного режима теплообмена, оборудованные плоско-пламенными горелками, находят все большее распространение, так как обеспечивают весьма форсированный и равномерный нагрев металла. Печи имеют плоский свод и строятся обычно достаточно широкими (до 14—16 м), при небольшой высоте (~1.2—1.4 м). Такая конструкция печи при анализе теплообмена делает обоснованным допущение о теплообмене между двумя параллельными плоскостями (поверхности свода и металла), разделенными двумя слоями газов — зонами горения и теплообмена.

В нашей стране наиболее значительные исследовательские работы в области сводового отопления проведены институтом газа АН УССР, в работах которого, в частности, было получено ниже следующее уравнение для определения результирующего потока, воспринятого поверхностью металла (см. приложение 1):

$$q_m = \epsilon_m [(\sigma_{\text{пр}} T_k^4 - \sigma_0 T_m^4) - \epsilon_{r1} (\sigma_{\text{пр}} T_k^4 - \sigma T_{r2}^4) + \epsilon_{r1} (1 - \epsilon_{r2}) (\sigma_0 T_{r1}^4 - \sigma_{\text{пр}} T_k^4)] + \alpha_{\text{конв.к}} (T_{r2} - T_m), \quad (26-3)$$

где $\sigma_{\text{пр}} = \sigma_0 \frac{1 - \epsilon_m Q_{\text{конв.к}}}{\epsilon_m T_k}$ — приведенный коэффициент излучения кладки, учитывающий отклонение от коэффициента излучения абсолютно черного тела, вызываемое истинной степенью черноты кладки и долями конвективного и лучистого теплообмена в теплоотдаче к кладке; T_m и T_k — температура кладки и металла, К; T_{r1} и T_{r2} — температура газов соответственно в зонах горения и теплообмена, К; ϵ_{r1} и ϵ_{r2} — степень черноты газов соответственно в зонах горения и теплообмена; ϵ_m и ϵ_m — степень черноты кладки и металла; $\alpha_{\text{конв.к}}$ — коэффициент теплоотдачи конвекцией от газов к металлу, Вт/(м²·К); $Q_{\text{конв.к}}$ — конвективный тепловой поток на кладку, Вт/м²; σ_0 — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела, Вт/(м²·К⁴).

Выражение (26-3) имеет четкий физический смысл. Первые два слагаемых определяют количество тепла, которое передает кладка на металл с учетом теплообмена с газообразной средой, заполняющей зону теплообмена. Газообразные продукты сгорания, имеющие температуру T_{r1} , излучают на кладку тепловой поток, равный $\epsilon_{r1} \sigma_0 T_{r1}^4$. Часть этого потока кладка отражает и посылает на металл через объем газов зоны теплообмена, пропускающая способность которых равна $(1 - \epsilon_{r2})$. Таким образом, третье слагаемое выражения (26-3) показывает, какое количество тепла кладка отражает на металл (как часть тепла, излучаемого газами зоны горения на кладку).

Выражение (26-3) показывает, что основное количество тепла металл получает от кладки, что и соответствует, как отмечалось выше, условиям косвенного направленного теплообмена.

Теплофизические процессы, протекающие около керамической поверхности при использовании плоско-пламенных горелок, очень сложны, так как включают в себя такие локальные процессы, как: дссмешивание топлива с окислителем и горение топлива; передачу тепла конвекцией и излучением от раскаленных газов к керамической поверхности; теплоотдачу от поверхности кладки и др. Теснейшая взаимосвязь всех этих процессов и предопределяет ту огромную сложность явлений у поверхности кладки в целом, которая не позволила пока внести достаточную ясность в их механизм. Несомненно, что дальнейшие исследования в этой области в увязке с выбором оптимальных (с точки зрения характера поглотительной способности металла) селективных свойств керамической поверхности сделают сводовсе отопление печей еще более распространенным и эффективным.

Глава 27

НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ, РАБОТАЮЩИЕ ПО РАДИАЦИОННЫМ РЕЖИМАМ

1. Общая характеристика нагревательных печей

Нагревательными печами обычно называют печи, в которых осуществляется нагрев металла перед обработкой давлением (прокаткой, ковкой). Часто прокатку металла ведут последовательно на нескольких станах, что определяет и состав парка печей.

Производительность вновь строящихся прокатных станов непрерывно увеличивается. Поэтому общей тенденцией в развитии печей является интенсификация нагрева металла (с соблюдением требований, предъявляемых к качеству нагрева), что позволяет увеличить производительность печного агрегата.

Значительный прогресс в печестроении связан с механизацией и автоматизацией работы печей. При современном поточном производстве логичным является стремление включить печи в поточные линии. Для этого нужно, чтобы металл перемещался в печи с помощью таких механизмов, которые не только обеспечивают прохождение металла с цикличностью, необходимой для поточного производства, но и позволяют, если это требуется, быстро опораживать печь. Наиболее совершенными с этой точки зрения являются печи с роликовым подом, который представляет собой по существу продолжение рольганга цеха. Однако использование печей с роликовым подом пока ограничено, в основном, вследствие недостаточной стойкости роликов в высокотемпературных печах при их значительной ширине. Поэтому весьма распространены и перспективными являются также печи с шагающим подом,

которые с успехом применяют при нагреве заготовок длиной 12—14 м.

В настоящее время на предприятиях черной металлургии применяют как разливку стали в изложницы, так и непрерывную разливку стали. В первом случае печное хозяйство включает в себя печи для нагрева слитков перед прокаткой на блюмингах и слябингах, во втором — подобные печи отсутствуют.

Наиболее широко применяется нагрев прямоугольных заготовок, для чего используют печи периодического (садочные) и постоянного (проходные) действия. В печах периодического действия металл загружается в полностью или частично остуженную печь и затем постепенно нагревается вместе с печью, т. е. температура печи изменяется во времени. Такой метод применяют при нагреве крупных слитков, которые необходимо греть медленно во избежание возникновения чрезмерного температурного перепада. Периодический режим нагрева применяется в нагревательных колодцах-печах, в которых слиток, стоящий вертикально, нагревается с четырех сторон. Поскольку размеры слитков значительные (толщина ~ 600 мм, масса ~ 7 т), подобный нагрев обеспечивает необходимую равномерность и производительность.

Следует отметить определенную тенденцию к увеличению развеса слитков до 25—35 т, что благоприятно влияет на работу разливочного пролета сталеплавильных цехов и улучшает качество слитка. Однако качественный нагрев таких слитков перед прокаткой на обжимных станах требует специальных нагревательных колодцев и специального кранового и другого оборудования. Пока еще нет конструкции нагревательного колодца, специально приспособленного для нагрева таких крупных слитков.

Кроме нагревательных колодцев для нагрева слитков иногда применяют печи с выкатным подом, в которых можно обеспечить постепенный нагрев металла (что очень важно при нагреве особо крупных слитков). Эти печи применяют в кузнечных цехах, где выпускают особо крупные поковки.

В печах постоянного действия температура во времени остается неизменной. Вместе с тем температура таких печей по длине рабочего пространства может изменяться в соответствии с необходимостью создания целесообразного режима нагрева. Проходные печи постоянного действия — это наиболее распространенные нагревательные печи в черной металлургии. Они очень многообразны как по способу транспортировки заготовок через печь, так и по методам отопления. Это толкательные печи, печи с шагающим и роликовым подом; с торцевым, сводовым, боковым отоплением. В таких печах может осуществляться как постепенный (методический) режим нагрева, так и весьма форсированный камерный режим.

В последнее время в связи с развитием и возникновением новых процессов прокатки предъявляются новые требования и к нагревательным печам. Широкое развитие получают процессы непре-

рывной прокатки, при которых заготовка подвергается неоднократно последовательному обжатию без промежуточных подогревов. Процесс тем эффективнее, чем длиннее прокатываемые заготовки. Это объясняется тем, что с увеличением длины заготовки сокращается количество отходов металла. Длина заготовки достигает 12—15 м. Однако увеличение длины заготовки требует соответствующего увеличения ширины нагревательной печи, что вместе с необходимостью высокого нагрева заготовки примерно до 1250 °С создает большие трудности при эксплуатации печи, так как при столь значительной ширине печи крайне затруднено удаление окалины. Применение в этих случаях методических толкательных печей с участками монолитного пода практически исключено. Поэтому оптимальной конструкцией можно считать печь с шагающим подом.

Весьма перспективным является метод бесконечной прокатки, при котором необходимо осуществлять стыковую сварку отдельных заготовок в горячем состоянии в одну непрерывную полосу. Такой метод прокатки позволяет повысить скорость прокатки, но требует полной синхронности в работе прокатных, сварочных и печных механизмов. Во время сварки заготовка остывает, поэтому ее с самого начала или надо перегреть до весьма высокой температуры (~1300 °С) или нагревать в два этапа: первый — перед сваркой до 1100 °С и второй — после сварки до температуры прокатки. В обоих случаях для нагрева перед сваркой оптимальной конструкцией является печь с шагающим подом, так как ее использование позволяет удовлетворительно организовать удаление окалины. Значительное достоинство печей с шагающим подом состоит также в том, что они могут самоосвободиться (без загрузки новых изделий), что важно при ремонтах, а также могут быть использованы в качестве утепленных емкостей, где накапливается металл при различной скорости прокатки на заготовительных и сортовых станах.

Применение методических толкательных печей при бесконечной прокатке ограничивается трудностями, обусловленными удалением окалины, а применение секционных печей — еще и их большой длиной.

После сварки целесообразно применять индукционный нагрев, однако в этом случае требуется совершенно прямая заготовка. Чем длиннее заготовка, тем более вероятна возможность ее искривления. Это ограничивает пока увеличение длины заготовки свыше 12 м.

При нагреве слябов, полученных методом непрерывной разливки, к печам предъявляется ряд дополнительных требований, главными из которых являются следующие:

- 1) печь должна быть приспособлена для нагрева весьма длинных слябов. Известны случаи, когда длина нагреваемых слябов достигала 60 м, а длина применяемой роликовой печи 120 м;

2) машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и прокатные станы работают в различном ритме, поэтому необходимо, чтобы в печах можно было нагревать как горячий, так и холодный металл;

3) слябы, полученные на МНЛЗ, имеют поверхность хорошего качества. Поэтому следует стремиться к тому, чтобы сделать минимальным окалинообразование и устранить возможность образования поверхностных дефектов при транспортировании металла через печь;

4) при непрерывной разливке в формируемом слябе образуются подкорковые пузыри, которые, соединяясь с атмосферой, вызывают межкристаллическую коррозию. Для ликвидации вредного влияния внутреннего окалинообразования необходимо температуру нагрева металла повысить до 1300—1350 °С.

Для нагрева слябов, полученных методом непрерывной разливки, применяют как толкательные, так и печи с механизированным (обычно шагающим) подом.

Кроме прямоугольных на заводах черной металлургии подвергают нагреву цилиндрические заготовки, которые в дальнейшем обрабатывают на трубопрокатных и колесопрокатных станах. Для нагрева таких заготовок применяют печи с кольцевым подом и секционные печи. В печах с кольцевым подом (их иногда называют карусельными) заготовка неподвижно лежит на вращающемся (кольцевом) поду, который перемещает ее через все зоны нагрева. В секционных печах перемещение заготовок осуществляется за счет вращения роликов расположенных между секциями.

Современная печь — это автоматизированный агрегат, в котором автоматически поддерживается заданный тепловой режим, т. е. заданная температура, расход топлива, соотношение топлива и воздуха, давление в печи.

Все нагревательные печи обеспечивают высокую температуру нагрева металла ($\sim 1200\text{--}1250$ °С) и работают как правило в условиях радиационных режимов теплообмена. Стремление повысить интенсивность нагрева металла или создать так называемый скоростной нагрев, когда на поверхность металла подается максимально допустимый тепловой поток, приводит к неизбежному повышению температуры кладки. Поддержание температуры внутренней поверхности кладки на необходимом весьма высоком уровне требует серьезной теплоизоляции печи, делает печь крайне громоздкой и инерционной в тепловом отношении. В силу этого обеспечение скоростного радиационного нагрева наталкивается в подобном случае на значительные трудности. Этими причинами объясняется тот факт, что в последнее время получает все большее развитие скоростной конвективный (ударный) нагрев, свободный от указанных недостатков.

Наряду с тепловым и температурным режимами для работы печей большое значение имеет режим давления в печи. Идеальным

был бы такой режим давления в печи, при котором холодный воздух не попадал бы в печь, а дымовые газы не выбивались бы из печи. Если холодный воздух попадает в печь, то это приводит к излишнему расходу тепла и увеличивает угар металла. Чрезмерное выбивание дымовых газов приводит к увеличению потерь тепла, пагубно влияет на арматуру печи и затрудняет ее обслуживание. Для обеспечения оптимального режима давления в нагревательных колодцах стремятся под крышкой поддерживать небольшое избыточное давление. В проходных печах на уровне нагреваемых заготовок также целесообразно поддерживать небольшое избыточное давление, исключающее подсос воздуха в печь и большое выбивание дымовых газов. Однако полностью выдержать такое давление по всей длине печи не удастся.

2. Печи для нагрева слитков (нагревательные колодцы)

Общая характеристика

Слитки металла, полученные в мартеновском, конвертерном или электросталеплавильном цехах, перед прокаткой на обжимном стане подвергают дополнительному нагреву. Обычно толщина их не менее 400 мм, поэтому для ускорения и повышения качества нагрева целесообразно греть их с четырех сторон, располагая вертикально. Подобный нагрев осуществляется в нагревательных колодцах, которые обеспечивают: ускоренный и равномерный нагрев металла, исключая возможность смещения усадочной раковины; удобство транспортирования, загрузки и выгрузки металла при вертикальном положении слитков.

К нагревательным колодцам предъявляют следующие требования:

1) достаточно быстрый нагрев металла, обеспечивающий высокую производительность (общую и удельную);

2) качественный нагрев металла: равномерность нагрева по высоте и сечению слитков без местных оплавлений;

3) эффективная работа воздухо- и газоподогревателей, обеспечение невысокого удельного расхода топлива;

4) возможность надежного автоматического регулирования теплового режима;

5) высокие эксплуатационные качества (удобство удаления шлака, полное сжигание топлива в пределах рабочего пространства, достаточная герметизация рабочего пространства и теплообменных устройств, достаточная стойкость крышек и других нагревательных колодцев);

6) простота конструкции и невысокие капитальные затраты на строительство.

Каждый нагревательный колодец в отдельности называется ячейкой. Несколько ячеек составляют группу. Для группы ячеек

предусмотрены одна дымовая труба и общее помещение для контрольно-измерительных приборов. Производительность нагревательных колодцев обычно исчисляют на группу в год. Зная производительность стана и производительность одной группы, можно найти необходимое число групп нагревательных колодцев.

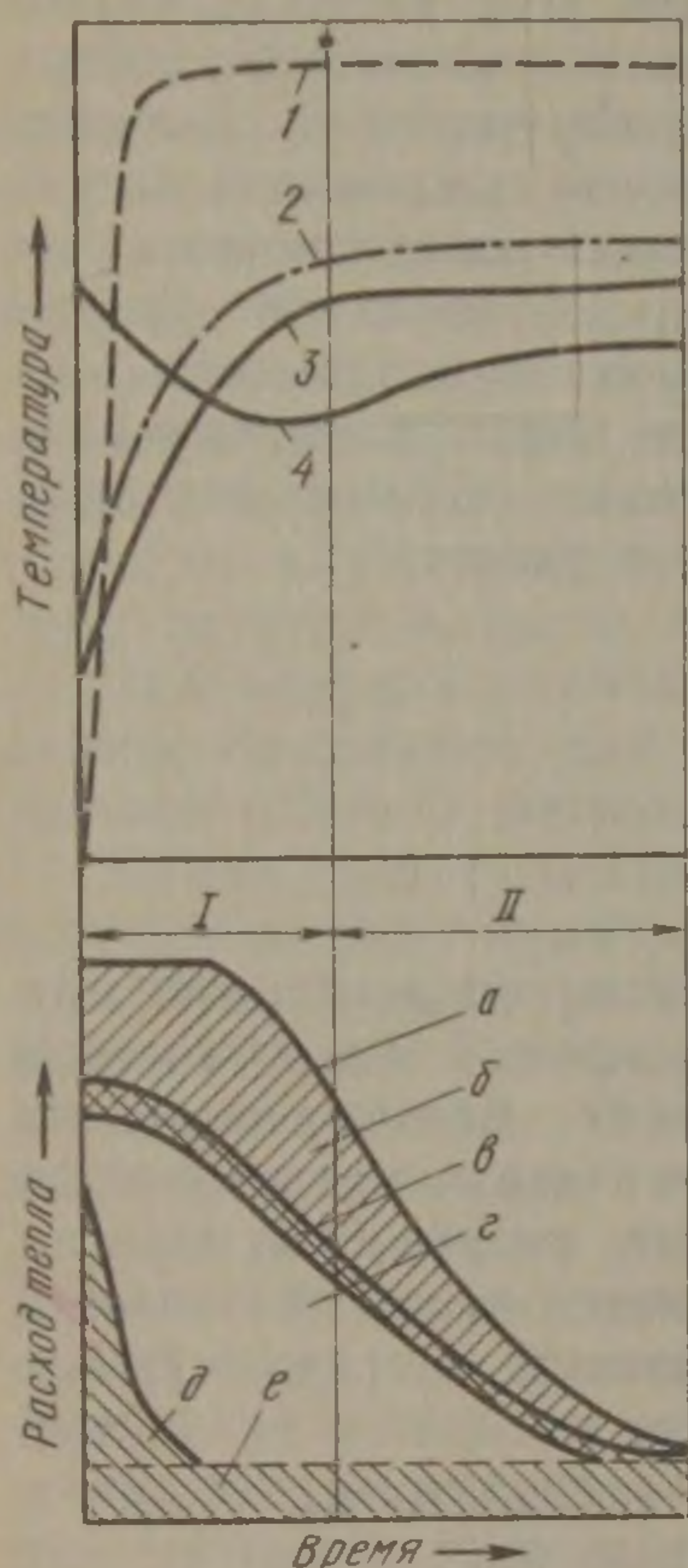


Рис. 27-1. Температурный режим и тепловой баланс нагревательного колодца при нагреве слитков горячего посада:

I — период нагрева; II — период томления; 1 — температура крышки; 2 — температура отходящих продуктов сгорания; 3 — температура поверхности слитка; 4 — температура середины слитка; а — общий расход тепла; б — потери тепла с продуктами сгорания; в — потери тепла вследствие неполноты сгорания топлива; г — расход тепла на нагрев металла; д — тепло, поглощенное кладкой, охлажденной при открывании колодца; е — потери тепла через кладку

Тепловой и температурный режимы. Современные нагревательные колодцы являются камерными печами периодического действия с переменными во времени тепловым и температурным режимами. В подавляющем большинстве нагревательных колодцев нагрев металла осуществляется садками, т. е. после выдачи всех нагреваемых слитков ячейки колодцев вновь загружают слитками. В результате частого открывания крышки при выдаче и посадке слитков кладка рабочего пространства нагревательных колодцев охлаждается. Поэтому при работе колодцев на горячем посаде в первый момент нагрева температура слитков выше температуры поверхности кладки и основной потребитель тепла в этот период — кладка колодца.

На рис. 27-1 показан температурный режим и приведен тепловой баланс колодца при нагреве слитков горячего посада для различных периодов нагрева. Из этого рисунка видно, что в начальный период нагрева подают максимальное количество тепла, соответствующее тепловой мощности колодцев. После того, как кладка достигнет своей рабочей температуры, начинается интенсивный нагрев металла.

Расход тепла поддерживают максимальным до тех пор, пока температура той части слитка, которая нагревается быстрее, не достигнет предельного значения. Этот период называется

периодом нагрева. Вслед за ним наступает период томления, в течение которого происходит постепенное уменьшение расхода тепла, так как в течение этого времени температура поверхности слитков остается постоянной и тепло расходуется только на про-

грев слитка по сечению. В этот период температура отходящих продуктов сгорания остается приблизительно постоянной.

Тепловую мощность нагревательных колодцев выбирают так, чтобы обеспечить быстрый подъем температуры кладки и поверхности слитков в начале нагрева. При заниженной тепловой мощности период нагрева затянется, а период выдержки сократится, и полный цикл нагрева будет нераационально большим. При завышенном максимальном расходе топлива период нагрева сократится, но увеличится неравномерность температуры по сечению слитка и период выдержки затянется. Это также вызовет чрезмерное увеличение длительности полного цикла нагрева.

На работу нагревательных колодцев очень большое влияние оказывает начальная температура слитков. Обычно нагревательные колодцы работают на горячем посаде, т. е. в ячейку для нагрева до температуры прокатки ($\sim 1200^\circ\text{C}$) помещают еще не полностью остывшие после разливки слитки, температура которых $700\text{—}850^\circ\text{C}$. Чем выше

процент горячего посада и начальная температура слитков, тем больше производительность нагревательных колодцев и тем ниже удельный расход топлива на нагрев металла. Процент горячего посада и начальная температура слитков зависят от уровня организации производства на данном предприятии. На тех заводах, где культура производства достаточно высока, горячий посад достигает 95 %, а начальная температура слитков перед нагревом $800\text{—}850^\circ\text{C}$.

На рис. 27-2 приведены данные, показывающие зависимость полной длительности нагрева от температуры посада 7-т слитков и величины тепловой мощности. Из рисунка видно, что влияние тепловой мощности тем больше, чем ниже температура посада слитков, так как чем выше температура посада, тем короче период нагрева и ниже максимальный расход топлива.

Оптимальное значение тепловой мощности (по химическому теплу топлива) лежит в пределах $209,3\text{—}293$ МДж/т садки.

Рабочая температура в нагревательных колодцах составляет $1350\text{—}1400^\circ\text{C}$. Для обеспечения такой рабочей температуры нужно сжигать топливо так, чтобы калориметрическая температура горения достигала $2100\text{—}2200^\circ\text{C}$.

Шлакоудаление. В процессе нагрева металла происходит его окисление. Образовавшаяся окалина собирается на подине колодца и должна быть оттуда удалена. Существуют два метода удаления окалины или, как говорят, шлакоудаления: сухое и жидкое.

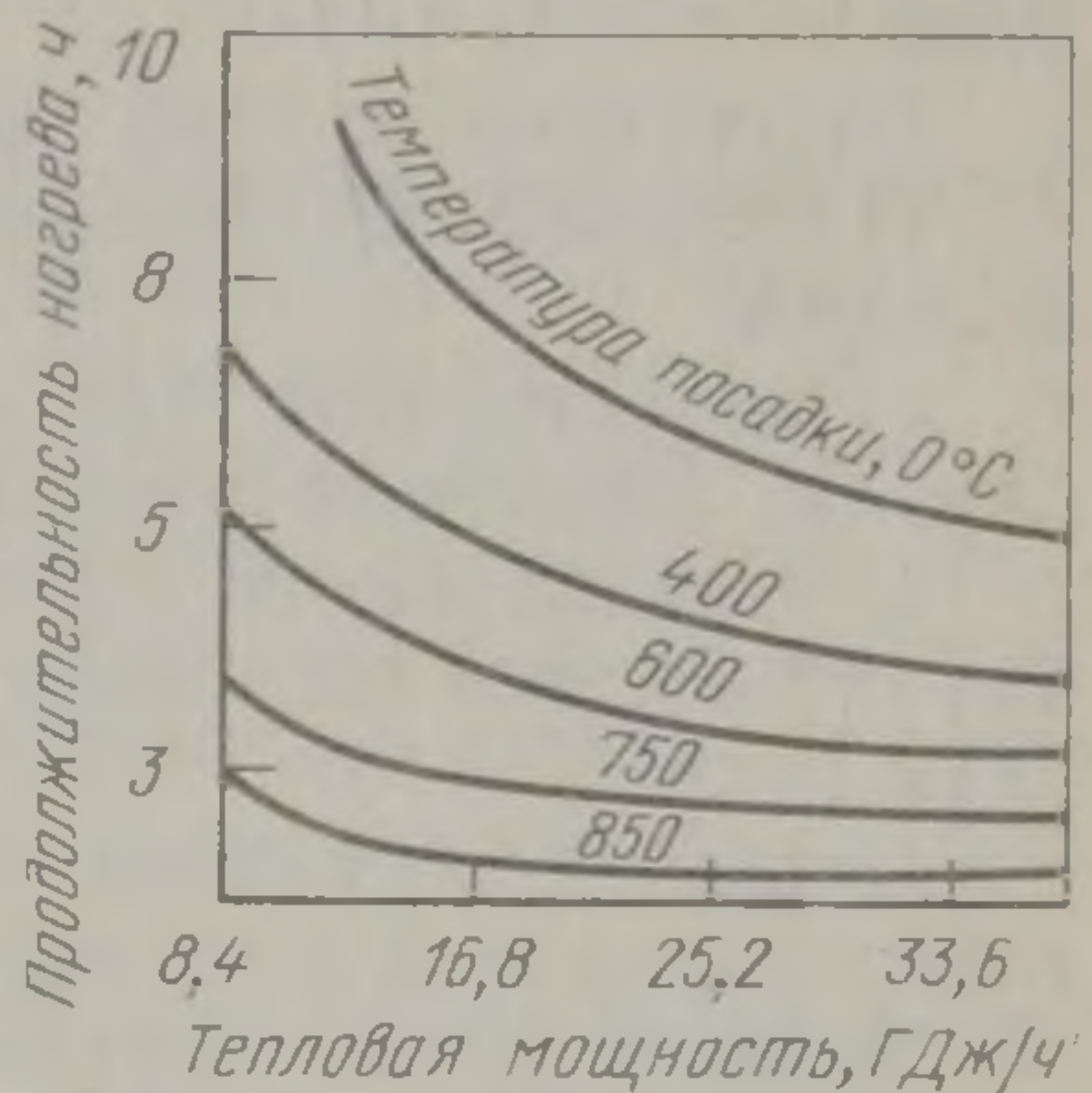


Рис. 27-2. Зависимость продолжительности нагрева от температуры поверхности слитков и тепловой мощности колодца

При сухом шлакоудалении на подину колодца насыпается мелкий коксик, который через 5—6 всадов вместе с окалиной удаляется через специальные лючки. Затем сверху при открытой крышке засыпается и разравнивается новая порция коксика. Вслед за этим металл нагревают вновь.

При жидком шлакоудалении коксик на поду отсутствует; подину выполняют из огнеупорных материалов, не взаимодействующих с окалиной (обычно хромомagneзита); окалина в жидком состоянии удаляется с пода ячейки через специальную летку.

Каждому из этих методов присущи свои недостатки и достоинства.

Недостатки сухого шлакоудаления:

- 1) непроизводительные затраты времени на засыпку и удаление коксика;
- 2) замедленный прогрев и науглероживание донной части слитка, несколько утопленной в коксик;
- 3) необходимость иметь в цехе хранилище для коксика и плохое санитарное состояние цеха (при засыпке коксика поднимается туча пыли);
- 4) крайне отрицательное влияние коксовой пыли на керамику регенераторов и рекуператоров.

Однако сухое шлакоудаление — это единственный метод удаления окалины в таких конструкциях, где невозможно обеспечить жидкотекучесть окалины на поду ячейки. Этим обстоятельством и определяется область применения метода сухого шлакоудаления.

Жидкое шлакоудаление не имеет недостатков, свойственных сухому шлакоудалению; но и оно также не лишено недостатка, заключающегося в том, что при жидком шлакоудалении неравномерно изнашивается подина колодца, и слитки теряют устойчивость. Причем устойчивое стекание шлака через летку возможно только в том случае, если на поду колодца поддерживается достаточно высокая температура, при которой шлак жидкотекуч. Однако в некоторых широко применяемых конструкциях нагревательных колодцев наивысшая температура развивается в верхней части ячейки, а температура на поду не всегда достаточна для того, чтобы шлак стекал должным образом. При этом на поду начинают образовываться бугры окалины, для удаления которых добавляются материалы, снижающие температуру плавления окалины, и интенсивно прогревают пустой колодец с целью удаления скопившегося шлака.

Футеровка и ее служба. В нагревательных колодцах наиболее уязвимы следующие части огнеупорной футеровки:

- 1) подина и нижняя часть стен, поскольку они интенсивно соприкасаются с окалиной и слитками;
- 2) те пояса футеровки стен, на которые опираются слитки;
- 3) футеровка крышки, так как она подвержена действию наиболее высоких температур, колебанию температур и механиче-

скому воздействию в связи с частым открыванием и закрыванием крышки;

4) керамика регенераторов и рекуператоров (особенно верхние ряды), которая работает в тяжелых условиях высоких температур, резкой смены температуры, воздействия газовых потоков, несущих окалину и пыль.

Подину колодцев выкладывают обычно в три слоя: внутренний слой из хромомagneзитового кирпича, средний — шамотный кирпич, внешний теплоизоляционный слой из диатомового кирпича. При сухом шлакоудалении уровень подины по всей площади колодцев одинаков, при жидком — подину выкладывают с уклоном в сторону шлаковой летки.

Стены колодцев также выполняют трехслойными. Внешний слой — теплоизоляционный, затем слой шамотного кирпича. Внутренний слой в нижней части стен (приблизительно на 1 м высоты) выполняют из хромомagneзита, остальное из динаса. Интенсивнее всего стены изнашиваются на том уровне, где опираются слитки. В связи с этим в этом месте выполняют выступ кладки внутрь колодца, который выкладывают из динаса, хромомagneзита, каолинового кирпича. Стойкость выступов из динаса наименьшая.

В настоящее время применяют крышки как с арочной футеровкой, так и с подвесным сводом. И в том, и в другом случае можно применять шамотный кирпич. В последнее время для футеровки крышек все шире используют каолиновый кирпич, который в футеровке крышек значительно более стоек, поскольку обладает большой огнеупорностью и меньшей дополнительной усадкой.

Насадку регенераторов нагревательных колодцев делают двухслойной: верхнюю часть из динаса, нижнюю из шамота.

Керамические рекуператоры, применяемые в нагревательных колодцах, выполняют из восьмигранных трубок. Обычно монтируют 6—8 рядов трубок, из них два верхних и нижний ряды — из карбошамотных трубок, остальные — из шамотных.

При правильно выбранных огнеупорных материалах стойкость огнеупорной футеровки зависит от ряда теплотехнических и технологических факторов, главными из которых являются следующие: температура в колодце, колебания температур в колодце, полнота сгорания топлива, метод шлакоудаления.

Чрезмерное повышение температуры в колодце приводит к снижению стойкости как огнеупорной кладки рабочего пространства, так и насадок регенераторов и рекуператоров. Сильно ускоряют разрушение кладки колебания температуры в рабочем пространстве, связанные с открыванием и, особенно, с охлаждением колодцев перед посадкой холодных слитков. Если не обеспечивается полное сгорание топлива в пределах рабочего пространства, то горение завершается в регенераторах и рекуператорах, что приводит к их быстрому разрушению. При жидком шлакоудалении

кладка в целом изнашивается быстрее, так как для обеспечения удаления шлака в жидком виде приходится повышать температуру в колодцах.

В обычных регенеративных колодцах на 6—8 слитков смену внутреннего слоя стен и подины выполняют через каждые 2,5—3 мес., а полную замену кладки — через 8—9 мес. В газовых регенераторах насадку необходимо сменять через 8 мес, а в воздушных она может служить в течение 2 лет. Для стен и подины рекуперативных колодцев смена внутреннего слоя необходима через 5—6 мес, а полная замена кладки — через 12—18 мес. В рекуператорах насадку следует сменять раз за 1,2—2 года.

Смена футеровки крышек осуществляется через 7—9 мес. В отдельных случаях, чаще всего в регенеративных колодцах, быстро сгорает металлическая рама крышек.

Регенеративные колодцы

На ряде заводов СССР работают регенеративные нагревательные колодцы (рис. 27-3), вмещающие по 6—8 слитков массой 6—7 т. Колодец снабжен двумя парами регенераторов, причем ближайший к рабочему пространству регенератор обязательно газовый.

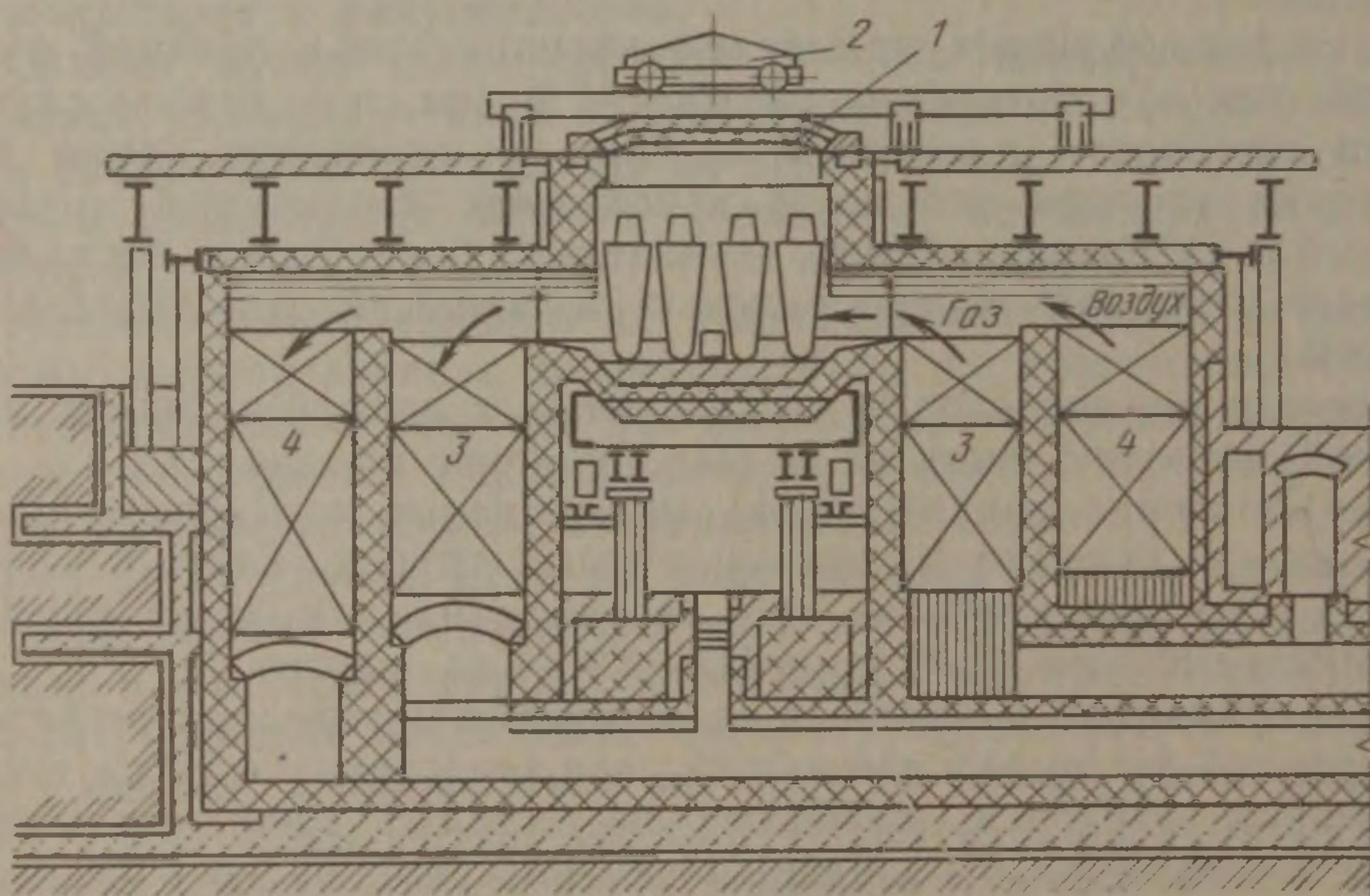


Рис. 27-3. Регенеративные нагревательные колодцы:

1 — крышка; 2 — механизм для перемещения крышки; 3 — газовый регенератор; 4 — воздушный регенератор

Газ и воздух подогреваются примерно до 800 °С. Колодец работает реверсивно. Сначала топливо и воздух поступают с одной стороны и, нагреваясь в регенераторах, попадают в рабочее пространство. Образовавшиеся дымовые газы проходят через другую пару регенераторов и отдают свое тепло огнеупорной насадке. Затем происходит перекидка клапанов, и весь цикл повторяется в обратном

направлении. Металл нагревается до 1200—1250 °С, температура в рабочем объеме колодца составляет 1350—1400 °С.

Общая тепловая мощность подобных колодцев составляет 21—23 ГДж/ч, причем на долю топлива приходится около 65 %, на долю тепла подогрева воздуха и газа — примерно 35 %. Нагревательные колодцы подобного типа могут работать на чистом доменном газе и на смеси коксового и доменного газов.

В регенеративных нагревательных колодцах в каждой группе по четыре ячейки. Большинство нагревательных колодцев работает в значительной мере на слитках горячего посада. При этом температура горячего посада обычно составляет около 750 °С, но иногда достигает и 850—870 °С. Удельная доля слитков горячего посада по отношению к массе всех слитков достигает 95 %. Увеличение температуры и массы горячего посада — один из важнейших резервов повышения производительности нагревательных колодцев и экономии топлива.

Производительность группы регенеративных колодцев рассматриваемой конструкции при 95 % горячего посада с температурой около 780 °С составляет 300 тыс. т/год, а удельный расход тепла 1150—1200 кДж/кг. При увеличении производительности существующих обжимных станков, оборудованных регенеративными колодцами, задача увеличения количества нагреваемого металла может быть решена двумя способами: либо достройкой недостающих групп колодцев, либо реконструкцией существующих ячеек.

На одном из отечественных заводов при реконструкции регенеративных колодцев для увеличения емкости ячейки длину рабочего пространства увеличили с 4 м сначала до 5,7, а затем до 7,9 м (рис. 27-4). Проведенные исследования показали, что равномерность нагрева слитков, угар металла и удельный расход тепла остались на одном и том же уровне. Увеличение длины рабочего пространства позволило увеличить садку с 76 до 113 т и повысить производительность на 24 %. При этом необходимое повышение тепловой нагрузки составило 25—30 %.

В регенеративных колодцах горение топлива развивается в нижней части колодца, поэтому температура около подины достаточно высокая и надежно осуществляется жидкое шлакоудаление.

В нагревательных колодцах регенеративного типа крайне несовершенна система сжигания топлива, что влечет за собой существенные недостатки:

- 1) горение топлива практически начинается над газовыми регенеративными насадками, через которые подается топливо, протекает в рабочем пространстве и заканчивается в противоположных насадках. Это приводит к неравномерности нагрева садки металла, так как слитки, расположенные ближе к регенераторам, нагреваются значительно быстрее, чем слитки в средней части рабочего пространства;

2) для автоматизации теплового процесса печи необходимо правильно выбрать в рабочем пространстве такую точку, по изменению температуры в которой можно строить процесс автоматизации. В регенеративных колодцах надежно выбрать такую точку невозможно, поскольку в результате перекидки клапанов

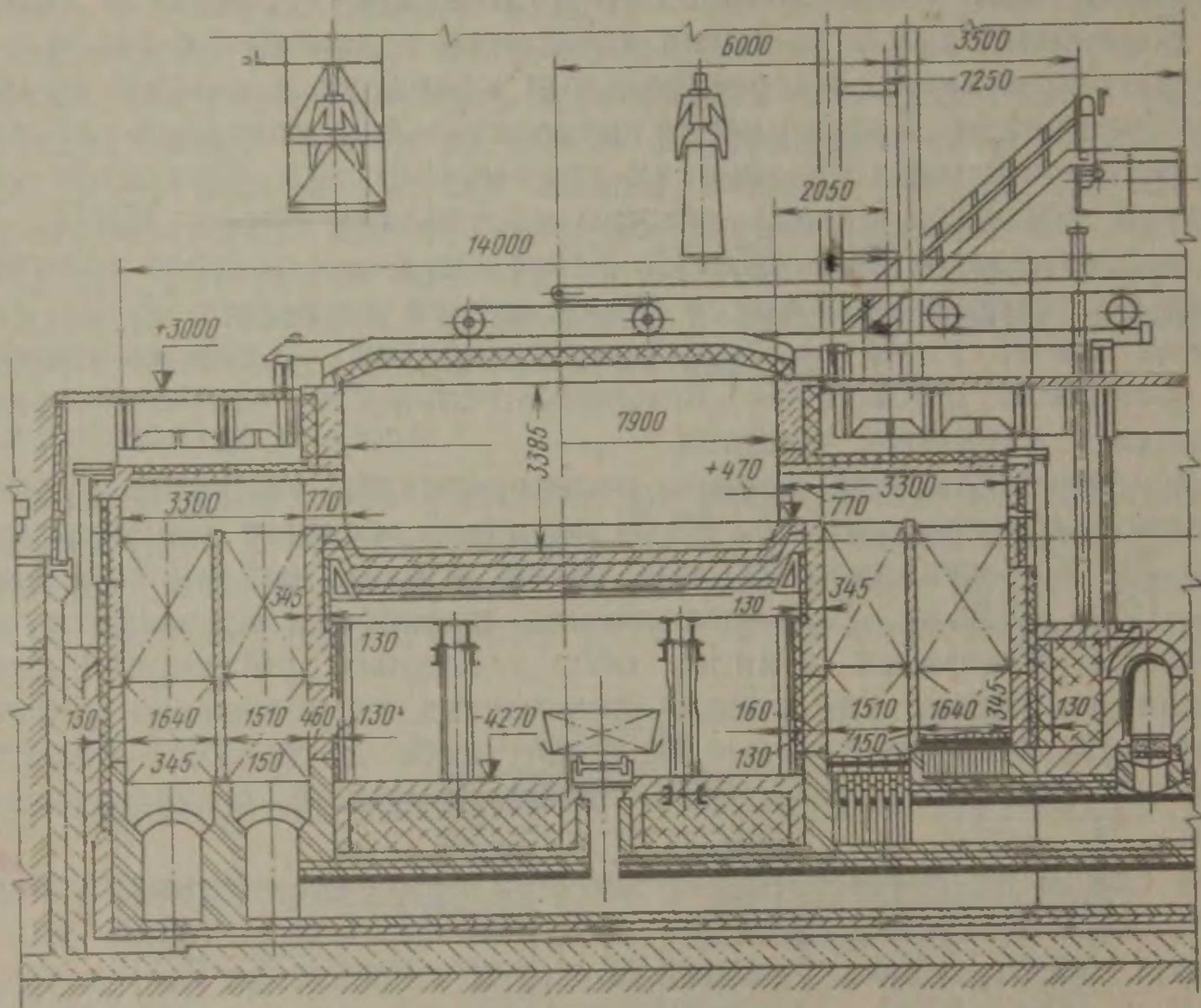


Рис. 27-4. Реконструированные регенеративные нагревательные колодцы

и плохого смешения газа и воздуха температура может все время изменяться по всей длине рабочего объема колодца, причем возможны и случайные колебания температур.

Рекуперативные колодцы

Колодцы с отоплением из центра подины. Такие колодцы (рис. 27-5) широко применяют для нагрева слитков перед прокаткой на блюминге производительностью около 2,5 млн. т/год. Они достаточно надежны в эксплуатации, отапливают их смешанным коксо-доменным газом с теплотой сгорания 5800—8400 кДж/м³ при помощи горелки, расположенной в центре пода. Группа состоит из двух ячеек. В каждую ячейку помещается по 12—16 слитков квадратного сечения.

Колодцы оборудованы керамическими рекуператорами из всьмигранных карбошамотных трубок для подогрева воздуха до 800—850 °С. Воздух, пройдя через рекуператоры, поступает к горелке с двух сторон по сборным каналам. Газ подается в горелку

по специальной трубе снизу вверх, поэтому факел направлен снизу вверх. Продукты сгорания удаляются из рабочего пространства через специальные окна и, пройдя через рекуператор, уходят в дымовую трубу.

Рекуперативные колодцы с отоплением из центра пода в настоящее время работают на 90—95 % горячего посада, обеспечивая при этом производительность одной группы около 220—270 тыс. т/год. Удельный расход тепла на нагрев металла соста-

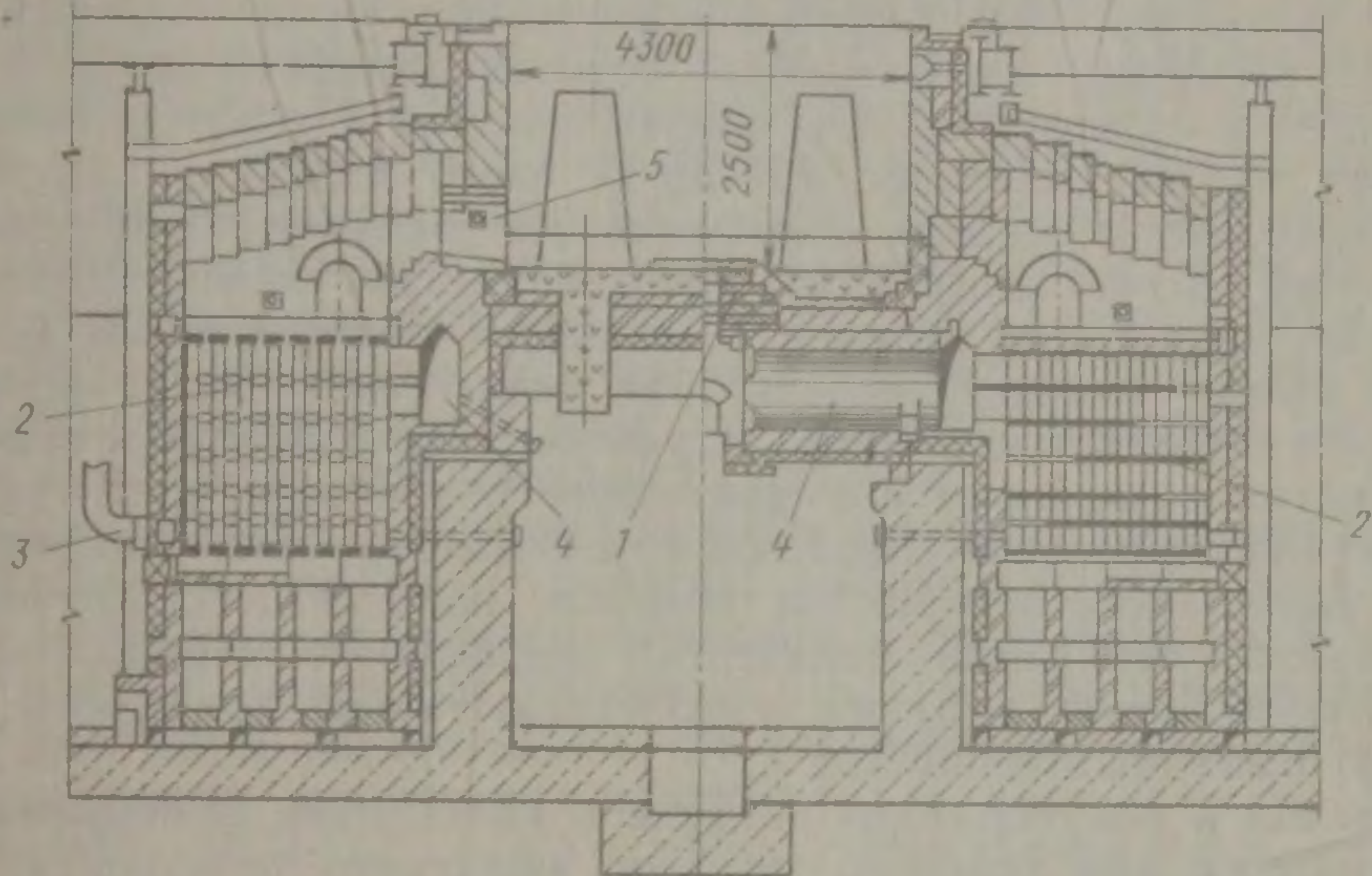


Рис. 27.5. Рекуперативные колодцы с отоплением из центра пода:

1 — горелка; 2 — рекуператор; 3 — подвод холодного воздуха; 4 — канал для подвода горячего воздуха; 5 — каналы для отвода дымовых газов из рабочего пространства колодца

вляет 1100—1200 кДж/кг. Процесс нагрева металла в этих колодцах можно автоматизировать. Импульсную точку выбирают на одной из боковых стен в зоне наиболее высоких температур, т. е. несколько выше верхней кромки слитка. Тепловая мощность колодцев составляет 21,0—29,0 ГДж/ч.

Качество нагрева металла в рекуперативных колодцах с отоплением из центра пода выше, чем в регенеративных колодцах, но все-таки недостаточно. Вследствие вертикального расположения факела зона наибольших температур создается в верхней части рабочего пространства, что приводит к перегреву верхней части слитка при недостаточном нагреве его основания. Перепад температур по высоте рабочего пространства достигает 100 °С и более, что вызывает неравномерность нагрева слитка по высоте. Однако положительным является то, что все слитки, входящие в садку, греются почти одинаково.

Общая площадь рекуператора нагревательных колодцев составляет около 400 м². В рекуператоре шесть рядов трубок. Два

нижних и два верхних ряда — из карбошамотных трубок, средние ряды — из шамотных.

Характеристика работы рекуператоров

Температура дымовых газов на входе в рекуператор, °С	1200—1250
Скорость, м/с:	
воздуха	1,5
дымовых газов	0,7—1

Воздух в рекуператор поступает обычно под давлением, в результате чего между воздушной и дымовой сторонами рекуператора возникает значительный перепад давлений (до 200 Па) и создается возможность для утечки воздуха в дымовые каналы. Утечка иногда достигает 40—50 % всего воздуха, поданного в рекуператор. Низкая герметичность рекуператоров сильно влияет на работу колодцев, так как в результате утечек количество воздуха, достигшего горелки, становится недостаточным и, что очень важно, неопределенным. При недостатке воздуха топливо не сгорает полностью в пределах рабочего пространства и поэтому становится возможным его дожигание в рекуператоре, что вызывает разрушение рекуператора и дальнейшее увеличение утечек. При уменьшении количества воздуха, попадающего в ячейку, приходится сокращать количество подаваемого топлива, т. е. снижать тепловую нагрузку, а это в свою очередь приводит к снижению производительности.

Подача в рекуператоры воздуха в количестве, превышающем необходимое для горения, не дает желаемого результата, поскольку увеличение количества воздуха требует соответствующего повышения его давления. Чтобы уменьшить утечку воздуха, следует стремиться к снижению гидравлического сопротивления на воздушном пути и уменьшению неплотностей, для чего необходимо применять специальные приемы сборки рекуператора, а при эксплуатации исключить термические удары. Во избежание термических ударов предусматривают блокировку крышки нагревательного колодца и шиберов, установленного в дымовом борове, которая обеспечивает закрытие шиберов при открывании крышки колодца и препятствует попаданию холодного воздуха в трубы рекуператора.

Ненадежная (в смысле герметичности) работа рекуператоров наряду с высокой стоимостью сооружения является, пожалуй, самым большим недостатком этих нагревательных колодцев. Поэтому предпринимают различные попытки уменьшить и стабилизировать во времени утечку воздуха, что необходимо для автоматизации теплового режима. Герметичность рекуператоров зависит также от состояния дымовых каналов. Трубки засоряются частицами окалины и коксика, захватываемыми дымовыми газами. Поскольку трубка верхнего ряда рекуператора нагревается до весьма высоких температур, эти частицы прилипают к керамике, постепенно сечение для прохода дыма все больше и больше суживается.

вается. В результате этого возрастают сопротивление дымового тракта и утечка воздуха. Особенно сильно засоряются трубки рекуператора, когда колодцы работают при сухом шлакоудалении и когда в рекуператор попадает много коксовой пыли, причем засорение трубок не только увеличивает утечку воздуха, но и ухудшает его подогрев в рекуператоре. Все это заставило отказаться от сухого шлакоудаления.

Однако на колодцах с отоплением из центра пода применять жидкое шлакоудаление сложнее, чем на регенеративных колодцах. Это объясняется тем, что в регенеративных колодцах при горизонтальном направлении факела на подду поддерживается температура 1400—1450 °С, достаточная для получения жидкотекучести шлака. В колодцах с отоплением из центра пода в верхней части температура достигает 1370—1400 °С, а внизу 1290—1320 °С. При этой температуре шлак только размягчается; чтобы он стал жидкотекучим, необходимо внести на подину специальные разжижающие материалы. На некоторых заводах в качестве таких материалов используют шлак от сжигания твердого топлива, кварцевый песок, бой динасового кирпича.

Переход на жидкое шлакоудаление позволяет увеличить производительность ячейки и сократить расход топлива, однако при этом резко возрастает число ремонтов, а следовательно, и удельный расход огнеупоров. Колодцы при жидком шлакоудалении работают более форсированно, что увеличивает толщину окалины и возможность оплавления слитков.

Колодцы с верхним отоплением. Такие нагревательные колодцы бывают двух типов: с двумя верхними горелками и с одной верхней горелкой.

В последние годы строят колодцы только с одной верхней горелкой, которые удовлетворяют новым требованиям, возникшим в связи с увеличением производительности блюмингов до 6 млн. т/год и более.

Конструкция колодцев представлена на рис. 27-б. Колодец вытянутой формы, шириной 2,2—2,5 м. В ячейку помещают в два ряда 14 слитков массой по 7—8 т. Каждая группа колодцев включает чаще всего 2 или 4 ячейки. Тепловую нагрузку в колодцах поддерживают около 38—42 ГВт; удельный расход тепла составляет 1300—1350 кДж/кг. Поскольку на подду этих колодцев температура относительно низкая, применяют сухое шлакоудаление. Производительность колодцев на группу из двух ячеек несколько меньше (200—220 тыс. т/год), чем колодцев с отоплением из центра пода. Это объясняется особенностями их тепловой работы.

Колодец отапливают газообразным топливом при различной степени подогрева воздуха. Выходные скорости в горелке должны быть подобраны так, чтобы кинетической энергии струй было достаточно для проталкивания газов от горелки до дымоотборного окна по петлеобразной траектории. Плохое смешение топлива

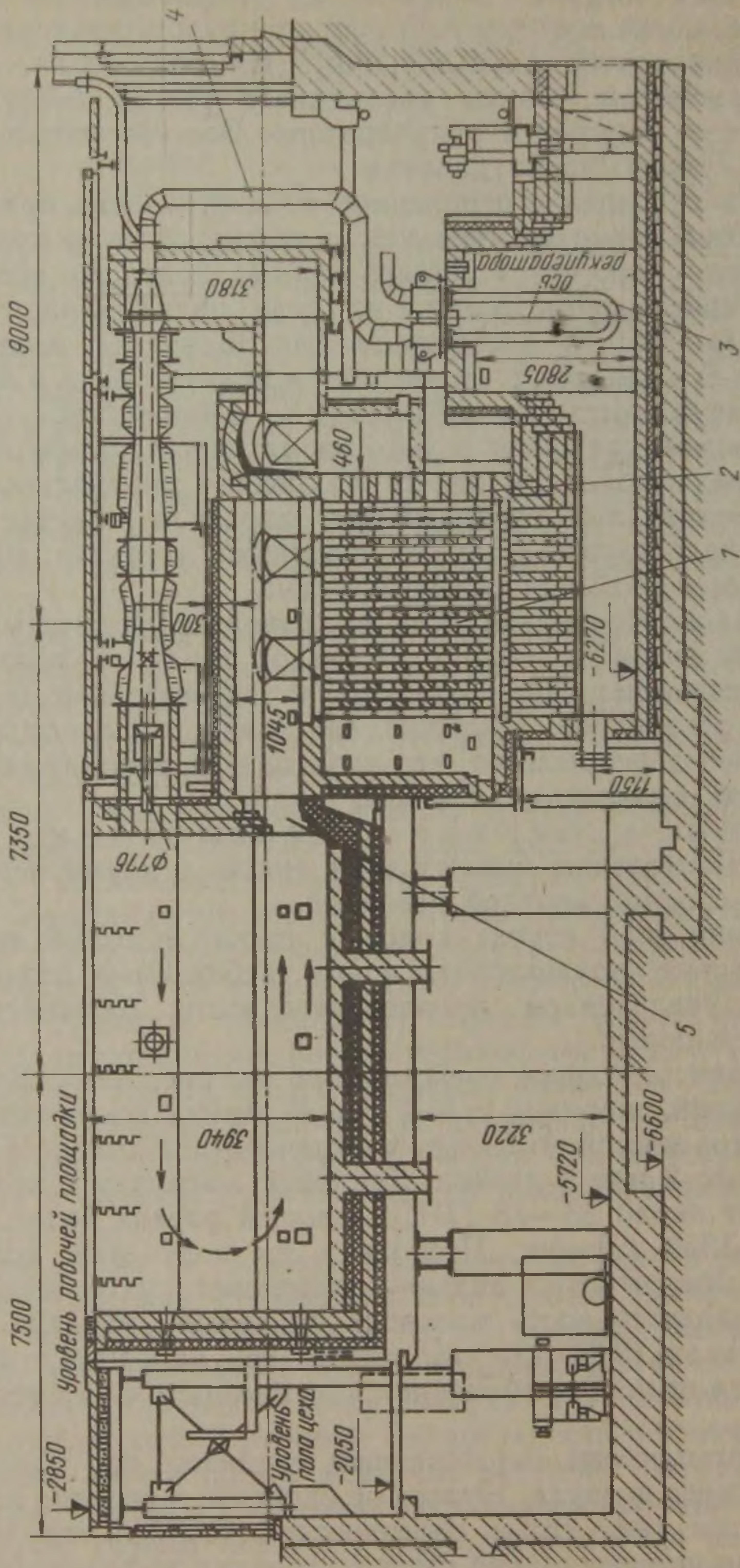


Рис. 27-6. Нагревательный колодец с одной верхней горелкой:
 1 — керамический рекуператор; 2 — каналы для холодного воздуха; 3 — каналы для газов из рабочего пространства колодца
 воздуха; 5 — каналы для удаления дымовых газов из рабочего пространства колодца

и воздуха приводит к тому, что наибольшая температура развивается около стены, противоположной горелке; на этой стене и выбирают импульсную точку для автоматизации теплового режима. Причем раньше других нагреваются слитки, находящиеся около этой стены.

Когда температура в импульсной точке достигает заданного значения, то во избежание ее дальнейшего повышения расход топлива снижается и кинетическая энергия струй топлива и воздуха уменьшается. Это приводит к тому, что газы уже не достигают противоположной стенки и двигаются по прогрессивно укорачивающейся петле.

Таким образом, процесс нагревания садки протекает неравномерно, затягивается, поэтому производительность группы, состоящей из двух ячеек таких колодцев, меньше производительности колодцев с отоплением из центра пода. Однако колодцы с одной верхней горелкой более компактны и при одной и той же общей длине отделения нагревательных колодцев их можно установить несколько больше, чем колодцев с отоплением из центра пода.

Нагревательные колодцы с одной верхней горелкой обеспечивают наивысшую производительность на 1 м длины отделения. Однако при их использовании возникают значительные трудности с подогревом воздуха, которые заключаются в том, что вследствие узкой, удлиненной формы рабочего пространства приходится и рекуператор выполнять такой же формы. При этом создается высокое сопротивление на пути движения воздуха, для преодоления которого требуется весьма высокое давление. Кроме того, как было указано выше, горелка должна создавать достаточно длинный факел, для чего также необходим определенный запас давления (500—600 Па).

Необходимость значительного давления воздуха перед рекуператором приводит к возникновению большой утечки воздуха. Высокой герметичности можно достичь, если применять металлические рекуператоры, существующие же металлические рекуператоры не обеспечивают высокой температуры подогрева воздуха.

При использовании керамического рекуператора возможны два способа подачи воздуха из рекуператора к горелке:

1) с помощью эксгаустера из жароупорного материала. Воздух просасывается через рекуператор и возможность утечки практически устраняется. Однако в этом случае температура подогрева воздуха ограничивается 400—450 °С, так как при более высокой температуре существующие эксгаустеры работать не могут;

2) с помощью инжектора (см. рис. 27-6). Инжектирующей средой служит воздух высокого давления (20—40 кПа), количество которого составляет 25—30 % общего расхода и который подогревается в металлическом трубчатом рекуператоре до 250—350 °С. В этом случае температура воздуха перед горелкой составляет 650—700 °С. Если для инжектирования применять компрессорный

воздух (5—7 % общего расхода), то температура воздуха перед горелкой составит 700—800 °С.

Определение количества нагревательных колодцев. Продолжительность нагрева слитков является главным фактором, от которого зависит производительность нагревательных колодцев. При нагреве холодных слитков применяют трехступенчатый режим нагрева, состоящий из периодов предварительного нагрева, ускоренного нагрева и выдержки. В течение периода предварительного нагрева скорость повышения температуры металла поддерживается таким образом, чтобы в нем не возникли чрезмерные температурные напряжения. После достижения 500—550 °С, когда металл уже приобретает необходимые пластические свойства, начинается период ускоренного нагрева, который заканчивается после того, как поверхность слитков достигнет конечной температуры нагрева. В течение последующей выдержки практически при постоянной температуре поверхности происходит выравнивание температуры по сечению слитка.

По условиям работы нагревательных колодцев расчет продолжительности нагрева металла в них выполняют при граничных условиях II рода, причем принимают независимость теплового потока от времени ($q = \text{const}$). Если обратиться к рис. 27-1, то можно видеть, что перепад температур в колодце и на поверхности слитка изменяется незначительно. Это обстоятельство и является принципиальной основой применения метода расчета нагрева металла при $q = \text{const}$, поскольку тепловой поток прежде всего зависит от разности температур печи и металла. Однако надо заметить, что строгого соблюдения условия $q = \text{const}$ в колодцах, конечно, нет и расчеты, выполненные этим методом, совершенно необходимо корректировать по практическим данным (табл. 27-1).

Т а б л и ц а 27-1. Продолжительность нагрева и производительность рекуперативных нагревательных колодцев с отоплением из центра подины (садка — 14 слитков)

Параметры	Сталь			
	среднеуглеродистая		малоуглеродистая	
Температура поверхности слитков при посадке, °С	20	800	20	800
Продолжительность нагрева, ч—мин	9—10	3—3,5	7—8,0	3—3,2
Производительность одной ячейки, т/ч	10,3	26,2	12,5	29,6

Необходимо отметить, что увеличение садки металла обычно приводит к увеличению продолжительности его нагрева, поэтому существует оптимальная садка, при которой обеспечивается наибольшая производительность колодцев.

Средняя производительность одной группы колодцев при нагреве одинаковых слитков, т/ч:

$$P = n \frac{G}{t_{\text{п}} + t_{\text{н}} + t_{\text{в}} + t_{\text{ш}}} m,$$

где $t_{\text{п}}$, $t_{\text{н}}$, $t_{\text{в}}$, $t_{\text{ш}}$ — соответственно продолжительность посадки слитков, нагрева слитков, выдержки слитков и уборки шлаков, ч; n — число ячеек в одной группе, шт.; G — масса садки одной ячейки, т; m — коэффициент, учитывающий простой колодцев на ремонт. Обычно простой колодцев составляют 15 %, поэтому принимают $m = 0,85$.

Если в колодцах нагревают слитки различной массы, марок стали и температуры посада, то их среднюю производительность можно определить по формуле

$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{a/P_1 + b/P_2 + c/P_3 + \dots + n/P_n},$$

где a , b , c , ..., n — доля слитков данной массы, марки стали, и температуры посада в программе нагревательных колодцев; P_1 , P_2 , P_3 , ..., P_n — производительность группы колодцев при нагреве слитков одного типа, подсчитанная по формуле, приведенной выше.

Зная часовую производительность обжимного стана и среднюю часовую производительность группы колодцев, легко определить необходимое число группы колодцев.

П л а н и р о в к а п р о л е т о в н а г р е в а т е л ь н ы х к о л о д ц е в. Рациональная планировка — очень важная и ответственная задача. При увеличении годовой производительности обжимных станов, которая составляет 4—5 млн. т/год, а в ближайшие годы будет доведена до 6—7 млн. т/год, часовая производительность будет измеряться величиной 600 т/ч, а прокатка одного слитка будет занимать около 50 с. При таком темпе прокатки все операции по подаче слитка к стану должны выполняться за отрезок времени, не превышающий 50 с. К этим операциям относятся следующие: захват слитка краном, перенос слитка к слитковозу и установка на нем слитка, разгон и пробег слитковоза, а также торможение слитковоза перед приемным рольгангом и перегрузка на него слитка.

Наиболее распространена схема планировки с продольным расположением нагревательных колодцев (рис. 27-7). Причем применяют один или два слитковоза (рис. 27-7, а). При такой схеме время пробега слитковоза составляет важную часть общего времени, затрачиваемого на подачу одного слитка. Для уменьшения этого времени при приблизительно постоянной скорости движения слитковоза (~ 7 м/с) целесообразно применять такие нагревательные колодцы, которые обеспечивают наибольшую производительность на 1 м длины пролета. Такими конструкциями являются колодцы с одной верхней горелкой.

Однако применение такой схемы планировки вследствие длительного пути пробега слитковоза не позволяет обеспечить слитками обжимные станы производительностью более 3 млн. т/год. В настоящее время для высокопроизводительных станов разработана схема продольного расположения отделения нагревательных колодцев с несколькими слитковозами, движущимися по кольцевому пути (рис. 27-7, б). Эта схема может обеспечить любой цикл прокатки. Поскольку путь слитковоза кольцевой,

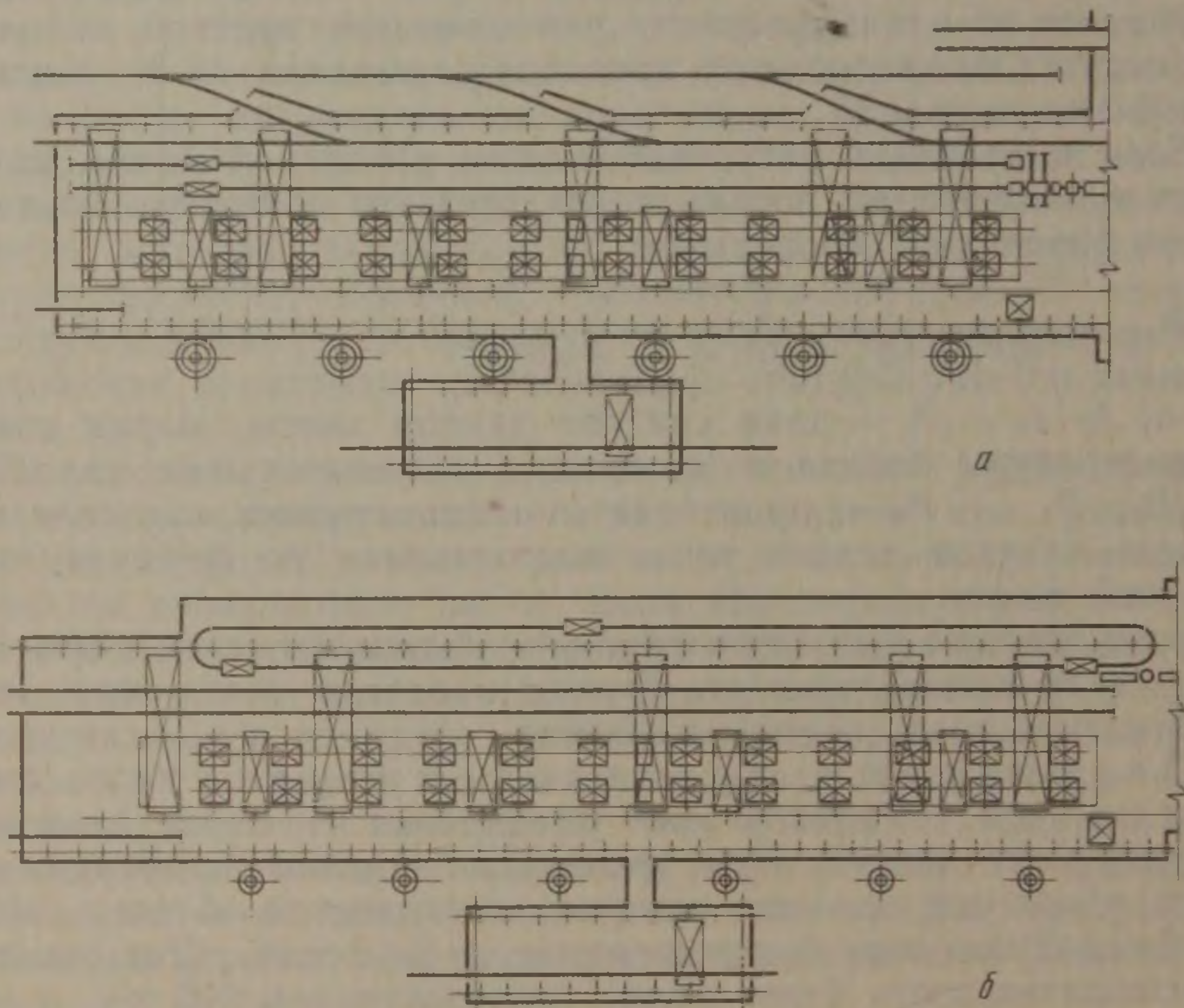


Рис. 27-7. Планировка пролета нагревательных колодцев:
 а — при продольной подаче слитков двумя слитковозами; б — при кольцевой подаче слитков

то для подобной схемы планировки производительность нагревательных колодцев в расчете на 1 м длины пролета решающего значения уже иметь не будет. Выбор конструкции колодцев определяется качеством нагрева металла и экономическими соображениями. Экономическими показателями для сравнения нагревательных колодцев различных типов являются стоимость сооружения и эксплуатации. Стоимость сооружения рекуперативных колодцев значительно ниже.

Сравнение различных нагревательных колодцев по эксплуатационным показателям приведено в табл. 27-2.

Из приведенных данных видно, что как по капитальным затратам на строительство, так и по эксплуатационным показателям рекуперативные колодцы с одной верхней горелкой являются наиболее предпочтительными.

Т а б л и ц а 27-2. Основные (приближенные) показатели работы нагревательных колодцев различного типа

Показатели	Тип колодцев		
	регенеративные	рекуперативные с центральной горелкой	рекуперативные с одной верхней горелкой
Средняя продолжительность одной группы, тыс. т/год	320	230	340
Число нагреваемых садок в год . .	1425	1360	870
Удельный расход тепла, кДж/кг . .	1170	1150	1320
Простой колодцев на ремонтах, % к календарному времени	4,35	3,77	3,98
Удельный расход огнеупоров на 1 т всада, кг/т	1,81	1,85	1,27

3. Печи для нагрева блюмов и слябов

Общая характеристика

Блюмы и слябы перед дальнейшей прокаткой на рельсобалочных, сортовых, листовых и других станах нагревают до температуры прокатки почти исключительно в нагревательных проходных печах различного типа. Наряду с тепловым и температурным режимами определяющее значение для работы этих печей имеет метод транспортирования металла через печь. Толкательные противоточные печи широко применяются для нагрева прямоугольной заготовки. В таких печах лежащие на поду и соприкасающиеся друг с другом заготовки задаются и перемещаются в печи при помощи специального механизма-толкателя. Выдача металла из печи может быть торцовой и боковой. При торцовой выдаче функции выталкивателя выполняет толкатель: задавая очередную заготовку в печь, он перемещает все заготовки и выталкивает ближайшую к окну выдачи заготовку. При боковой выдаче применяют специальный выталкиватель. Преимуществом толкательных печей является то, что проталкивание — наиболее простой и дешевый метод транспортирования металла через печь. Основные недостатки данного метода заключаются в следующем:

1) при перемещении заготовки трутся друг о друга и о подину, что ухудшает качество поверхности металла;

2) при движении заготовок образовавшаяся окалина осыпается и создается возможность дополнительного окисления;

3) осыпающаяся окалина попадает на под печи, реагирует с материалом пода, в результате чего на подине образуются бугры, препятствующие нормальному проталкиванию металла, и возникает проблема удаления окалины;

4) печь не может быть без специальных мер освобождена от металла в случае остановки стана, ремонта или с целью проведения работы по удалению окалины;

5) современные печи выполняют весьма широкими (≤ 12 м), что крайне затрудняет операцию удаления окалины (осуществляемую фактически вручную);

6) в толкательных печах без взгорбливания возможно проталкивание не более чем 200—250 квадратных заготовок, что ограничивает размеры и производительность печей.

Все эти недостатки толкательных печей в условиях непрерывно возрастающей производительности станов и увеличения длины заготовок до 14 м и более привели к необходимости создания печей с механизированным подом, свободных от большинства из этих недостатков (печи с роликовым подом и с шагающим подом или шагающими балками)¹.

Печи с роликовым подом представляют собой весьма совершенную и перспективную конструкцию проходных печей с механизированным подом. Они удачно komponуются в линиях поточного производства, поскольку роликовый под может быть продолжением цехового рольганга. Их широко применяют при термической обработке металла. Использование таких печей для высокотемпературного нагрева перед прокаткой несколько сдерживается недостаточной стойкостью роликов (особенно при необходимом увеличении ширины печей) и большими потерями тепла с охлаждающей водой.

Печи с шагающими подом или балками также весьма перспективны. Они свободны от недостатков, присущих толкательным печам. В толкательных печах металл в лучшем случае может нагреваться с двух сторон, тогда как в печах с шагающим подом нагрев металла происходит как минимум с трех сторон. Кроме того, в печах с шагающим подом легко менять режим нагрева, что является большим преимуществом в случае частой смены сортамента нагреваемого металла.

Однако печи с шагающим подом сравнительно дороги: капитальные затраты на их сооружение на 40—45 % выше, чем для толкательной печи аналогичной производительности. Сравнивая их с роликовыми печами, надо отметить, что масса оборудования печей с шагающими балками на 1 м² площади пода на 40 % больше, чем роликовых печей. Затворы, применяемые на этих печах, не обеспечивают полной герметизации и в печь снизу попадает воздух.

Важным вопросом является выбор типа и числа печей в соответствии с сортаментом металла и производительностью стана. Размеры и производительность толкательной печи в значительной степени определяются предельным числом заготовок (200—250 шт.), которые проталкиваются без взгорбливания. Минимальный цикл выдачи металла из печей, обслуживающих мелкосортные

¹ Разделение печей на печи с шагающим подом и балками весьма условно: в первом случае это печи с односторонним отоплением, во втором — с двусторонним.

станы, составляет 8—10 с. Для заготовки размерами 80 × 80 мм, длиной 12 м в соответствии с этим циклом выдачи производительность печи составит $(3600/10) \cdot 0,08 \cdot 0,08 \cdot 12 \cdot 7800 = 216$ т/ч.

Однако по условиям проталкивания печь не может обеспечить такую производительность. Если принять, что будет проталкиваться 250 заготовок, то длина печи составит $250 \times 0,08 = 20$ м. Активная площадь пода при этом будет равна $20 \cdot 12 = 240$ м². При достижимом напряжении активного пода 550 кг/(м²·ч) производительность печи будет $0,55 \cdot 240 = 132$ т/ч.

Таким образом, поскольку активная длина толкательной печи зависит от числа заготовок, которое всегда приблизительно одинаково, и от ширины заготовки, постольку производительность толкательной печи линейно зависит от геометрического размера заготовки.

В печах с шагающим подом дело выглядит иначе. Эти печи не имеют ограничения по длине, связанного с числом нагреваемых заготовок, но минимальный цикл выдачи в них равен 15—20 с. Поэтому производительность таких печей при неизменном цикле выдачи зависит лишь от массы нагреваемой заготовки, т. е. зависит квадратично от ее геометрического размера. Сравнительные данные по производительности толкательных печей и печей с шагающими балками приведены на рис. 27-8, из которого видно, что если используют заготовки размерами до 80 × 80 мм, то более производительны толкательные печи, а если заготовки крупнее, то выше производительность печей с шагающим подом.

Наиболее ответственной частью футеровки проходных нагревательных печей являются участки монолитного пода, футеровка элементов шагающего пода, т. е. все элементы футеровки, подверженные воздействию окалины при достаточно высокой температуре (1200—1250 °С), при которой окалина может активно взаимодействовать с огнеупорными материалами. В силу этого верхние слои таких участков футеровки печи обычно выполняют из хромомгнезита, магнезитохромита и талькового кирпича — материалов, не взаимодействующих с окалиной. Есть положительный опыт выполнения монолитного пода из электроплавленого корунда (93 % Al₂O₃): к кладке пристает сравнительно небольшое количество окалины, а образующиеся бугры ее легко счищаются. Подину обычно выполняют трехслойной: 1) из хромомгнезита (или другого окалиностойкого материала); 2) из шамота класса Б; 3) из диатомитового кирпича.

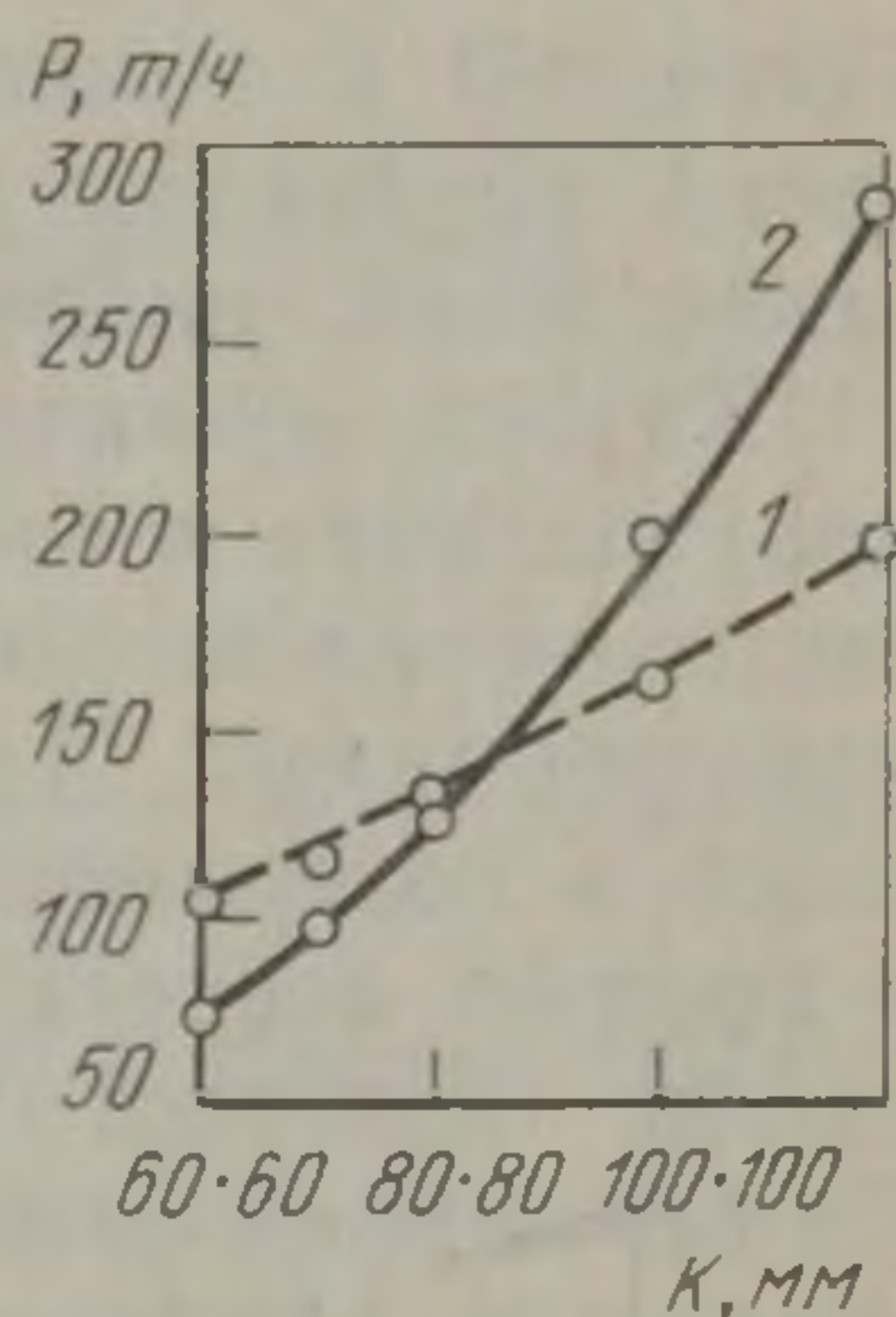


Рис. 27-8. Зависимость производительности нагревательных печей от размера K заготовки:
1 — толкательная печь;
2 — печь с шагающим подом

В печах с нижним обогревом под также делают трехслойным (хромомagnesит, шамот, диатомит).

Своды печей выполняют арочными и подвесными. В качестве огнеупорного материала чаще всего используют шамот класса А и каолиновой кирпич. Стены печей выкладывают в низкотемпературных зонах двухслойными (из шамота класса Б и диатомита), в высокотемпературных зонах — трехслойными (из шамота класса А или каолина, шамота класса Б, диатомита).

Тепловой режим и отопление печей

Тепловой и температурный режимы проходных нагревательных печей неизменны во времени. Однако температура по длине печи может быть неизменна, но может и значительно меняться.

Режим работы печей, при котором температура в рабочем пространстве практически неизменна, называется камерным. Если температура по длине печи переменна, то такой режим называется методическим. Характер изменения температуры раскаленных газов и поверхности нагреваемого металла по длине печи зависит в первую очередь от характера взаимного движения газов и металла, который может быть противоточным и прямоточным. Прямоточный режим допустим практически только при нагреве тонких в тепловом отношении заготовок. Печи с прямоточным движением теплоносителей встречаются пока сравнительно редко. На противоточном режиме в настоящее время работает подавляющее большинство проходных нагревательных печей. Остановимся подробнее на их тепловом и температурном режимах.

Выше отмечалось, что при нагреве в металле возникают температурные напряжения, которые не должны превышать максимально допустимых. Температурные напряжения пропорциональны перепаду между температурами поверхности и центра металла. Чем выше температура в печи, в которую попадает холодный металл, тем быстрее растет температура поверхности металла. Если нагревается тело массивное в тепловом отношении, то резкое повышение температуры поверхности может быть причиной возникновения чрезмерного температурного перепада. Поэтому массивные изделия нагревают сравнительно медленно, постепенно (методически), до тех пор, пока они не приобретут необходимых пластических свойств, т. е. до 500 °С.

Этим и вызвано использование методического температурного режима работы печей (рис. 27-9). В зоне I (методической) происходит постепенный нагрев металла; в зоне II (сварочной) — нагрев металла до тех пор, пока его поверхность не достигнет конечной температуры нагрева; в зоне III (томильной) при неизменной температуре поверхности осуществляется выравнивание температуры по толщине металла. Следует одновременно с этим заметить, что температура печи в месте загрузки металла существенно влияет на производительность печи. Вызвано это тем, что чем выше разница температур между печью и металлом, тем

больше тепла он поглощает и тем быстрее нагревается. Поэтому нередко в существующих печах, стремясь увеличить производительность, принимают различные меры для повышения температуры в зоне посадки металла выше 850—900 °С.

Для нагрева заготовок, которые по своим размерам и свойствам ближе к тонкому телу, чем к массивному (например, слябы), созданы печи, работающие по режиму, занимающему промежуточное положение между камерным и методическим (см. рис. 27-9). Чтобы обеспечить общий подъем температурного уровня, в печи выполняют две сварочных зоны, в каждой из которых происходит сжигание топлива. Назначение зоны III при этом сохраняется.

При нагреве заготовок, тонких в тепловом отношении, используют камерный режим, при котором поддерживается практически одинаковая температура по всему рабочему пространству. Обеспечение того или иного температурного режима работы печей достигается выбором метода отопления и соответствующего расположения горелочных устройств и дымоотводящих каналов. Для обеспечения камерного режима необходимо горелки (форсунки) и дымоотборные каналы равномерно распределить по длине рабочего пространства.

Методический режим нагрева металла имеет место в тех случаях, когда при встречном движении металла и дымовых газов горелочные устройства располагают на одном конце рабочего пространства в зоне интенсивного нагрева металла, а дымоотборные каналы — на другом, где металл загружается в печь. При этом дымовые газы будут постепенно остывать, отдавая тепло металлу, температура которого будет постепенно повышаться.

Выбор режима отопления определяет, по существу, изменение температуры по длине печи при любом методе транспортировки металла. Нельзя утверждать, что метод транспортировки металла не оказывает влияния на интенсивность его нагрева и, как следствие, на температуру в печи. Это влияние, конечно, имеет место. Однако выбор метода отопления оказывает решающее влияние на температурный режим проходной нагревательной печи. В крупных проходных нагревательных печах прокатных цехов заводов черной металлургии наибольшее распространение имеют торцевое и сводовое отопление печей.

При торцевом отоплении (рис. 27-10) характер изменения температуры по длине печи определяет число и назначение ее зон. Металл поступает в зону наиболее низких температур и, продви-

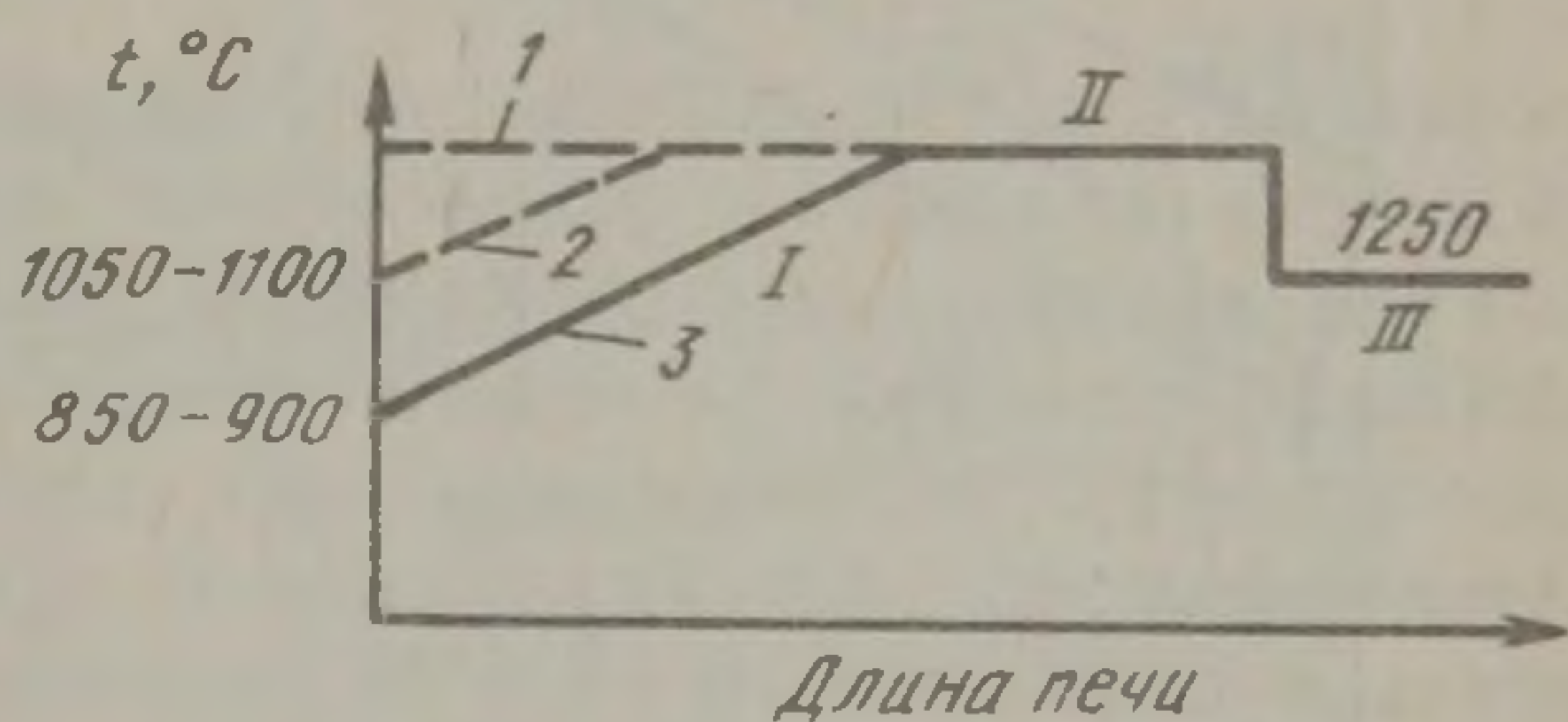


Рис. 27-9. Температурные режимы нагревательных печей:

1 — камерный; 2 — промежуточный; 3 — методический

гаясь навстречу дымовым газам, температура которых все повышается, постепенно (методически) нагревается. Методические печи по числу зон нагрева металла могут быть двух-, трех- и многозонными с односторонним и с двусторонним нагревом металла. Рассмотрим назначение зон на примере трехзонной печи.

Методическая зона — первая (по ходу металла) с изменяющейся по длине температурой. В этой зоне металл постепенно

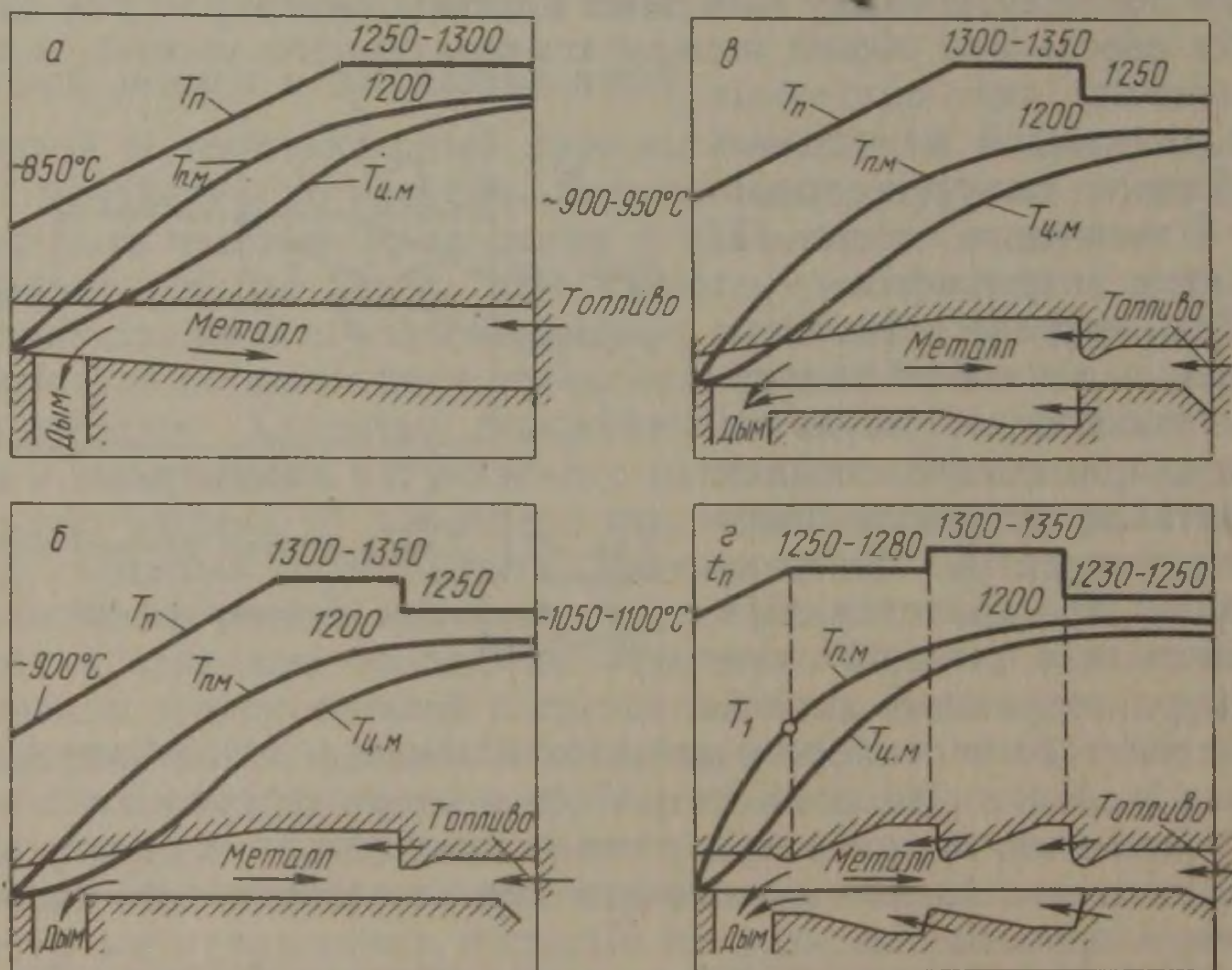


Рис. 27-10. Температурный режим и профиль толкательных печей с торцевым отоплением:

а — двухзонная печь с монокристаллическим подом; б — трехзонная печь с монокристаллическим подом; в — то же, с нижним обогревом; г — многозонная печь с нижним обогревом

T_p — температура печи; $T_{п.м}$ — температура поверхности металла; $T_{ц.м}$ — температура центра металла

подогреваться до поступления в зону высоких температур (сварочную). Как было отмечено, во избежание возникновения чрезмерных термических напряжений часто необходим медленный нагрев металла в интервале температур от 0 до 500 °С. Вместе с тем методическая зона представляет собой противоточный теплообменник. Находящиеся в состоянии теплообмена дымовые газы и металл двигаются навстречу друг другу. Металл нагревается дымовыми газами, т. е. утилизирует тепло дымовых газов, отходящих из зоны высоких температур. Общее падение температуры дымовых газов в методической зоне весьма значительно. Обычно в зоне высоких температур методических печей температура газов держится на уровне 1300—1400 °С, в конце же методической зоны она находится в пределах 850—1100 °С. Методическая зона зна-

чительно увеличивает коэффициент использования топлива, который достигает 40—45 %, тогда как в камерных нагревательных кузнечных печах он составляет 18—20 %.

Зона высоких температур или сварочная — вторая по ходу металла. В этой зоне осуществляется быстрый нагрев поверхности заготовки до конечной температуры. Температура нагрева металла в методических печах обычно составляет 1150—1250 °С. Для интенсивного нагрева поверхности металла до этих температур в сварочной зоне необходимо обеспечивать температуру на 150—250 °С выше, т. е. температура газов в сварочной зоне должна быть 1300—1400 °С.

Томильная зона (зона выдержки) — третья по ходу металла. Она служит для выравнивания температуры по сечению металла. В сварочной зоне до высоких температур нагревается только поверхность металла. В результате создается большой перепад температур по сечению металла, недопустимый по технологическим требованиям. Температуру в томильной зоне поддерживают всего на 30—50 °С выше необходимой температуры нагрева металла. Поэтому температура поверхности металла в томильной зоне не меняется, а происходит только выравнивание температуры по толщине заготовки.

Подобный трехступенчатый режим нагрева необходим в тех случаях, когда нагревают заготовки, в которых может возникнуть значительный перепад температур по толщине (>200 °С на 1 м толщины металла). Такие печи (с тремя зонами) называют трехзонными методическими печами (см. рис. 27-10, б, в).

В ряде случаев при нагреве тонких заготовок нет необходимости делать выдержку для выравнивания температур по сечению, так как возникший в сварочной зоне перепад температур небольшой. Томильную зону при этом не предусматривают и применяют двухзонные печи — с методической и сварочной зонами (см. рис. 27-10, а).

При нагреве металла перед прокаткой на листовых и сортовых станах иногда применяют методические печи, имеющие четыре и пять зон отпления, что позволяет повысить общий температурный уровень печи и получить большую производительность. В этом случае делают две или три сварочные зоны, в каждой из которых устанавливают горелки. Это дает возможность повышать температуру в конце (по ходу газов) методической зоны, уменьшить ее длину и увеличить общую длину сварочной зоны, в результате чего достигается более форсированный нагрев металла.

В зависимости от толщины заготовок в методических печах можно применить односторонний или двусторонний их нагрев. При толщине заготовок до 100 мм двусторонний нагрев не рационален, так как интенсивный (ускоренный) нагрев поверхности заготовки в сварочной зоне приведет к удлинению выдержки в томильной камере. Причем увеличение длительности выдержки будет больше, чем выигрыш во времени нагрева в сварочной зоне,

достигнутый за счет применения нижнего обогрева. При одностороннем нагрева заготовки движутся по монолитному поду (см. рис. 27-10, а, б). Для обеспечения двустороннего обогрева на всю длину сварочной и методической зон делают специальную камеру со своим собственным отоплением.

При сводовом отоплении плоско-пламенные горелки могут располагаться с разным шагом и группируются в зоны, каждая со своим автоматическим регулированием. Благодаря этому можно менять подводимое количество топлива и влиять на распределение температуры по длине печи, обеспечивая необходимый режим нагрева металла.

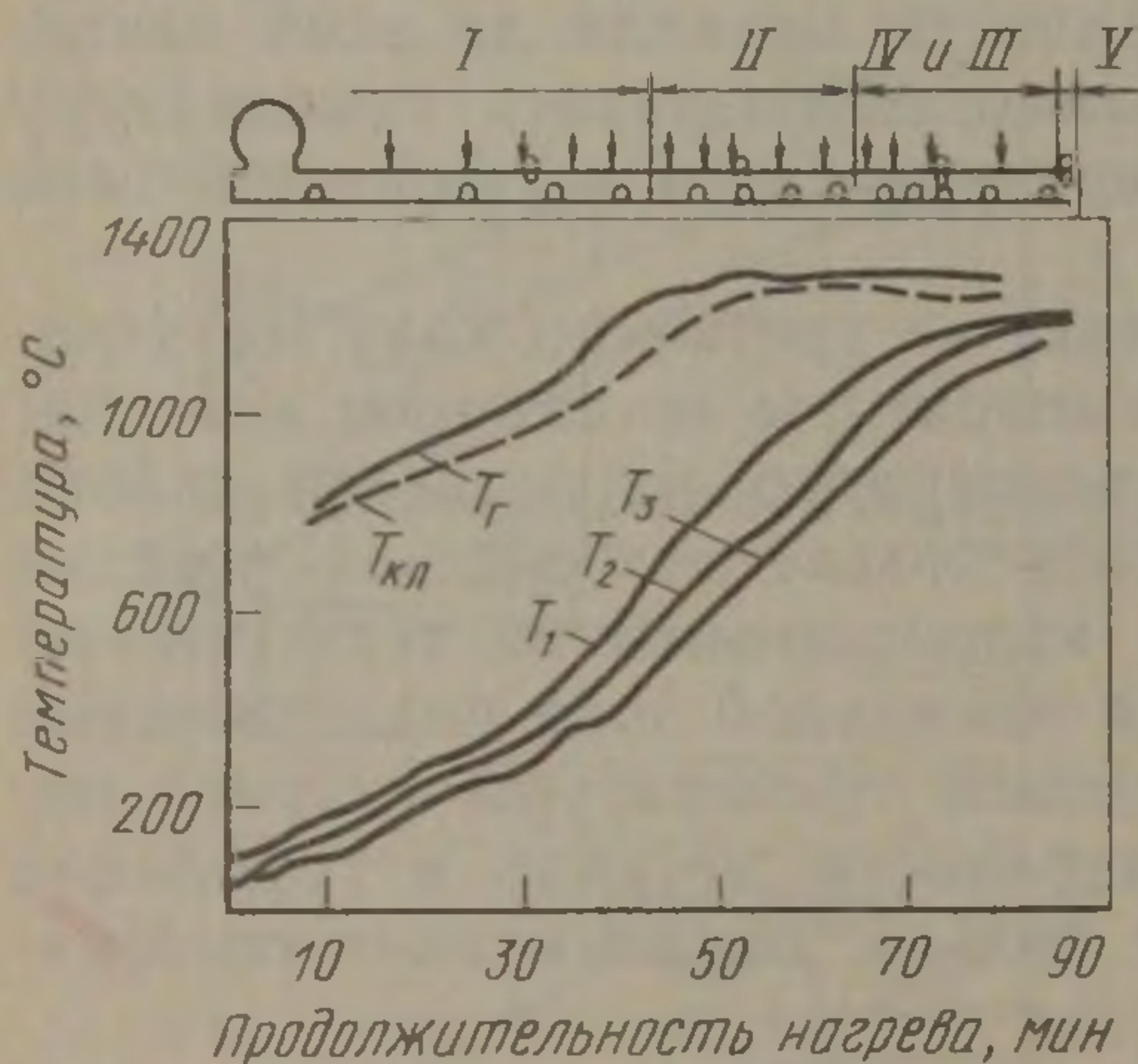


Рис. 27-11. Изменение температуры металла T_1 , T_2 , T_3 , температуры газов T_r и T_{kl} печи по зонам I—V в процессе нагрева заготовки сечением 150×150 мм

благодаря этому можно менять подводимое количество топлива и влиять на распределение температуры по длине печи, обеспечивая необходимый режим нагрева металла. На рис. 27-11 приведены графики изменения температуры печи и металла, полученные на одной из действующих нагревательных печей со сводовым отоплением, обеспечивающей постепенный (методический) нагрев металла при величине к. и. т., лежащей в пределах $\sim 40-47\%$. Следует подчеркнуть, что при

сводовом отоплении можно получить более равномерное распределение температуры по длине и ширине рабочего пространства печи и тем самым повысить интенсивность и эффективность нагрева металла.

Толкательные противоточные (методические) печи

Методические толкательные печи до самого последнего времени удовлетворяли требованиям по производительности и удельному расходу тепла. В последнее время наметилась прогрессивная тенденция к увеличению длины заготовок и, как следствия, к увеличению ширины нагревательных печей, что значительно усложняет их эксплуатацию, особенно удаление окалины с пода печи. Поэтому, несмотря на то что в прокатных цехах в настоящее время основным типом нагревательных печей являются толкательные методические печи, перспективы их дальнейшего распространения ограничены. Расширяется применение более совершенных печей с шагающими балками, которые могут работать так же, как и толкательные печи, в режиме методического нагрева.

При нижнем обогреве вдоль печи прокладывают специальные глиссажные (водоохлаждаемые) трубы, по которым движется металл. Из-за охлаждающего действия глиссажных труб в нижнюю часть сварочной зоны печи необходимо подавать больше тепла, чем в верхнюю.

Глиссажные трубы выполняют только в методической и сварочной зонах. В местах соприкосновения заготовки с водоохлаждаемыми трубами металл прогревается хуже и на его поверхности образуются темные пятна. Поэтому в трехзонных печах с нижним обогревом томильная зона предназначена не только для выравнивания температуры по толщине металла, но и для ликвидации темных пятен на нижней поверхности заготовки, и в ней глиссажных труб нет.

В двухзонных печах с нижним обогревом часть сварочной зоны выполняют без нижнего обогрева для ликвидации темных пятен от охлаждающего действия глиссажных труб.

В настоящее время предпринимаются попытки использования двустороннего нагрева и в пределах томильной зоны. Для этого используют мощные глиссажные шины особой конструкции, в которых отсутствует возможность охлаждения металла снизу (см. рис. 27-16).

Выбор конструкции методической печи и графика нагрева зависит от толщины заготовки, пластичности металла в холодном состоянии и теплофизических свойств нагреваемого металла. Ограничение скорости нагрева холодного металла в интервале температур от 0 до 500 °С распространяется в основном на качественные и высоколегированные стали. Этим сталям свойственны относительно низкие коэффициенты теплопроводности и температуропроводности, в результате чего чрезмерная скорость нагрева может привести к недопустимому перепаду температур по толщине заготовки. Скорость повышения температуры металла в начале его нагрева в первую очередь зависит от того, какова температура в начале методической зоны, при которой проводится посад холодного металла. Выбор этой температуры, а следовательно, температурного режима печи и ее конструкции во многом зависит от того, какая начальная температура печи допустима для той или иной марки стали. Существует большое число весьма ходовых марок стали (углеродистые, низколегированные, рельсовые и др.), для которых эта температура практически неограничена. Однако для ряда других марок стали должны быть введены достаточно строгие ограничения, вплоть до того, что некоторые стали можно помещать в печь, температура которой не превышает 600—650 °С. Ограничения подобного рода достаточно четко определены и приведены в соответствующей справочной литературе.

Большое значение для работы методических печей имеет способ выдачи металла из печи. Различают торцовую и боковую выдачи металла. При торцовой выдаче необходим один толкатель, который выполняет и роль выталкивателя. Для печей с боковой выдачей устанавливают не только толкатель, но и выталкиватель, поэтому такие печи при размещении в цехе требуют больших площадей. Однако с точки зрения тепловой работы печи с боковой выдачей имеют преимущества. При торцовой выдаче через окно

выдачи, расположенное ниже уровня пода печи, происходит интенсивный подсос холодного воздуха. Явление подсоса усиливается инжектирующим действием горелок, расположенных в торце томильной зоны. Подсосанный в печь холодный воздух вызывает излишний расход топлива и способствует интенсивному зарастанию подины печи образовавшейся окалиной.

Методические нагревательные печи по сравнению с печами, работающими по камерному режиму, обеспечивают более высокий к. п. д. и более высокий к. и. т. в рабочем пространстве, что объясняется наличием методической зоны. Если в камерной печи при температуре в рабочем пространстве 1400°C и нагреве металла до 1200°C температура уходящих продуктов сгорания составляет $1350\text{—}1400^{\circ}\text{C}$, то в методической печи при тех же условиях эта температура составит $850\text{—}950^{\circ}\text{C}$. Поэтому к. п. д. методических печей может достигать $40\text{—}45\%$. Основными статьями расходной части теплового баланса методических печей являются, %:

Тепло, затрачиваемое на нагрев металла	30—45
Потери тепла с уходящими газами	45—50
То же, с охлаждающей водой	10—15

Конструкцию методических печей выбирают в зависимости от типа стана и вида топлива. Тип стана определяет производительность печей, толщину нагреваемой заготовки, температуру нагрева металла и его сортамент. От вида используемого топлива зависит конструкция горелочных устройств и применение рекуператоров. В табл. 27-3 приведены данные, которые позволяют ориентироваться в выборе конструкции методических печей.

Как было отмечено, при горизонтальном поде квадратные заготовки без взгорбливания проталкиваются через печь, если их общее число не превышает 200. Для увеличения числа заготовок, а следовательно, и для повышения производительности печи под делают наклонным на $6\text{—}8^{\circ}$. При этом угле наклона число заготовок, находящихся в печи, можно увеличить до $240\text{—}250$. Увеличение угла наклона недопустимо во избежание самопроизвольного сползания заготовок.

Для достижения требующейся рабочей температуры в печи необходимо, как уже отмечалось, чтобы калориметрическая температура горения составляла 1800°C и более. Подобная калориметрическая температура может быть достигнута при использовании:

1) высококалорийного топлива, — газа с теплотой сгорания выше $12\,570\text{ кДж/м}^3$ или мазута. В этом случае утилизация тепла отходящих дымовых газов преследует только одну цель — повысить экономичность работы печи (снизить расход топлива), а для повышения калориметрической температуры подогрев воздуха и газа в данном случае необязательны;

2) холодного газа, характеризуемого средней теплотой сгорания, равной 8400 кДж/м^3 , с подогревом воздуха до $450\text{—}500^{\circ}\text{C}$

Т а б л и ц а 27-3. Методические печи для различных прокатных станов

Тип стана	Размер заготовки, мм	Длина заготовки, мм	Характеристика печей		
			нагрев	под	оптимальное число зон томления
Мелкосортные, проволочные	60×80 80×80 100×100	9000—12 000	Односторонний	Наклонный	2
Среднесортные	150×150	1000—12 000	Двусторонний		3
Среднесортные, крупносортные, листовые	200×200 200×350 350×350	1000—12 000		Горизонтальный	≥3

и применением горелок любой конструкции — как с предварительным, так и с внешним смешением;

3) газа с низкой теплотой сгорания, т. е. $Q_H^P = 5000 + 5800$ кДж/м³, вплоть до чистого доменного газа с подогревом воздуха до 500—550 °С и газа до 250—300 °С, а также обязательно с применением инжекционных горелок, обеспечивающих хорошее смешение топлива с воздухом при наиболее низкой величине $u = 1,02 \div 1,03$.

Рассмотрим одну из печей для мелкосортных станов (рис. 27-12), созданную под руководством Б. Р. Именитова. Это трехзонная печь с нижним обогревом и наклонным подом. В ее конструкции наиболее гармонично и рационально воплощены все доступные возможности для максимального увеличения калориметрической температуры горения. В свое время это было необходимо, так как до начала широкой разработки месторождений природного газа на некоторых отечественных заводах ощущалась острая нехватка коксового газа и нужна была конструкция методической печи, работающей на газообразном топливе с низкой теплотой сгорания. В этих печах применение инжекционных горелок на подогретом до 550 °С воздухе позволяет наиболее рационально использовать химическое тепло топлива. Воздух для горения засасывается из атмосферы через расположенный под печью керамический рекуператор из шамотных блоков и систему воздухопроводов. Аэродинамическое сопротивление воздушного пути преодолевается за счет геометрического напора подогретого воздуха, движущегося вверх через рекуператор и воздухопроводы, а также в результате инжектирующего действия горелок. Поэтому утечки воздуха практически нет, а управление тепловым режимом можно автоматизировать.

Подобные печи обеспечивают удельную производительность 550 кг/(м²·ч) при удельном расходе тепла 2100 кДж/кг. В таких печах газообразное топливо подогревают до 250—300 °С в ме-

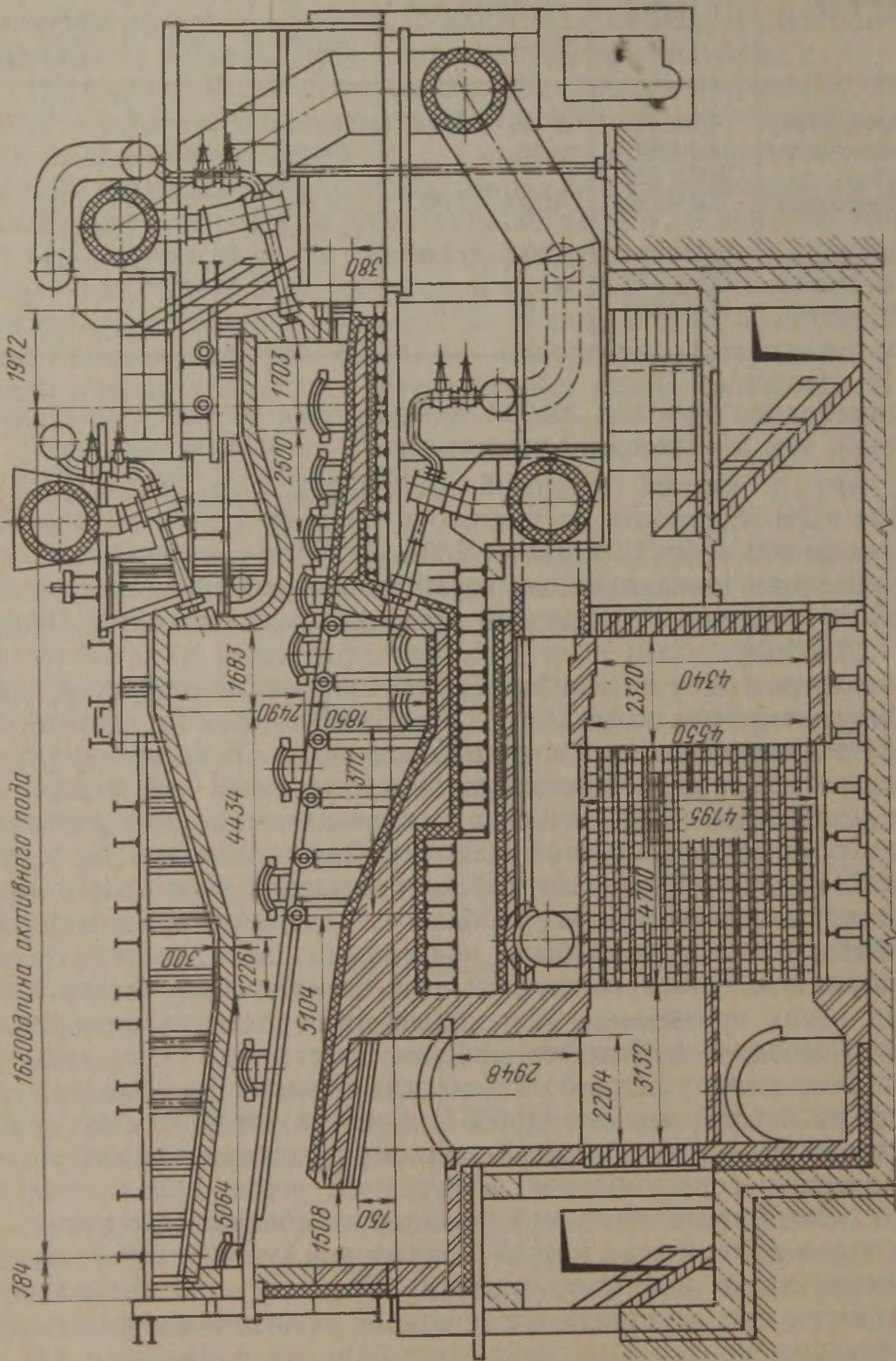


Рис. 27-12. Методическая печь, отапливаемая газообразным топливом с низкой теплотой сгорания

таллических трубчатых рекуператорах, устанавливаемых в дымовом борове последовательно за воздушным рекуператором. Однако дальнейшее распространение этих печей ограничено, так как при теплоте сгорания доменного газа 3770 кДж/м^2 , $T_{\text{в}} = 550 \text{ }^\circ\text{C}$ и $T_{\text{г}} = 300 \text{ }^\circ\text{C}$ калориметрическая температура горения равна примерно $1700 \text{ }^\circ\text{C}$, что является самым нижним возможным пределом. Повысить температуру подогрева воздуха свыше $550 \text{ }^\circ\text{C}$ нельзя, так как возможно воспламенение смеси в корпусе горелки. Осуществить устойчивый подогрев газа выше $300 \text{ }^\circ\text{C}$ также трудно, поскольку температура дымовых газов за керамическим рекуператором не превышает $550\text{—}600 \text{ }^\circ\text{C}$. Кроме того, наметилась тенденция к уменьшению теплоты сгорания доменного газа.

При использовании трехзонных методических толкательных печей на среднесортных и крупносортных станах под печи выполняются горизонтальным, с торцовой подачей и выдачей металла. При этом так же, как в печи, изображенной на рис. 27-12, сохраняется три зоны отопления при увеличении общей тепловой мощности печи в соответствии с ее производительностью.

У всех методических трехзонных печей весьма схожие характеристики по напряженности активного пода и удельному расходу тепла. Лишь для печей с монолитным подом и с нижним обогревом эти показатели изменяются (табл. 27-4).

Т а б л и ц а 27-4. Техничко-экономические показатели работы методических печей

Тип печи	Толщина заготовки, мм	Напряженне активного пода, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	Удельный расход тепла, $\text{кДж}/\text{кг}$
С монолитным подом	100	600	1700—1900
	200	500	2100—2500
Трехзонные с нижним обогревом	200	500	2100—2500

Существенное увеличение производительности крупносортных и особенно листовых станов требует, естественно, увеличения производительности пролета нагревательных печей. Решить эту задачу можно двумя способами: 1) увеличением числа печей при прежней интенсивности нагрева; 2) повышением интенсивности нагрева.

Следует предпочесть второй способ, так как при нем снижаются затраты на строительство печей. Однако, чтобы поднять интенсивность нагрева, необходимо повысить температуру в низкотемпературной зоне печи, что возможно для тех заготовок, скорость нагрева которых практически неограничена. Именно в таких случаях и применяют многозонные печи (рис. 27-13), где методическая зона, по существу, отсутствует, а температурный режим печи приближается к камерному. В этих печах первая по ходу

металла весьма короткая зона не может уже называться методической, так как не выполняет функции медленного, постепенного нагрева заготовки. Ее правильнее называть начальной зоной печи. Как показали исследования изменения температуры слябов в действующих печах, металл в этой зоне многозонной печи нагревается всего до 350—400 °С, тогда как в трехзонных методических печах к концу методической зоны металл достигает 750—800 °С.

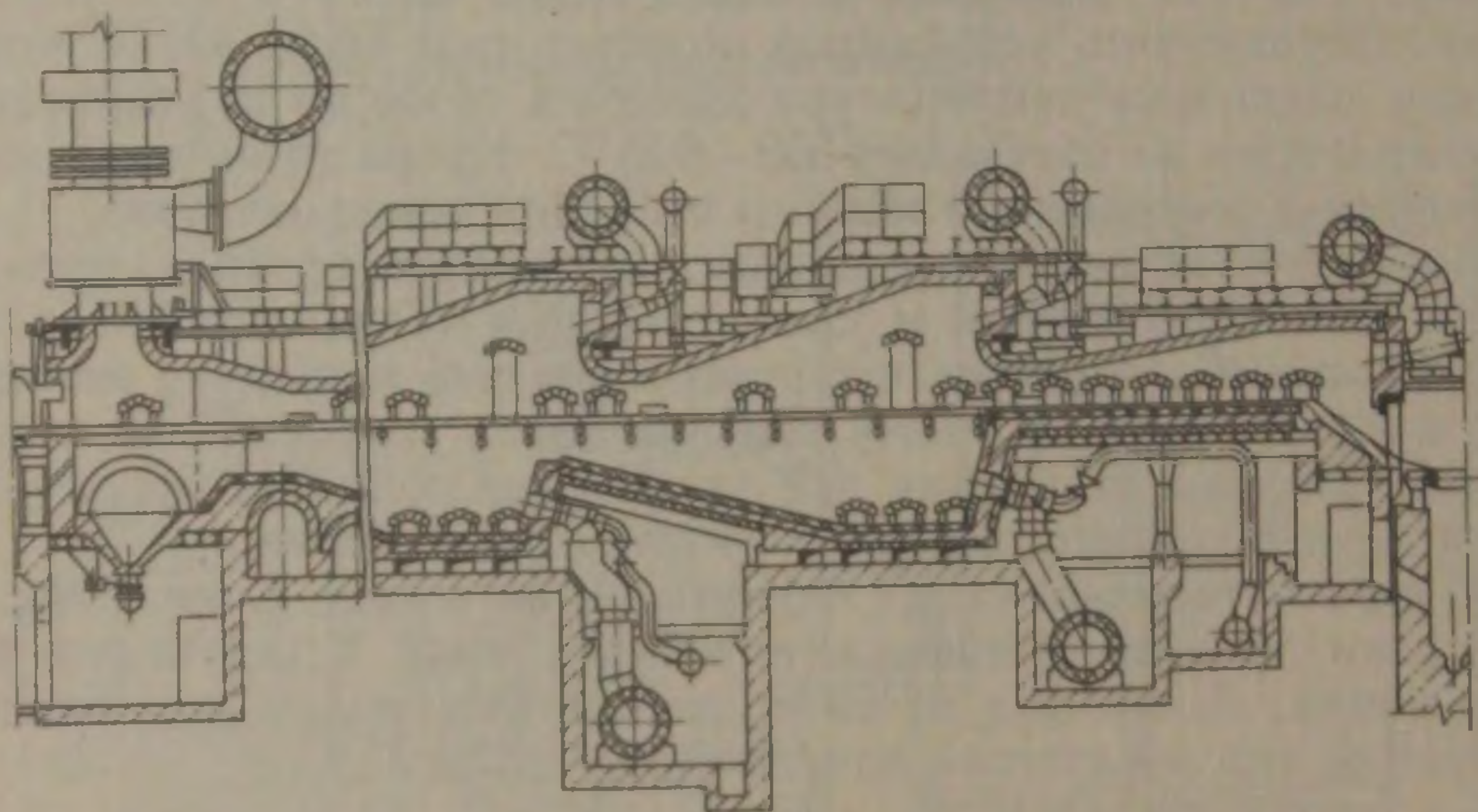


Рис. 27-13. Многозонная нагревательная печь

Это говорит о том, что начальная зона многозонных печей имеет подчиненное значение и не играет практически самостоятельной теплотехнической роли. Повышение интенсивности нагрева, достигаемое в многозонных печах, позволяет увеличить напряжение пода печей до 600—650 кг/(м²·ч), а производительность печей к листовым станам (слябы длиной до 12 м) довести до 200—250 т/ч.

При создании методических печей важно правильно в соответствии с назначением каждой зоны отопления распределить топливо по зонам. Ниже приведены данные по обычно применяемому распределению топлива по зонам методических печей.

Зона отопления	Тепловая мощность зоны, % от общей тепловой мощности печи	
Томильная	30—45	} 2 зоны
Верхняя сварочная	55—70	
Томильная	18—25	} 3 зоны
Верхняя сварочная	30—40	
Нижняя сварочная	35—45	
Томильная	15—20	} 4 зоны
Две верхние сварочные, каждая	20—30	
Нижняя сварочная	25—40	
Томильная	12—18	} 5 зон
Две верхние сварочные, каждая	18—22	
Две нижние сварочные, каждая	20—25	

На рис. 27-14 представлена методическая нагревательная печь со сводовым отоплением. Нижний подогрев таких печей в насто-

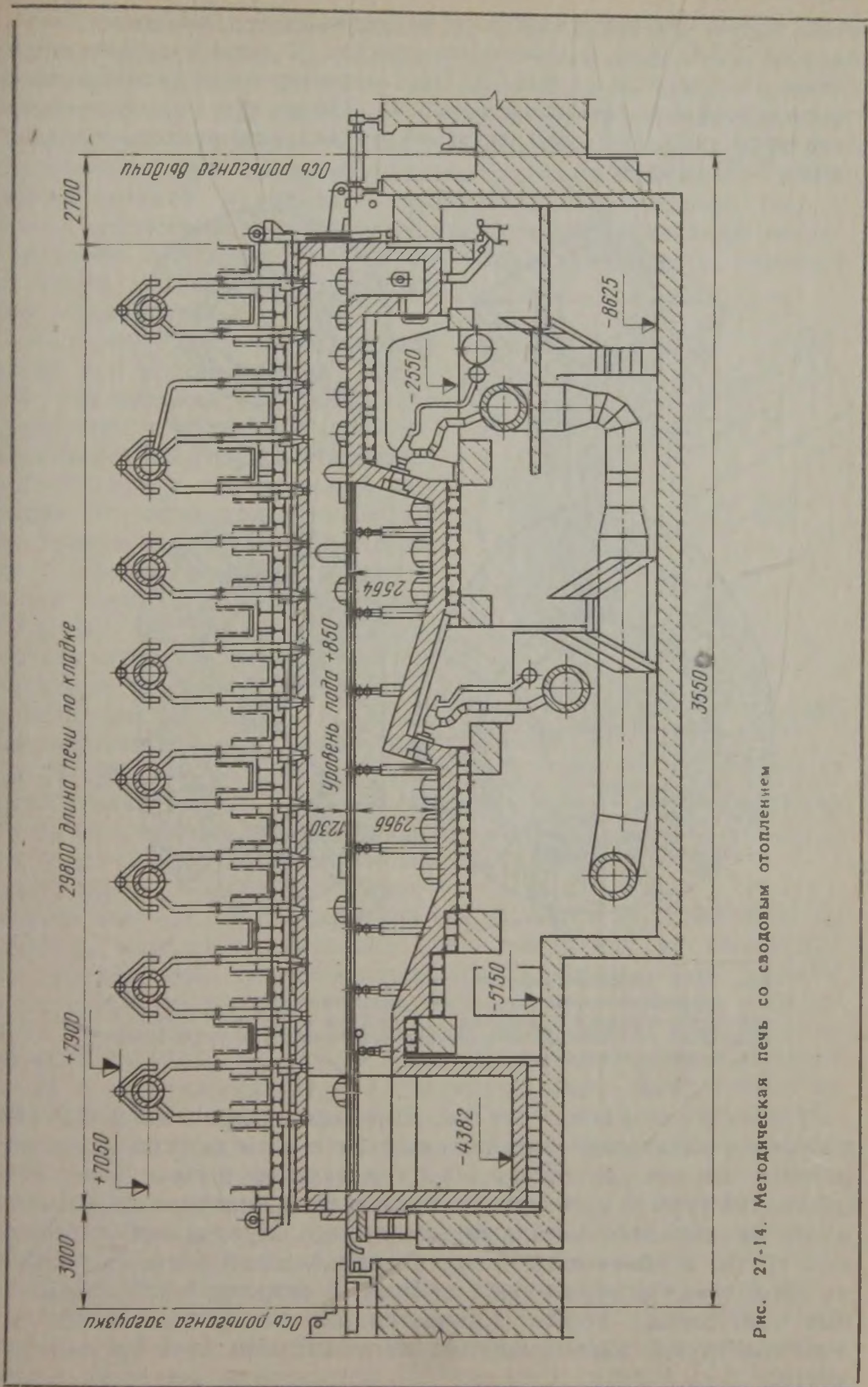


Рис. 27-14. Методическая печь со сводовым отоплением

ящее время осуществляется с использованием торцового (как на рис. 27-4) или бокового отопления. В печи подгреваются слябы, полученные на МНЛЗ. Печь работает на природном газе, обеспечивает производительность 150—170 т/ч при напряженности активного пода 600—650 кг/(м²·ч) и удельном расходе топлива около 2100 кДж/кг.

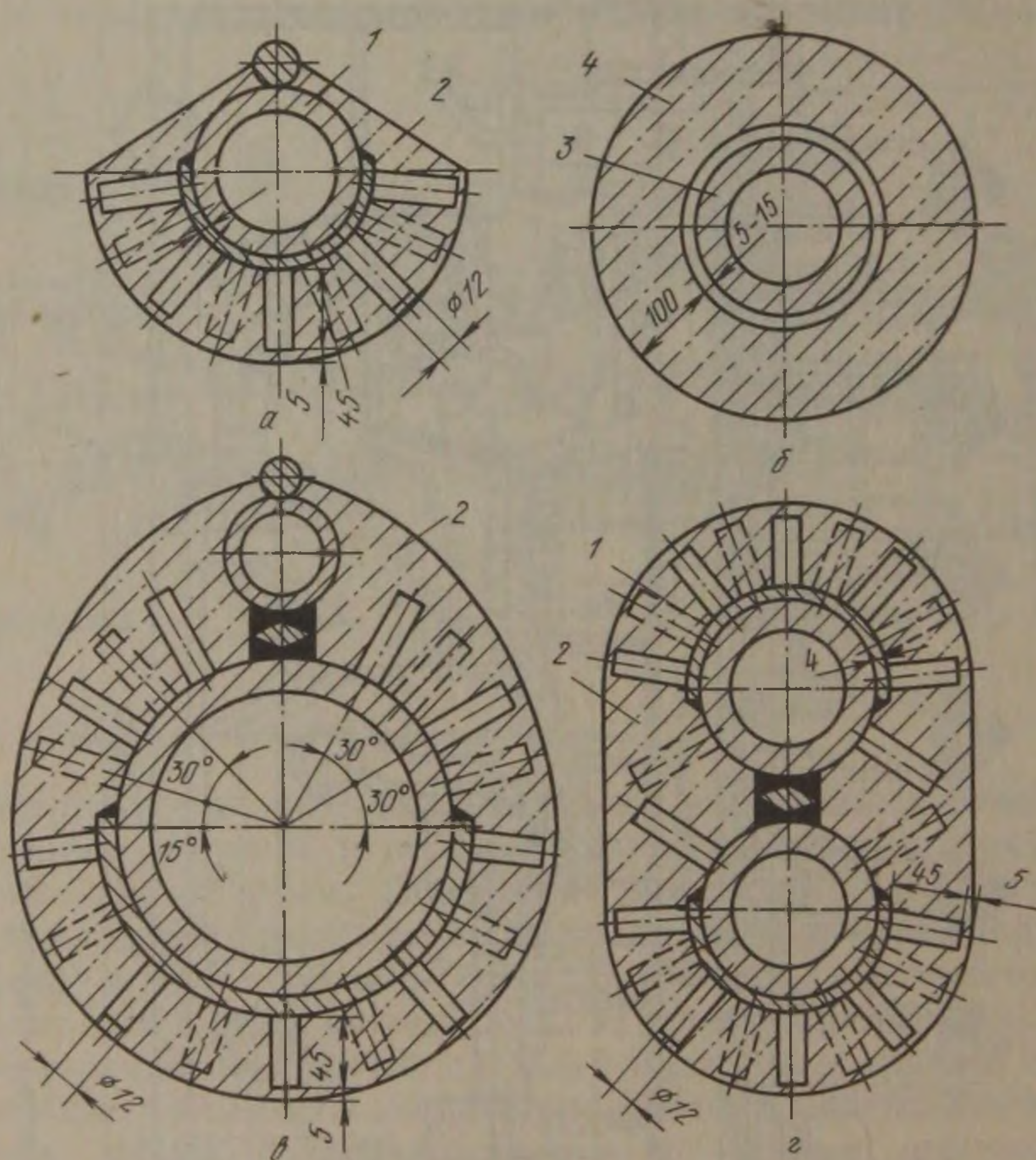


Рис. 27-15. Изоляция подовых труб:

а — продольной трубы; *б* — стержня поперечной трубы; *в* — продольной трубы и опорного змеевика; *г* — двойной поперечной трубы; 1 — термоблок; 2 — набивка из жароупорного бетона; 3 — стояк поперечной трубы; 4 — фасонный кирпич

Г л и с с а ж н ы е т р у б ы. В методических печах с нижним обогревом на каждый ряд движущихся в печи заготовок устанавливают по две-три продольные глissажные трубы. Для предохранения труб от истирающего воздействия движущегося металла к ним приваривают металлические прутки. Продольные глissажные трубы в значительной части методической зоны опираются на продольные огнеупорные столбики. В сварочной зоне продольные глissажные трубы опираются на поперечные водоохлаждаемые трубы, расположенные на расстоянии 1—1,5 м одна от другой.

Концы поперечных труб выведены за пределы печи и прикреплены к вертикальным стойкам каркаса. В середине поперечные глссажные трубы опираются на вертикальную опору, выполненную из пары водоохлаждаемых труб, футерованных снаружи огнеупорным кирпичом. Чтобы снизить охлаждающее действие глссажных труб, предусматривают тепловую изоляцию, в качестве которой применяют специальные огнеупорные блоки. Блоки накладывают на трубу и прикрепляют специальными металлическими штырями (рис. 27-15). Однако стойкость тепловой изоляции глссажных труб все еще недостаточна.

Потери тепла с охлаждающей водой при использовании набивной изоляции между шипами по сравнению с потерями при неизолированной трубе снижаются в 2—3 раза, а при навесной изоляции из сегментов или блоков их удается снизить в 4,6—6,3 раза. Промышленная проверка срока службы блочной изоляции показала, что для печей, отапливаемых газом, где температура под металлом не превышает 1375 °С, применимы набивные и сборные шамотные блоки, срок службы которых в указанных условиях составляет от 9 мес (в области повышенных температур) до двух лет (в области пониженных температур). В печах, отапли-

ваемых мазутом, где температура под металлом достигает 1500 °С, хорошие результаты показали набивные блоки, изготовленные из магнезитовой (магнезитохромитовой) массы, срок службы которых составляет более 9 мес. Как отмечалось выше, в настоящее время разработаны глссажные шины особой конструкции, позволяющие и в томильной зоне создать двусторонний подвод тепла к поверхности металла. Подобные шины представлены на рис. 27-16. Наличие в конструкции керамического бруса предотвращает охлаждающее действие воды на нагреваемый металл.

Угар металла и удаление окалины. В нагревательных печах, работающих с открытым пламенем, неизбежно происходит угар (окисление) металла. Количество металла, перешедшего в окалину, зависит от основных факторов: состава атмосферы, температуры и времени пребывания металла в печи. Чем больше содержится окисляющих газов (O_2 , SO_2 , CO_2 , H_2O) в атмосфере печи, чем выше температура и больше время пребывания заготовок в печи, тем больше угар металла (обычно со-

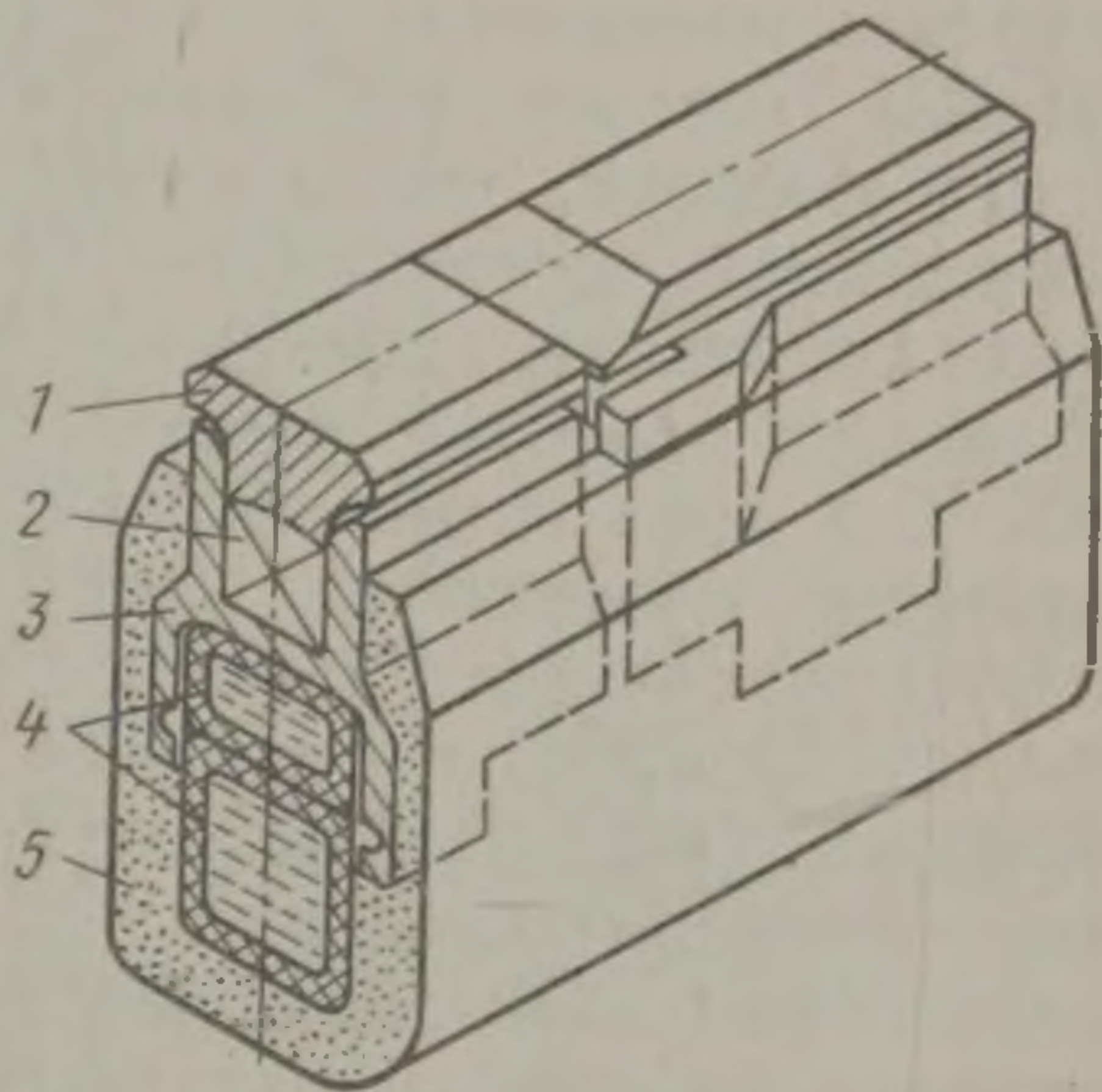


Рис. 27-16. Глссажные шины для обеспечения двухстороннего нагрева в томильной зоне:

1 — металлические направляющие, по которым скользит металл; 2 — керамический брус; 3 — металлический корпус для установки керамического бруса и металлических направляющих; 4 — водоохлаждаемые трубы, 5 — тепловая изоляция

ставляющий 1,5—2 %), который не только вызывает экономические потери, но и серьезно усложняет эксплуатацию печей. В большинстве современных методических печей есть участки, имеющие монокристаллический под, с материалом которого и взаимодействует окалина, образуя бугры, препятствующие нормальному проталкиванию заготовок. Поэтому необходимо стремиться и к уменьшению угара и к тому, чтобы конструкция печи была приспособлена к надежной работе при неизбежном угаре металла.

Выше отмечалось, что интенсивное увеличение окисления металла начинается с температуры поверхности металла 850—900 °С. Поэтому температурный режим печи следует выбирать таким образом, чтобы время нагрева металла с 850—900 °С до температуры прокатки (~1200 °С) было как можно короче. Заготовки должны сравнительно медленно без возникновения существенного перепада температур по сечению нагреваться до 850—900 °С в зоне предварительного нагрева печи, в которой максимальная температура достигает 1000 °С. Затем они попадают в зону ускоренного нагрева с температурой 1350 °С, где как можно быстрее должны нагреваться до температуры прокатки. Из сказанного ясно, что скорость перемещения металла в пределах зон предварительного и ускоренного нагревов может быть неодинаковой. Поэтому необходимо предусмотреть возможность перемещения металла с разной скоростью, например, использование шагающего пода, разделенного на две части.

Удаление окалины и шлака с пода толкательных методических печей — трудоемкая и тяжелая операция, зачастую выполняемая вручную через боковые окна. Подину чистят как по ходу печи, так и в период ремонтов. Для очистки по ходу печи через печь пропускают специальный фигурный сляб. В период ремонта перед чисткой пода печь вручную или при помощи специального приспособления освобождают от металла. В печах с нижним обогревом окалину из нижних зон периодически удаляют через боковые окна.

Толкательные прямо-противоточные печи

Выше подчеркивалось, что при прямоточном движении теплоносителей, например, раскаленных газов и нагреваемого металла в начальный период нагрева, вблизи зоны посадки металла, возникает очень большой перепад температур между раскаленными газами (печью) и поверхностью нагреваемого металла. Если нагревается заготовка, имеющая малую тепловую массивность, то для ускорения нагрева и повышения эффективности работы печи целесообразно использовать возможности, заложенные в начальной стадии прямоточной схемы движения теплоносителей. Однако полностью прямоточной печь делать нецелесообразно, так как прямоточная схема не позволит иметь конечную температуру холодного теплоносителя (металла) выше конечной температуры более горячего теплоносителя. Применительно к условиям

работы проходных нагревательных печей это значит, что конечная температура металла будет всегда ниже температуры отходящих из печи газов, что, конечно, неприемлемо. В этом смысле противоток всегда эффективнее. Вместе с тем, совмещая две схемы движения и обеспечивая прямоточно-противоточное движение раскаленных газов и металла, можно получить существенное повышение эффективности работы печи.

Для иллюстрации высказанных положений на рис. 27-17 приведены кривые изменения температуры металла ($\lambda = \infty$) по мере его продвижения по поду печи производительностью 200 т/ч. Кривые показывают, что в начале периода нагрева прямоток эффективнее, однако после определенного момента времени нагрева (начиная с точки пересечения кривых *a* на рис. 27-17) противоточная схема предпочтительнее. Таким образом, для эффективного нагрева тонкой в тепловом отношении заготовки целесообразно печь делать состоящую из двух зон: первой (по ходу) металла прямоточной и второй противоточной, выполняя отбор продуктов сгорания посередине печи. Протяженность той и другой зоны может быть найдена из конкретных условий нагрева металла и работы печи в целом, как это в качестве примера сделано на рис. 27-17.

Одна из таких прямоточно-противоточных печей приведена на рис. 27-18. Эксплуатация такой печи позволила получить очень характерные результаты, приведенные на рис. 27-19, показывающие, что использование прямоточно-противоточных печей — серьезный резерв в повышении эффективности нагрева изделий с малой тепловой массивностью.

Печи с шагающим подом

Строительство печей с шагающим подом обходится значительно дороже, чем толкательных печей аналогичной производительности, однако печи с шагающим подом все шире применяют для нагрева металла перед сортовыми, толстолистовыми и другими станами. Преимущества этих печей перед печами толкательного типа, обусловленные методом транспортирования металла через печь, могут быть разделены на две группы: 1) эксплуатационные; 2) связанные с возможностью обеспечения значительно более высокой интенсивности нагрева металла.

Эксплуатационные преимущества состоят в ликвидации проблемы уборки окалины из печи; возможности легко удалять металл из печи в случае остановок стана и ремонтов; возможности гибкого регулирования скорости перемещения металла через печь, что

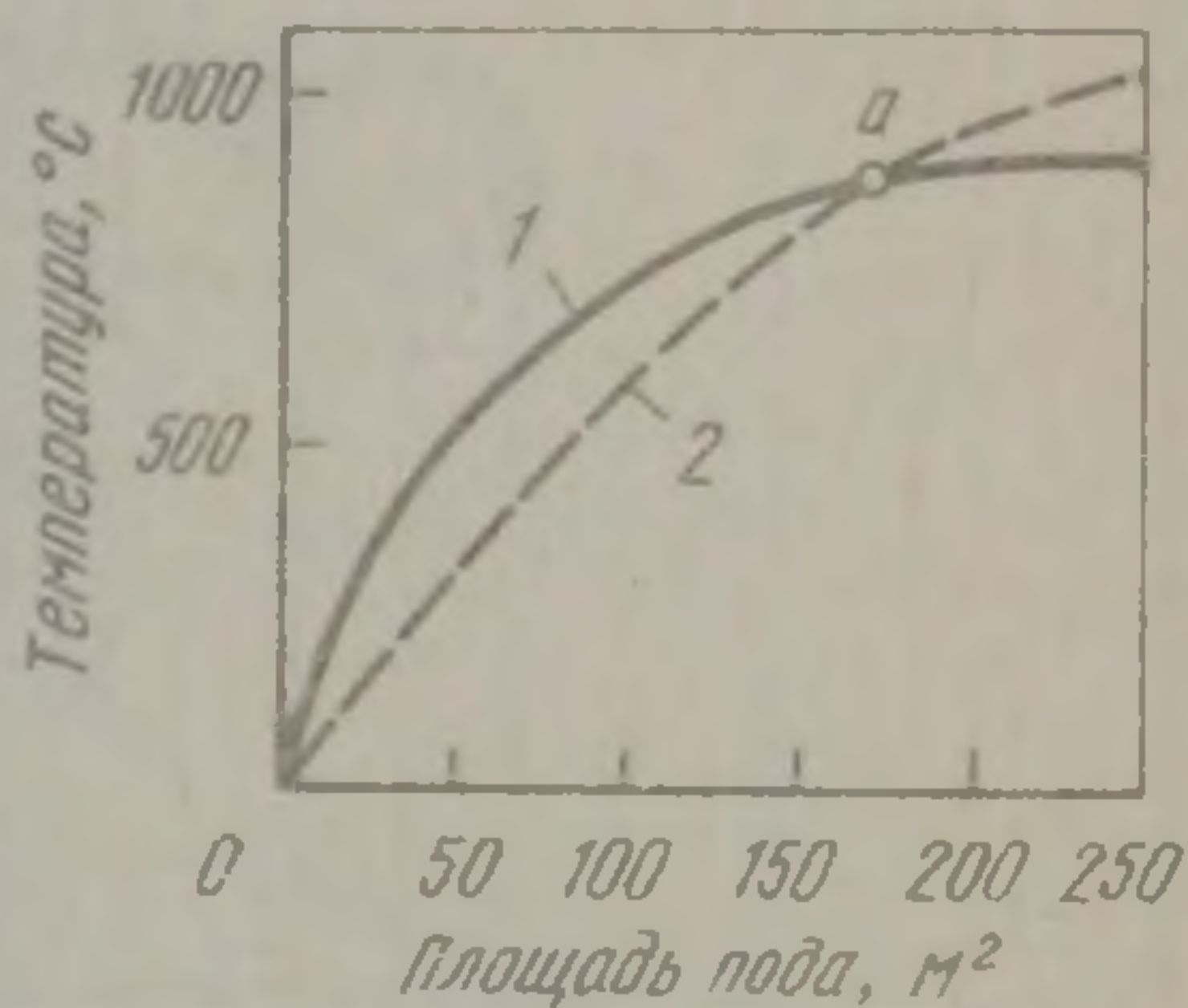


Рис. 27-17. Изменение температуры металла по длине печи при противоточной 2 и прямоточной 1 схемах движения металла и дымовых газов

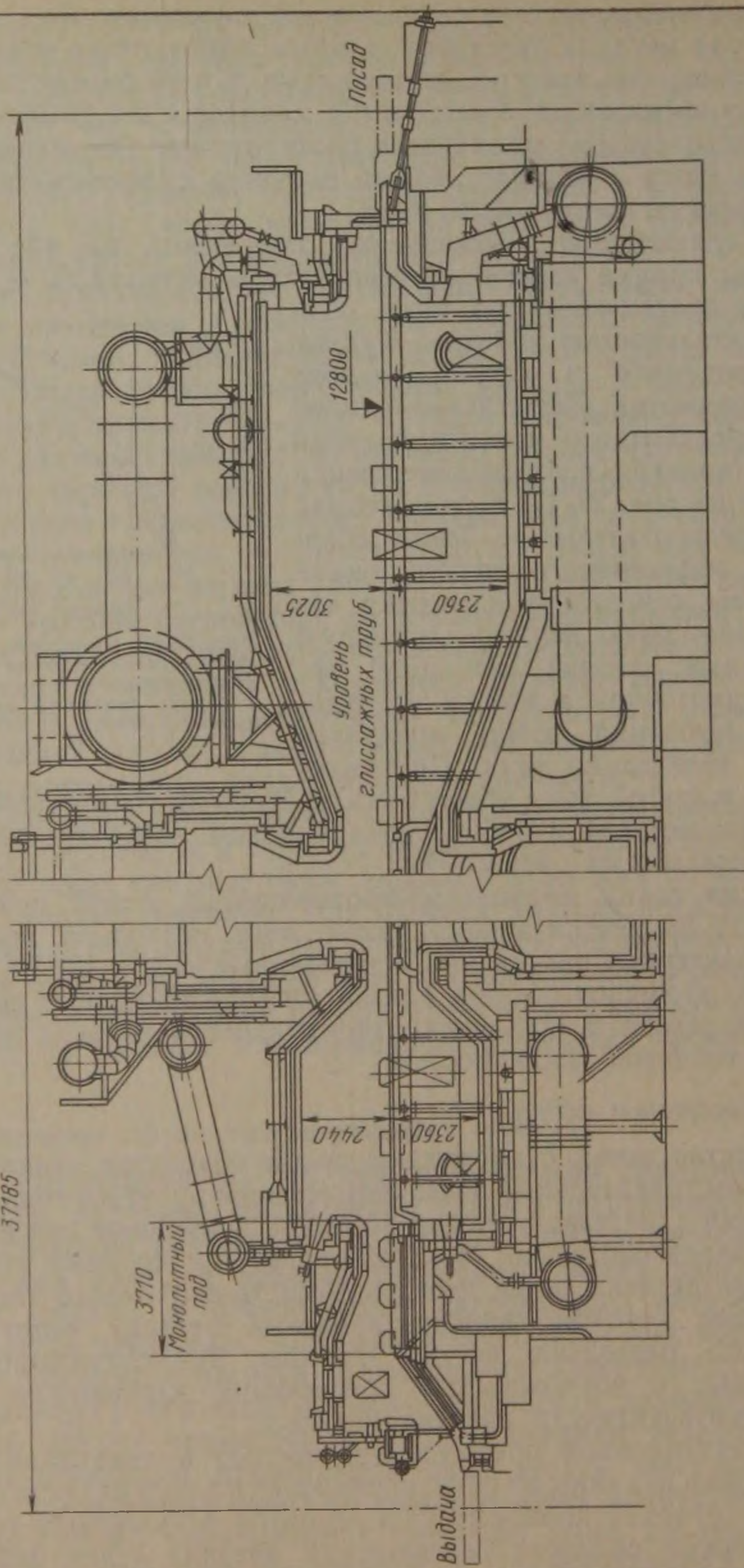


Рис. 27-18. Прямоточно-противоточная печь для нагрева слывов

очень важно при частом изменении сортамента металла; уменьшении на 30 % повреждений поверхности нагреваемых заготовок; значительном (до 0,3—0,5 %) снижении угара металла за счет повышения скорости нагрева и отсутствии осыпания окалины.

Наряду с эксплуатационными преимуществами применение шагающего пода позволяет обеспечить практически всесторонний нагрев металла. Это особенно сказывается при нагреве квадратных заготовок, прокатываемых на сортовых станах, и позволяет значительно увеличить интенсивность нагрева металла. В печах с шага-

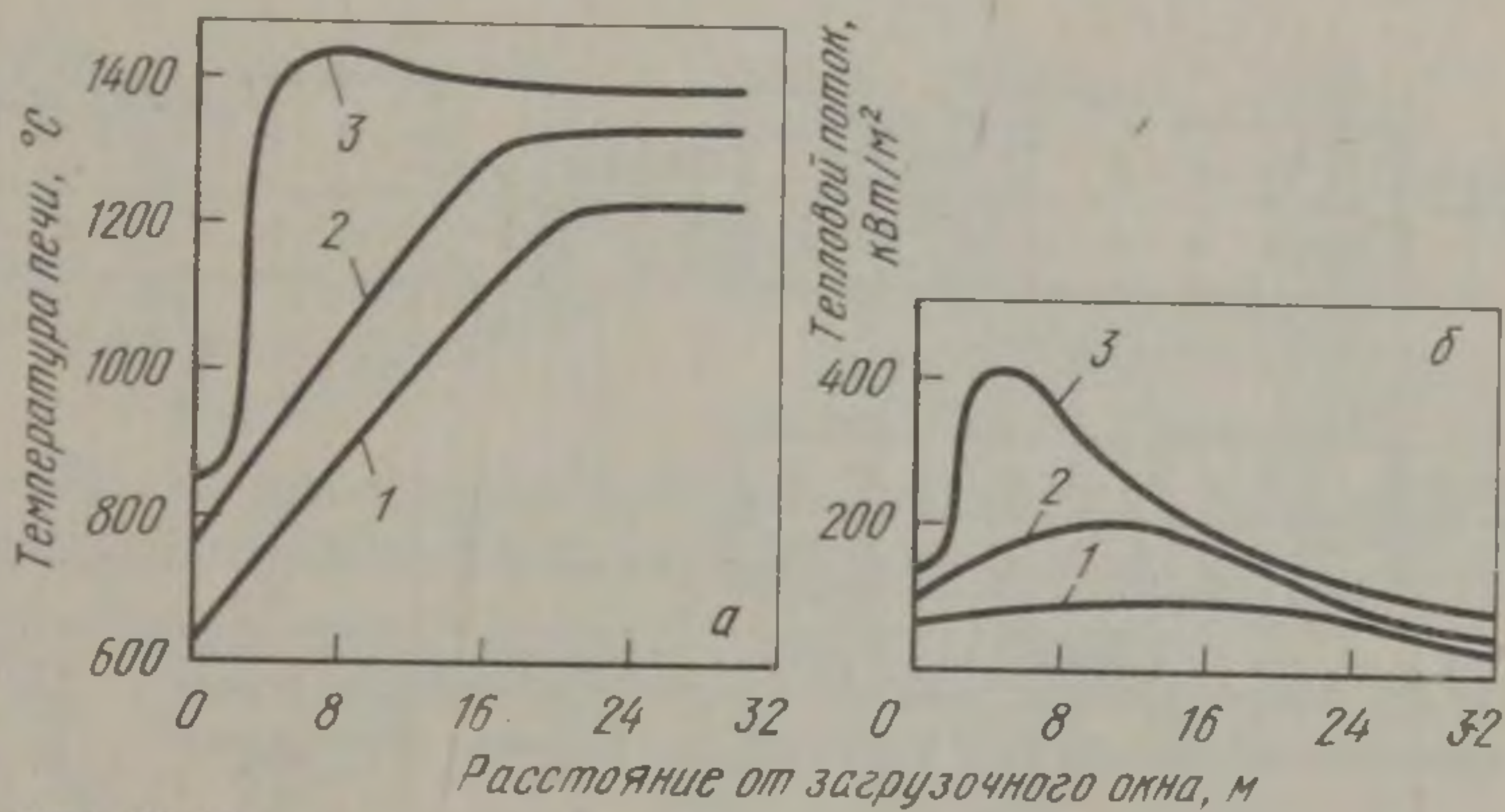


Рис. 27-19. Изменение температуры (а) и теплового потока на поверхность металла (б) печи (по ходу металла):

1 — трехзонная методическая печь; 2 — многозонная методическая печь; 3 — прямоточно-противоточная печь

ющим подом поверхность нагрева квадратных заготовок увеличивается вдвое по сравнению с толкательными печами с нижним сбогревом. Так, например, на одной из отечественных печей, обслуживающей мелкосортный стан и нагревающий заготовку 80 × 80 мм, продолжительность нагрева, отнесенная к толщине заготовки, составила 3—4 мин/см, тогда как в толкательных печах эта величина лежит в пределах 6—8 мин/см. Эти цифры соответствуют напряжению активного пода 1200—1500 и 800—1000 кг/(м²·ч).

Тепловой и температурный режим. У печей с шагающим подом эти режимы неизменны во времени, так как это проходные печи постоянного действия. Говоря о температурном режиме, следует заметить, что печи подобного типа могут работать как по камерному режиму, так и с переменной температурой по длине печи. Как уже отмечалось, температурный режим печей зависит от характера их отопления, а также от распределения горелок и дымоотводов. В печах с шагающим подом применяют самое разнообразное расположение горелок: торцовое, боковое и сводовое (рис. 27-20). Наиболее часто пользуются комбинированным расположением горелок: торцовым и боковым или боковым и сводовым. При боковом отоплении ширина печи ограничивается 11—12 м. При большей ширине печи возможно возникновение

неравномерности нагрева по длине заготовки (сляба). При сводовом отоплении заготовкигреваются достаточно равномерно, поэтому целесообразен такой метод отопления, когда нижний обогрев оборудован боковыми горелками, а в зонах верхнего обогрева использованы сводовые горелки. Продукты сгорания топлива отводят на стороне загрузки металла. Печи с шагающим подом работают обычно с переменной температурой по длине.

В отличие от методических толкательных печей в печах с шагающим подом нагрев заготовок происходит во всех зонах, но ин-

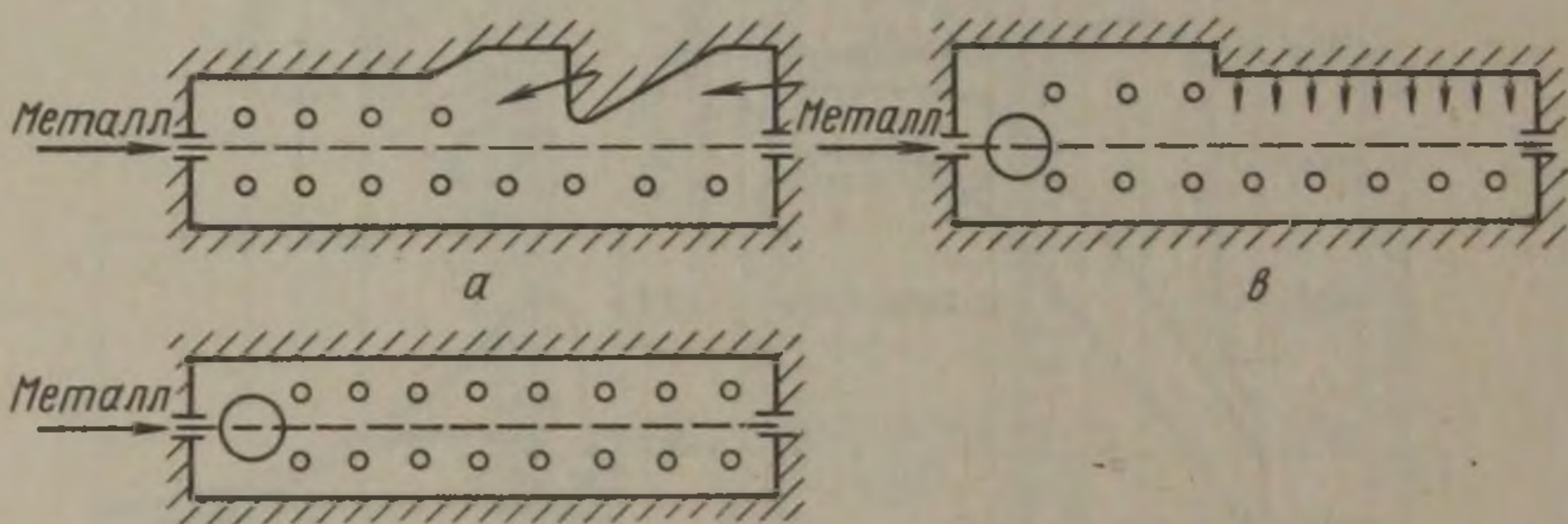


Рис. 27-20. Расположение горелок в печах с шагающим подом: а — торцовое и боковое; б — боковое; в — боковое и сводовое

тенсивность его в разных зонах может быть различной. Так, например, печь, нагревающая заготовки размером 80 × 80 мм для прокатки на проволочном стане, работает при следующем температурном графике:

Участок печи	Температура, °С
Начало зоны предварительного нагрева (место загрузки металла)	740—900
Первая по ходу металла зона нагрева	1000—1150
Вторая по ходу металла зона нагрева	1220—1300

Печи с шагающим подом выполняют как без нижнего обогрева (рис. 27-21), так и с нижним обогревом (рис. 27-22). При наличии нижнего обогрева конструкции шагающего пода делаются водоохлаждаемыми, в результате чего на нагреваемых заготовках образуются темные пятна. Чтобы исключить возникновение темных пятен, на трубы шагающих балок приваривают специальные стояки или подставки, промежутки между которыми заполняют теплоизоляцией. Кроме того, горизонтальные трубы шагающих балок, несущие металл, расположены не параллельно оси печи, и место контакта их со слябом при продвижении металла в печи постоянно меняется.

Конструкция печей. Рассмотрим под таких печей. Возможны следующие варианты конструктивного оформления идеи «шагания» пода: 1) под печи может состоять из трех частей в двух вариантах: неподвижного участка (у стен), шагающих и стационарных балок; неподвижного участка (у стен) и двух

групп шагающих балок; 2) под может не иметь неподвижных участков и состоять из двух групп шагающих балок.

При двух группах шагающих балок обеспечивается более высокий темп выдачи заготовок, но стоимость строительства печи возрастает. Щели между шагающими (или шагающими и стационарными) балками полностью перекрыты при помощи кожуха, погруженного в неподвижный водяной затвор. Водяные затворы смещены относительно щели между балками, а напротив щели предусмотрен короб для гидравлического удаления окалины. Устройство водяных затворов исключает попадание в печь воздуха

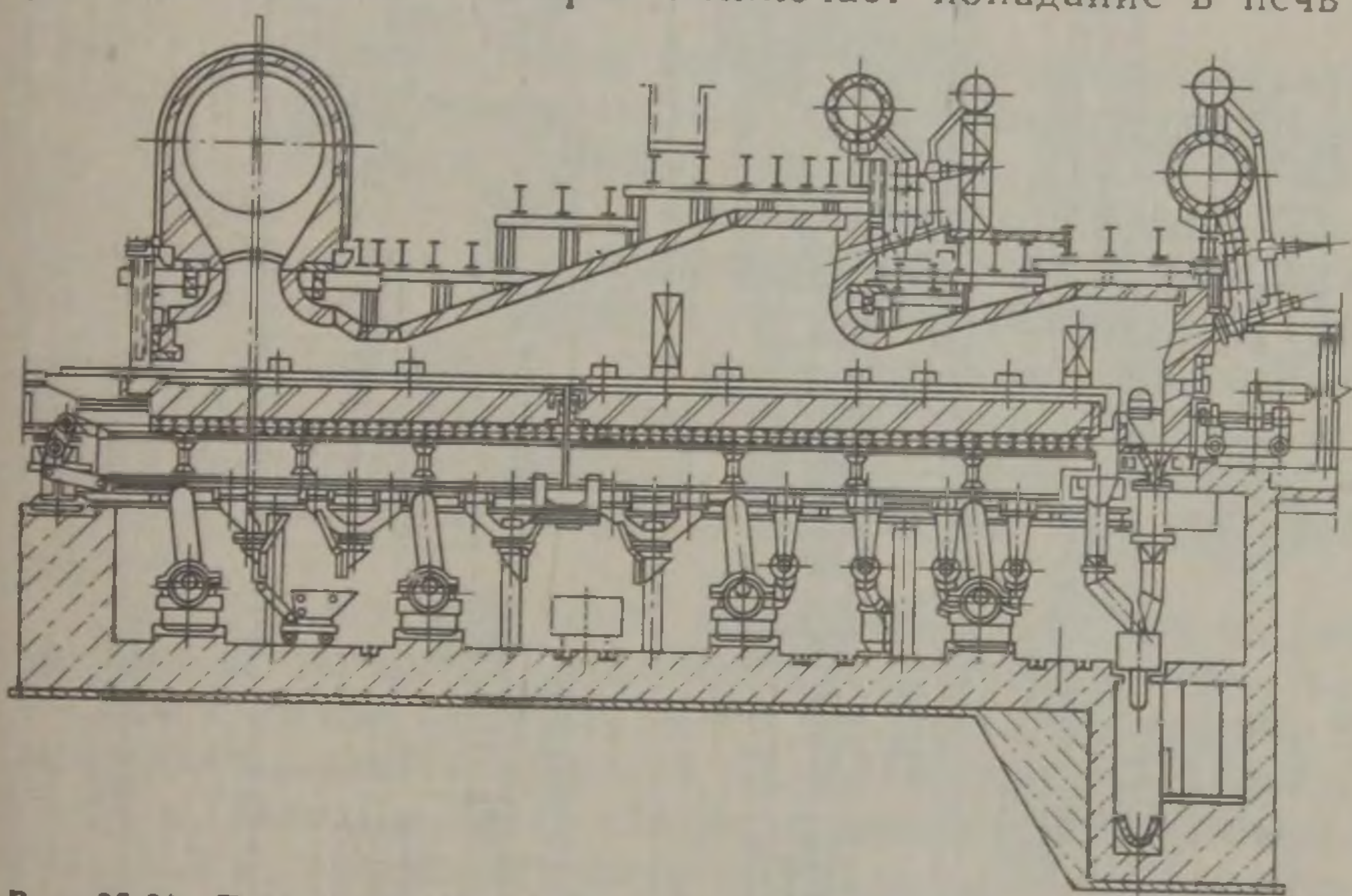


Рис. 27-21. Печь с шагающим подом без нижнего обогрева

из атмосферы. В печах без нижнего обогрева стационарные и подвижные балки футеруют (сверху вниз) следующим образом: хромитовая пластинчатая масса; огнеупорный материал, содержащий 35—44 % Al_2O_3 ; легковесный изоляционный бетон. Части футеровки балок, примыкающие непосредственно к щели, выполняют из огнеупорного бетона, легко восполнимого при ремонтах. В некоторых случаях для футеровки балок применяют магнезитохромитовые кирпичи, что не дает пока вполне удовлетворительного результата.

Эксплуатируются печи с шагающим подом без нижнего обогрева и с нижним обогревом. В печах без нижнего обогрева приняты две зоны отопления при следующем распределении тепловых мощностей, %: первая зона нагрева 36 и вторая — 64.

Эти печи оборудованы двухпроводными горелками и имеют весьма большие резервы по тепловой мощности. В подавляющем большинстве случаев печи могут работать с подачей топлива лишь во вторую зону нагрева. Горелки первой зоны нагрева включаются в том случае, если с целью увеличения производительности печи необходимо поднять температуру в этой зоне и в конце печи.

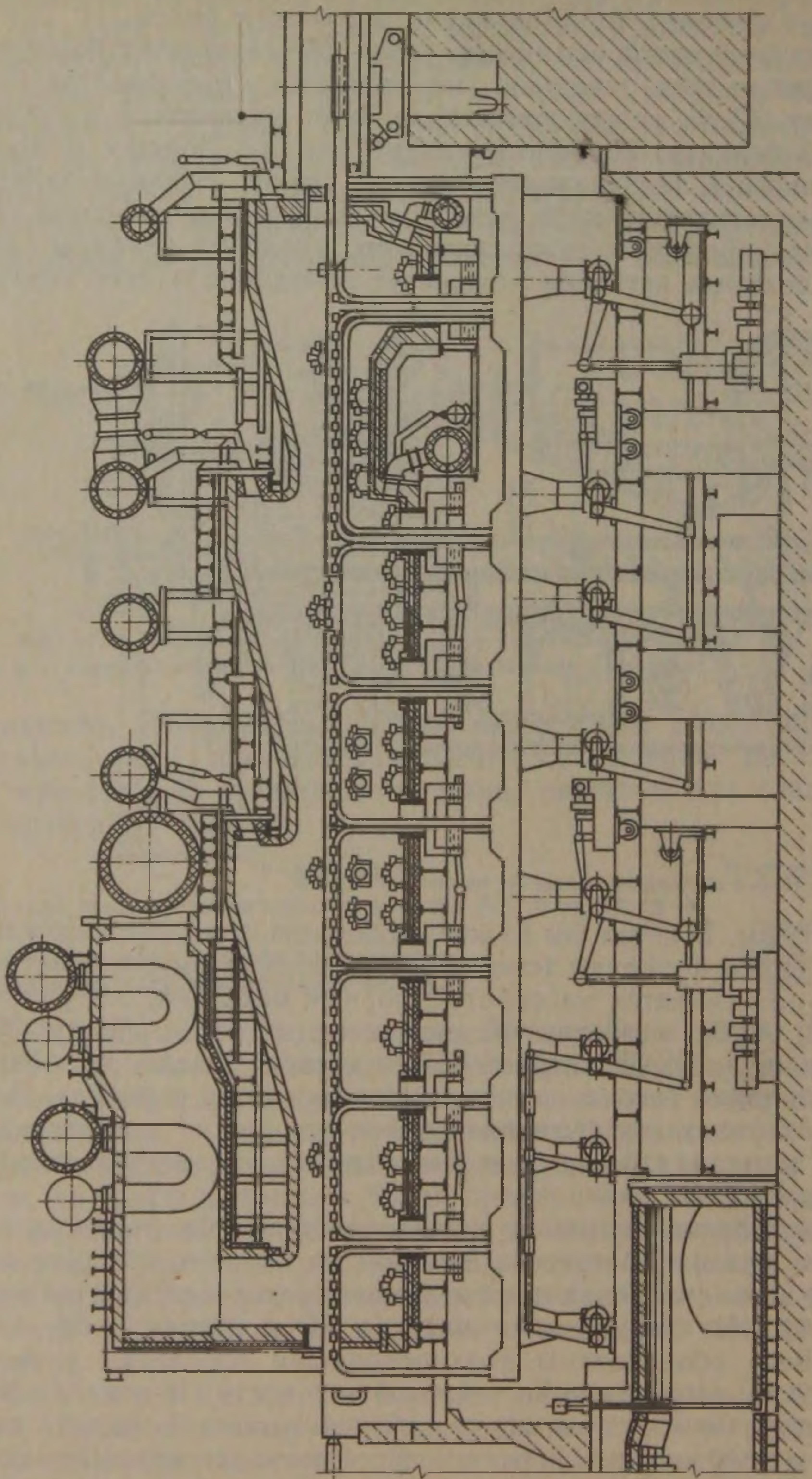


Рис. 27-22. Печь с шпательными балками с нижним обогревом металла

Напряжение активного пода в этих печах достигается 1300—1400 кг/(м²·ч), продолжительность пребывания заготовок размером 80×80 мм в печи составляет 23—30 мин, удельный расход тепла 1800—2000 кДж/кг.

Дымовые газы удаляются в дымосборник, расположенный у торца загрузки, а затем поступают в петлевой металлический рекуператор, расположенный ниже уровня пола цеха. Температура подогрева воздуха в рекуператоре около 300 °С.

Печи с роликовым подом

Печи с роликовым подом весьма перспективны, так как имеют наиболее совершенную систему транспортирования металла через печь. Условия службы роликов при рабочей температуре печи около 1300—1350 °С очень тяжелые. Поэтому обязательно применяют охлаждение роликов водой. Это приводит к тому, что удельный расход тепла достигает 4600—5000 кДж/кг, т. е. расход топлива по сравнению с расходом для печей с шагающим подом аналогичной производительности примерно вдвое выше. Это является большим недостатком. Поэтому печи с роликовым подом в настоящее время широко используют при термообработке металла.

Печи с роликовым подом применяют также для нагрева перед прокаткой заготовок, полученных на МНЛЗ. Так, например, в США в одной из таких печей с водоохлаждаемыми роликами нагреваются слябы толщиной 125 мм, шириной 1320 мм и длиной до 61 м. Масса каждого сляба доходит до 54 т. Полезная длина печи 122 м, производительность 220 т/ч. Печь отапливается природным газом. Горелки расположены равномерно по всей длине печи, осуществляется камерный режим нагрева с постоянной температурой 1320 °С по длине печи. Продолжительность нагрева сляба 36 мин, напряженность активного пода около 1350 кг/(м²·ч). Основные статьи расходной части теплового баланса имеют следующие удельные значения, %:

Нагрев металла	18
Потери тепла:	
с уходящими дымовыми газами	62
водоохлаждаемыми роликами	16
кладкой и пр.	4

Удельный расход тепла составляет 4800 кДж/кг. При установке рекуператора для подогрева воздуха до 400 °С он может быть снижен до 3150 кДж/кг.

Таким образом, приведенные данные показывают, что печь имеет характеристики, присущие нагревательным печам, работающим по камерному режиму. Однако для таких печей являются очень существенными потери тепла с водой, идущей на охлаждение роликов.

Определение числа печей и размещение их в цехе

Число печей, обслуживающих данный стан, определяют исходя из часовой производительности стана и максимальной производительности одного печного агрегата, соответствующей для толкательных печей допустимой длине проталкивания заготовок установленного размера. Размеры и производительность каждого печного агрегата прежде всего зависят от продолжительности нагрева металла.

Известно, что камерный режим нагрева или режим, при котором металл помещается сразу в зону печи с высокой температурой, применяют либо в случае нагрева тонких в тепловом отношении заготовок ($Bi < 0,25$), либо, если возникающий перепад температур не опасен для качества нагрева металла. При нагреве массивных в тепловом отношении заготовок температуру в начале (по ходу металла) методической зоны печи следует выбирать с учетом допустимой скорости нагрева. График нагрева необходимо составить так, чтобы в результате расчета получилась печь с рациональной разбивкой на зоны. Для этого следует пользоваться данными, приведенными для печей соответствующих конструкций. Методы определения продолжительности нагрева металла изложены в томе I данного учебника. После определения продолжительности нагрева можно определить размеры печи.

Напомним, что размеры рабочего пространства толкательных печей определяют, исходя из производительности, размера и длительности нагрева заготовки. Если P — заданная производительность печи, а t — длительность нагрева (ч), то для обеспечения этой производительности в печи в процессе нагрева должна постоянно находиться садка металла, равная $G = Pt$.

Зная размеры нагреваемой заготовки (a — ширина, м; b — толщина, м; l — длина, м), можно определить массу g одной заготовки и число заготовок, постоянно находящихся в печи: $n = G/g$.

Обычно при $n < 100$ шт, делают однорядную печь, длина которой будет равна $L = an$, м.

Для двухрядной печи $L = an/2$, м. Если $n/2 > 200$, то печь выполняют трехрядной и т. д.

Ширину печи определяют суммированием длины заготовки и необходимых зазоров между заготовкой и стенами печи или между двумя заготовками. Эти зазоры обычно равны примерно 0,25 м, поэтому ширина однорядной печи будет равна $B = l + 2 \cdot 0,25$ м; двухрядной $B = 2l + 3 \cdot 0,25$ м и т. д.

Длину печи с шагающим подом следует определять с учетом зазоров между заготовками. Обычно расстояние между гранями соседних заготовок составляет 1,5—2,5 их толщины.

Поэтому длина печи в этом случае составит, м:

$$L = an + (1,5 \div 2,5) b \cdot (n + 1).$$

Высоту свода печей h чаще всего определяют, исходя из опыта хорошо работающих печей. Так, для трехзонных и многозонных толкательных печей и с шагающим подом расстояние от высшей точки свода до уровня пода лежит в следующих пределах, м:

Начало печи (место посады металла)	1,2—1,5
Высота сварочных зон:	
верхних	2,2—2,6
нижних	2,4—3,0
Высота томильной зоны	1,5—1,7

Часто при достаточном опыте и наличии информации о хорошо работающих печах размер площади пода печей определяют не через

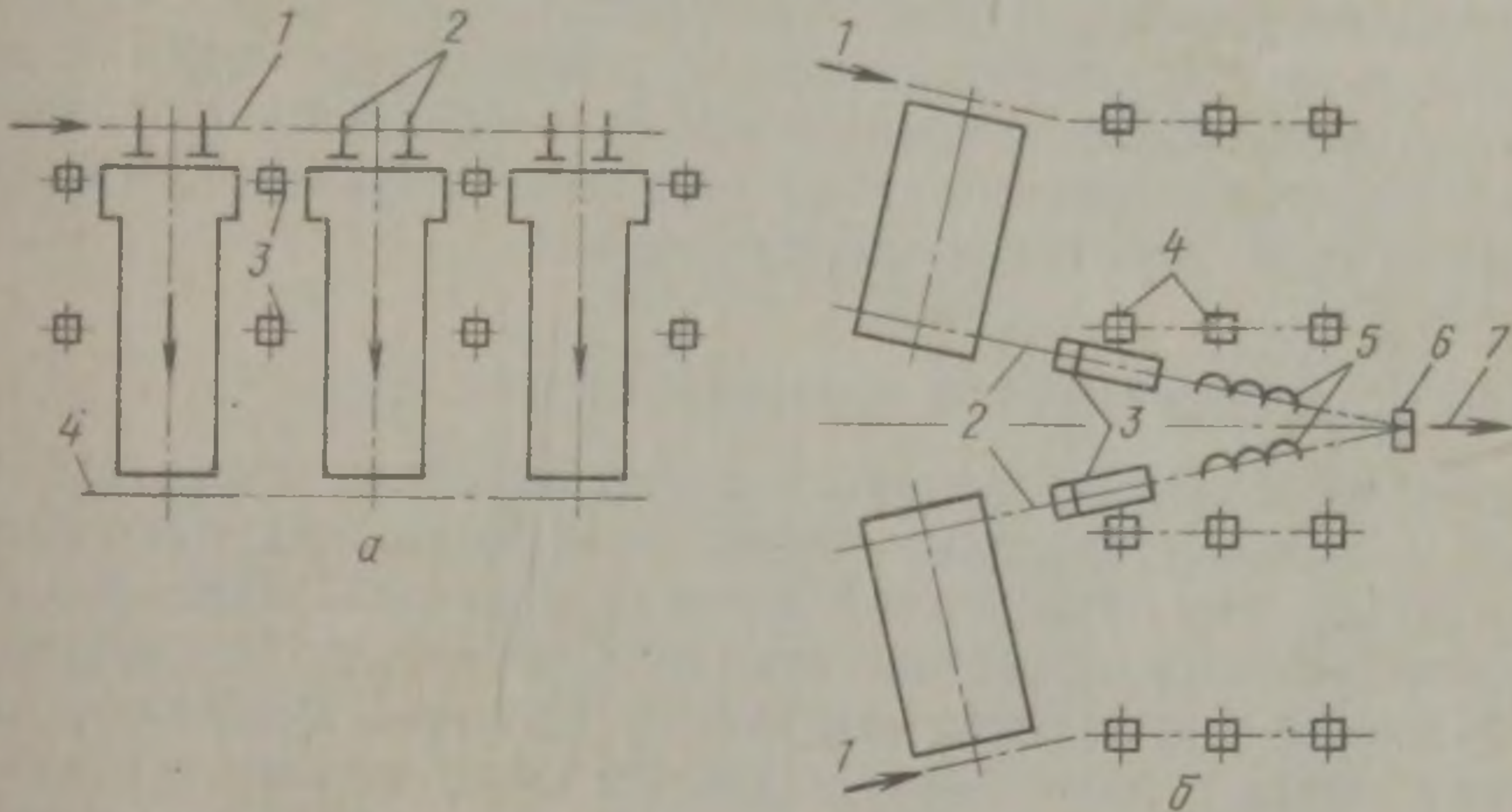


Рис. 27-23. Расположение нагревательных печей в цехе:

a — печи с торцевой выдачей (1 — рольганг загрузки; 2 — толкатель; 3 — колонны здания; 4 — рольганг выдачи); *б* — печи непрерывного мелкосортного стана бесконечной прокатки, расположенные по обе стороны от оси стана (1 — рольганг загрузки; 2 — рольганг выдачи и возврата; 3 — стыкосварочные машины; 4 — колонны здания; 5 — индукционные печи; 6 — первая клеть; 7 — стан)

продолжительность нагрева, а используя величину напряженности активного пода H_a . В этом случае $F_a = P/H_a$, м², а длина печи $L_a = F_a/B$, где B — ширина печи.

Размещая печи в цехе, надо прежде всего стремиться к тому, чтобы металл как можно меньше остыл при транспортировании от печи к стану. Это наиболее важно для малкосортных, проволочных и штрипсовых станов, в которых нагревается сравнительно тонкая, быстро остывающая заготовка. В силу этого надо размещать печи по возможности ближе к стану.

На характер расположения толкательных печей в цехе существенное влияние оказывает метод выдачи металла из печи. Если устанавливается одна печь, то ее обычно проектируют с боковой выдачей и ставят перпендикулярно оси прокатки так, что ось окна выдачи совпадает с осью прокатки. Если устанавливаются две или более печей с боковой выдачей, то передача заготовок от печи на рольганг стана возможна только при использовании специального дополнительного оборудования (опрокидывающихся

столов, наклонных брусьев и др.). Кроме того, при этом возрастает общая площадь печного пролета. Поэтому перед современными станами обычно устанавливают печи с торцовой выдачей, располагая их перпендикулярно оси прокатки (рис. 27-23, а).

Для нагрева металла перед мелкосортными станами (нагреваются заготовки длиной 10—12 м) целесообразно устанавливать одну печь и как можно ближе к стану. При установке двух или более мелких печей неизбежны дополнительные перемещения заготовки на воздухе, вследствие чего она остывает.

Специфические требования к расположению печей в цехе предъявляются при использовании метода бесконечной прокатки, когда осуществляется сварка стыков заготовок с их последующим догревом в индукционных печах. В этом случае наиболее целесообразно такое расположение печей (рис. 27-23, б), при котором обеспечивается независимость их работы и отсутствие значительных перегибов заготовок перед станом.

4. Печи трубопрокатных и колесопрокатных цехов

Для нагрева круглых заготовок перед обработкой на трубопрокатных и колесопрокатных станах требуются печи специальной конструкции, что объясняется формой заготовок. Возможны два принципа транспортирования подобных заготовок: по наклонному поду и вместе с вращающимся подом. Крупные недостатки методических печей с наклонным подом привели к тому что для нагрева круглой заготовки были созданы высокомеханизированные печи с вращающимся подом и секционные скоростного нагрева.

В печах с вращающимся подом, кроме нагрева круглой трубкой заготовки, удобно нагревать фасонные заготовки, например для колесопрокатных станов. Под в этих печах может быть кольцевым или так называемым тарельчатым. В трубо- и колесопрокатных цехах применяют печи с кольцевым подом. Наряду с кольцевыми печами для нагрева труб и трубной заготовки применяют секционные печи.

Печи с кольцевым подом. На ряде отечественных металлургических заводов работают печи с кольцевым подом (рис. 27-24).

Заготовки, лежащие неподвижно на вращающемся поду, вместе с подом проходят все необходимые зоны нагрева и выдаются через окно выдачи, расположенное рядом с окном загрузки. Загрузку и выдачу заготовок осуществляют одновременно двумя кранами. Угол между осями окна загрузки и окна выдачи обычно составляет 28° . Следовательно, заготовка, пройдя 332° полного оборота пода, будет нагреваться до необходимой температуры, т. е. время полного оборота пода, соответствующее 332° , равно продолжительности нагрева заготовки. Под движется толчками, причем при каждом толчке он поворачивается на угол, соответствующий расстоянию между двумя соседними заготовками (10—12°).

Кольцевые печи могут работать на жидком и газообразном топливах. Горелки (форсунки) устанавливаются во внутренних и наружных стенах печи. Применяют также и сводовое отопление таких печей. Продукты сгорания можно отбирать в одном месте (у окна выдачи) и в нескольких местах. Расположение горелок и дымоотводящих каналов — весьма важная характеристика кольцевых печей.

В зависимости от этого печь может работать по методическому или камерному режиму.

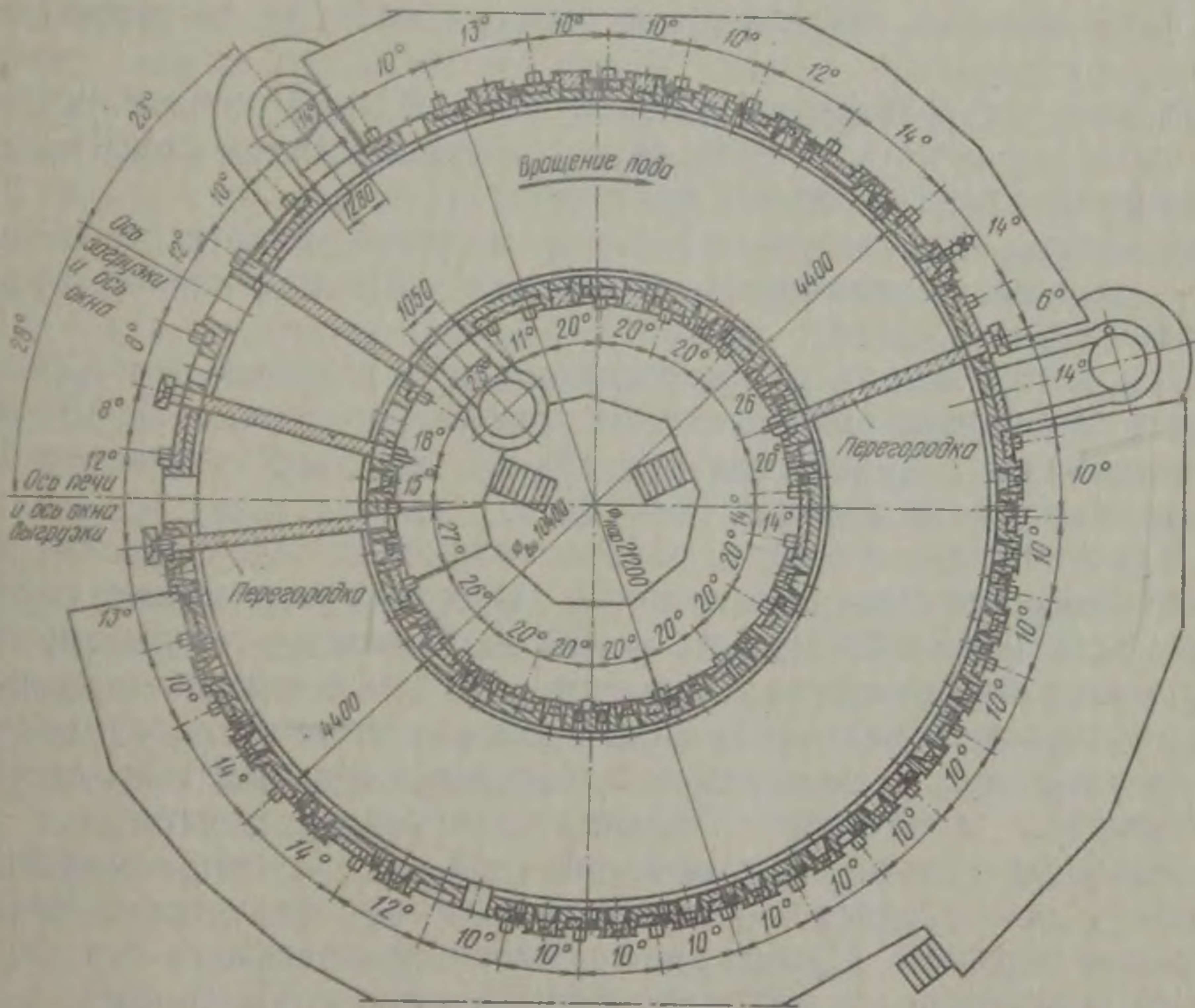


Рис. 27-24. План кольцевой печи

При работе по методическому режиму дым отбирается через два дымоотводящих канала, расположенных один напротив другого около окна загрузки. На подобных печах часто предусматривают промежуточные дымоотводящие каналы. Если эти промежуточные дымоотборы отключены, то обеспечивается методический режим. Если они включены, то печь работает по камерному режиму.

Горелки (форсунки) расположены равномерно по всей окружности печи, но при методическом режиме работы мощность горелок в зонах подогрева металла, нагрева и выдержки должна быть различной и обеспечивать температурный график, свойственный этому режиму. При камерном режиме мощность горелок распределяется равномерно. Методический режим обычно применяют при нагреве легированных сталей.

В соответствии с температурным режимом печь делят на ряд участков, к каждому возможен свой отдельный автоматически регулируемый подвод газа и воздуха. Причем для поддержания определенных температурных условий на отдельных участках используют подвесные перегородки («занавески»). Между подом печи и «занавеской» остается зазор, необходимый для свободного перемещения заготовок. Перегородки обычно устанавливают в следующих местах:

а) между окном загрузки и выгрузки для устранения охлаждающего влияния загрузочного участка печи на нагретые заготовки;

б) между нагревательной зоной и зоной выдержки для устранения влияния высокой температуры нагревательной зоны на температурный режим зоны выдержки;

в) между нагревательной зоной и зоной подогрева металла для уменьшения теплового излучения из высокотемпературной нагревательной зоны.

При методическом режиме нагрева в кольцевых печах выполняется следующее распределение топлива по зонам, %: на подогревательную зону приходится 25—27, на нагревательную 60—54 и на зону выдержки 15—19.

В соответствии с опытом работы кольцевых печей во избежание оплавления металла оптимальная высота расположения горелок под подом должна составлять ~600 мм. С целью утилизации тепла отходящих из печи продуктов сгорания все отдельные дымоотводящие каналы объединены в одну общую систему дымоходов, которая позволяет установить за печью рекуператоры для подогрева воздуха и в случае необходимости, для подогрева газа.

Кольцевые печи — механизированные и автоматизированные агрегаты, что позволило устранить тяжелый физический труд по кантовке металла. Применение этих печей позволяет без затруднений переходить от методического режима к камерному, и наоборот. Угар в кольцевых печах составляет 0,5—1 %, т. е. меньше, чем в печах иных конструкций. Для заготовок диаметром 110—150 мм удельная производительность печей составляет 350—400 кг/(м²·ч) при удельном расходе тепла 1670—2500 кДж/кг. Коэффициент полезного действия кольцевых печей при максимальной производительности достигает 40—45 %.

Тепловой расчет кольцевых печей можно выполнить так же, как и расчет методических или камерных печей с учетом того, что в кольцевых печах не весь под занят металлом, а следовательно, подина хорошо прогрета и активно участвует в теплообмене, излучая тепло на лежащие заготовки. Установлено, что заготовка удовлетворительно прогревается по сечению. Поэтому нагрев заготовки в таких печах следует рассматривать как двусторонний и брать в качестве расчетного размера радиус заготовки.

Секционные печи скоростного нагрева. Эти печи применяют в трубопрокатных цехах для нагрева перед

прокаткой круглой заготовки диаметром до 200 мм и для термобработки (нормализации, отжига) труб различного диаметра. Скоростной нагрев металла достигается в результате применения всестороннего обогрева при условии, что температура печных газов и кладки значительно превышает конечную температуру нагрева металла.

Секционные печи состоят из секций, между которыми расположены водсохлаждаемые ролики, для каждого из них предусмотрен собственный привод. Ролики установлены под углом к направлению движения, что обеспечивает вращение нагреваемых изделий. Каждая секция представляет собой хорошо зафутерованную небольшую камеру (рис. 27-25) с высокой тепловой нагрузкой. Печи стапливают газособразным топливом.

В каждой секции размещено 5—6 горелок. Горелки установлены тангенциально, с одной стороны — под металлом, а с другой стороны — над ним. При тангенциальном расположении горелок создается интенсивное движение газов, что приводит к значительному разогреву поверхности кладки и интенсификации конвективного теплообмена. Несколько секций объединены в одну тепловую зону. Тепловая нагрузка в тех секциях, в которые поступает холодный металл, всегда больше, чем в секциях последующих зон.

Секционные печи работают на газе с высокой теплотой сгорания, часто с подогревом воздуха и газа до 300—400 °С. Обычно применяют металлические трубчатые рекуператоры или рекуператоры типа «термоблок» с залитыми в чугун трубками. Рекуператоры могут быть установлены под секциями, а также над печью. При установке рекуператоров сверху каждый из них обычно обслуживает одну секцию. При установке внизу один рекуператор обслуживает несколько секций, составляющих одну зону. Более удобна установка рекуператоров под печью, так как в случае выхода одной секции печи из строя ее легче заменить другой, без дополнительных демонтажных операций.

Наиболее эффективно секционные печи работают при температуре секции около 1450—1500 °С, при этом достигается снижение угара на 1,0—1,5 %. Удельный расход тепла секционных печей довольно высок, он составляет 2500—4200 кДж/кг, однако они занимают небольшие производственные площади и легко могут быть включены в автоматизированные поточные линии.

Удельную производительность секционных печей относят не к 1 м² площади пода, а к 1 м длины печи, она равна, кг/(м·ч):

$$P = P_1 F,$$

де P_1 — удельная производительность печи, отнесенная ко всей тепловоспринимающей поверхности нагреваемых изделий за время t , кг/(м²·ч); F — тепловоспринимающая поверхность 1 м длины заготовки, м²/м.

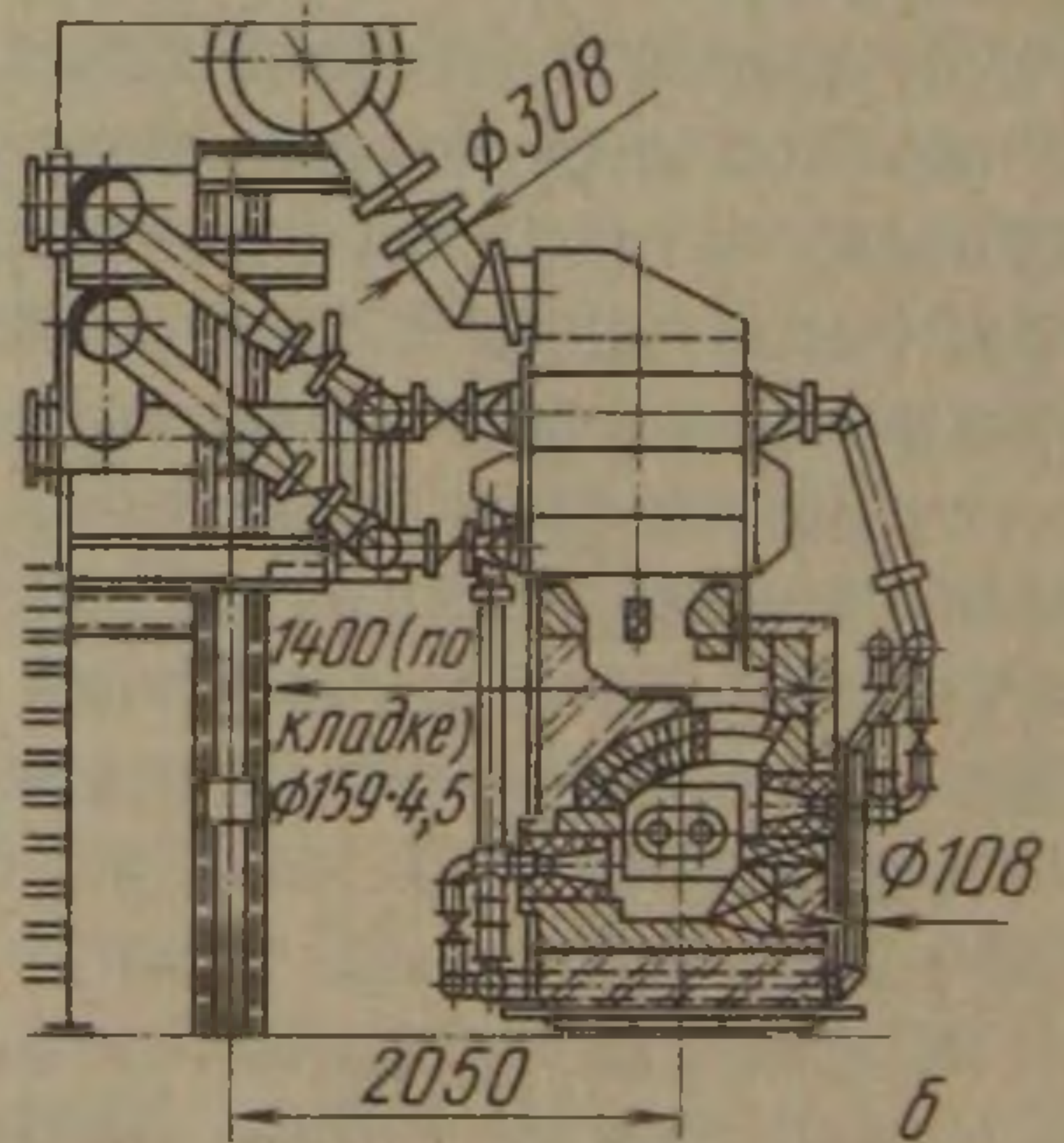
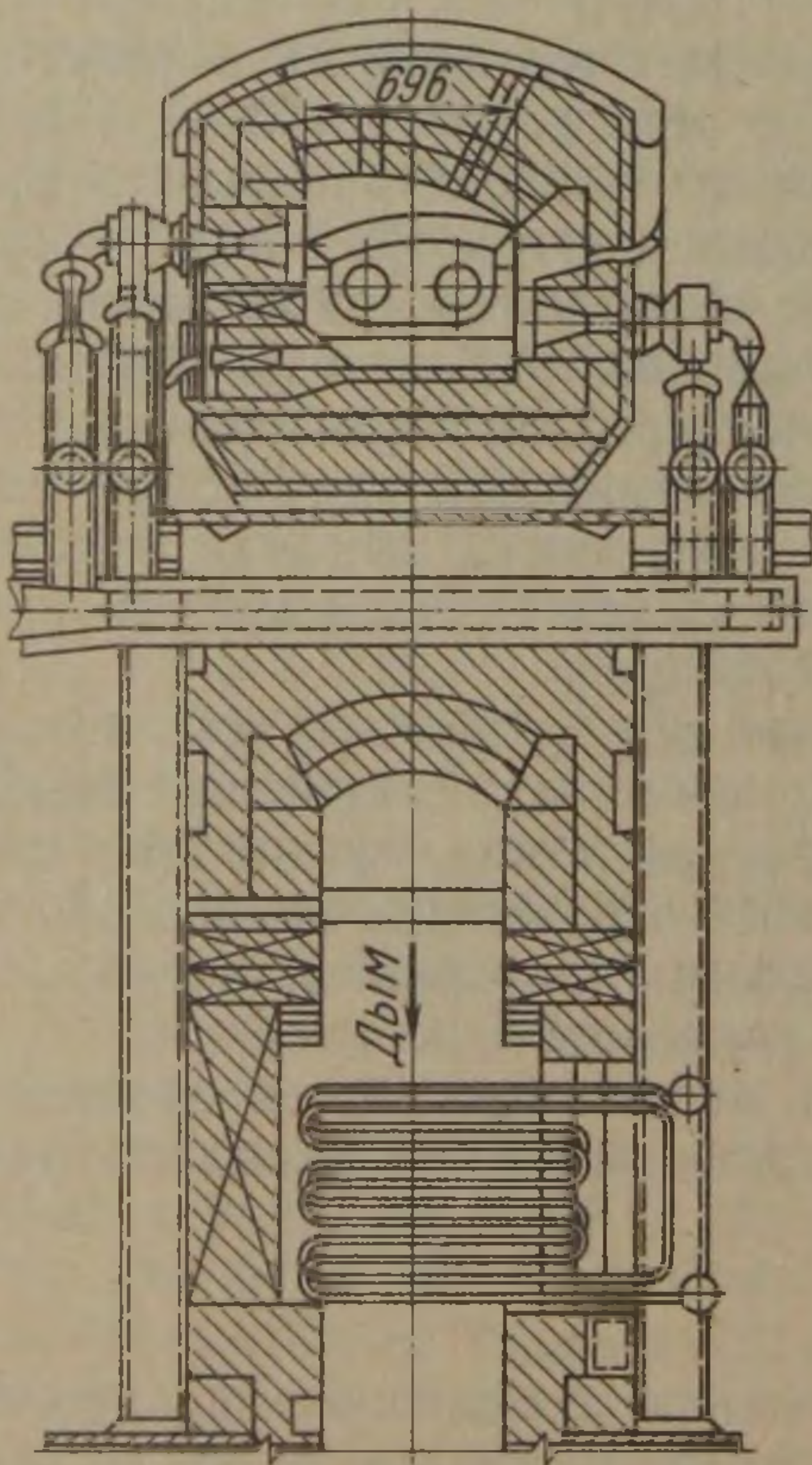
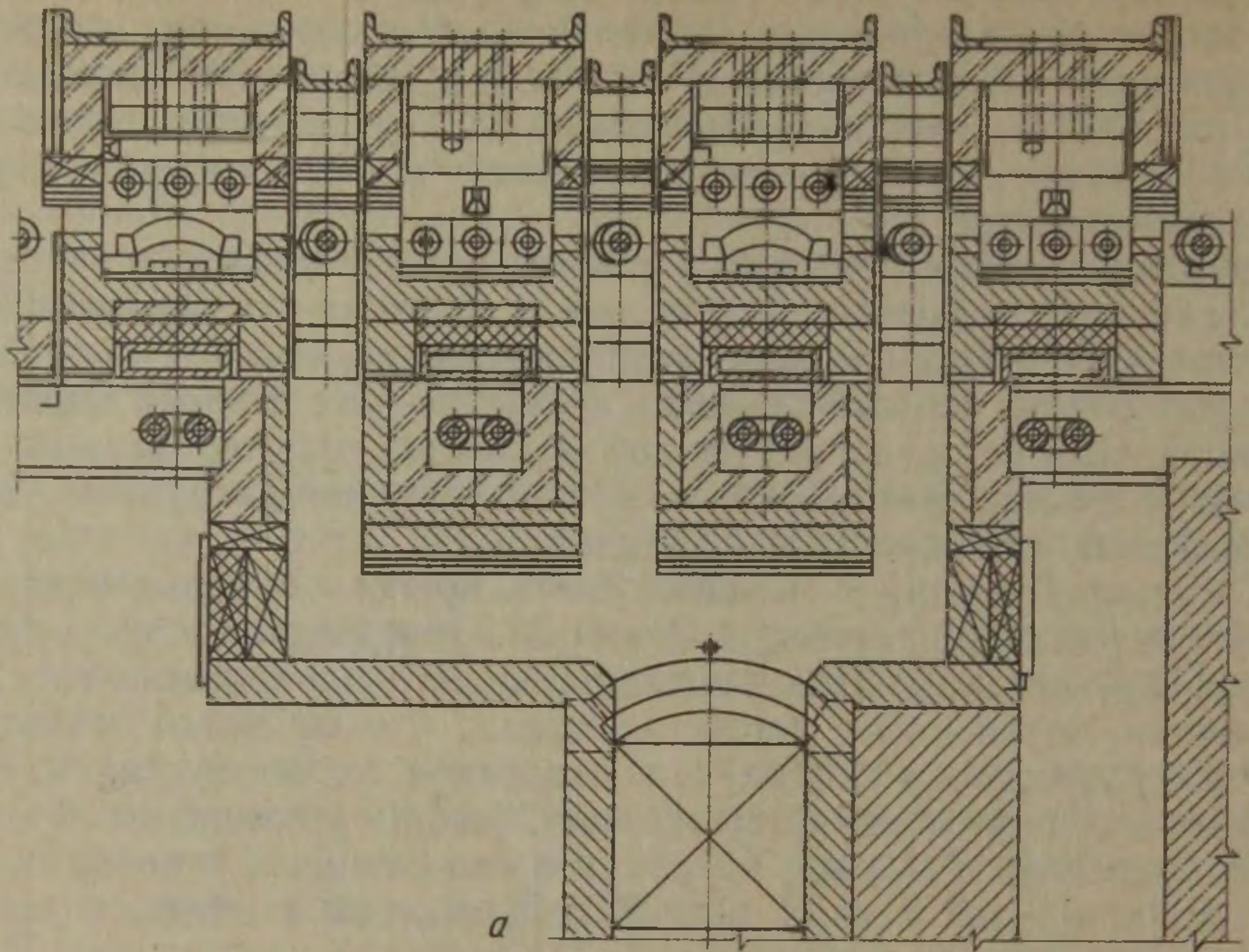


Рис. 27-25. Секционные печи с расположением рекуператоров под печью (а) и над печью (б)

Обычно скорость нагрева в секционных печах характеризуется удельным временем прогрева (мин/см толщины), которое для нагрева горячекатаных труб, холоднокатаных труб, круглой заготовки до температуры прокатки составляет соответственно 3—4; 2—2,5 и 1,0—1,2 мин/см. Скорость прохода изделий через печь обычно равна 4—16 м/мин. Печи для отжига холоднокатаных труб обычно состоят из девяти секций и обеспечивают производительность 2,5—4 т/ч. Печи для нагрева заготовок перед прокаткой шаров и труб состоят из 20—35 секций и могут обеспечивать производительность 20—40 т/ч.

Недостаток секционных печей скоростного нагрева заключается в возможности перегрева изделий и кладки при производственных неполадках в поточных линиях. Во избежание этого следует всеми средствами снижать аккумулялирующую способность футеровки секций, чтобы в случае необходимости можно было быстро уменьшить расход топлива и снизить температуру до величины, соответствующей уровню холостого хода печи.

Глава 28

НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ, РАБОТАЮЩИЕ ПО КОНВЕКТИВНОМУ РЕЖИМУ

1. Общие сведения

Как уже отмечалось, в печах, обеспечивающих нагрев металла перед обработкой давлением, основным видом теплоотдачи является излучение. При этом для необходимого уровня температуры и теплоотдачи кладка печи должна иметь необходимую достаточно высокую температуру. Это в полной мере относится и к печам скоростного нагрева, представителями которых являются описанные выше секционные печи. В этих печах необходимо поддерживать температуру внутренней поверхности кладки на максимально допустимом по огнеупорности применяемого материала уровне, что может быть достигнуто лишь при значительной тепловой изоляции печи. В результате таким печам свойственны два крупных недостатка: предельная температура внутренней поверхности кладки и большая тепловая инерция, вызванная значительной теплоизоляцией печи.

Вместе с тем большой тепловой поток (свойственный скоростному нагреву) на поверхность металла может быть создан и конвективным путем, если раскаленные газы с большой скоростью направить на поверхность нагреваемого металла. Такой метод, получивший название скоростного конвективного (ударного) нагрева, появился сравнительно недавно и настойчиво разрабатывается применительно к кузнечному и прокатному нагреву. Для его осуществления создаются специальные горелки, внутри кото-

рых осуществляется сжигание газообразного топлива при величине коэффициента расхода воздуха около единицы. Продукты сгорания, имеющие температуру близкую к калориметрической, выходят из горелки с высокой скоростью (100 м/с и более), направляются на поверхность металла и обеспечивают очень высокий внешний конвективный поток. Компонуя горелки соответствующим образом, можно создавать печи для нагрева различных заготовок. Необходимо отметить, что температура кладки в таких печах может находиться на весьма умеренном уровне, поскольку подавляющее количество тепла подается к поверхности металла конвекцией струями раскаленных продуктов сгорания. Если, например, осуществляется нагрев металла до 1200 °С, то нет необходимости иметь температуру внутренней поверхности кладки выше ~ 1250 °С. Такая температура не является предельной даже для наиболее дешевого огнеупорного материала.

При использовании конвективного (ударного) нагрева атакующими струями раскаленных газов высокий тепловой поток на поверхности нагреваемого металла достигается благодаря прямому удару струи газов с большой скоростью о поверхность металла. В результате достигается разрушение пограничного слоя — лимитирующего звена при конвективном теплообмене и обеспечивается высокий коэффициент теплоотдачи конвекцией [~ 350 — 400 Вт/(м²·К)]. Величина коэффициента теплоотдачи конвекцией при нагреве атакующими струями зависит от ряда факторов, к которым относятся: скорость газов, теплофизические характеристики газов, относительные конструктивные размеры рабочего пространства печи и нагреваемого металла.

В качестве примера подобной зависимости можно привести критериальное уравнение конвективного теплообмена, полученное для средней по поверхности нагреваемого цилиндра интенсивности теплообмена (см. приложение II):

$$Nu = 0,23 \cdot Re^{1,14} \cdot Pr^{0,25} \left(\frac{x}{d_0} \right)^{1,67} \left(\frac{D_k}{D_3} \right), \quad (28-1)$$

где x — расстояние от сопла горелки до поверхности заготовки, мм; d_0 — диаметр сопла горелки, мм; D_k — диаметр камеры нагрева, мм; D_3 — диаметр нагреваемой заготовки, мм.

Многочисленными экспериментами установлено, что значительное увеличение коэффициента теплоотдачи при ударном нагреве имеет место лишь до увеличения величины скорости газов около поверхности заготовки до 90—100 м/с. При увеличении действительной скорости газов выше этой величины коэффициент теплоотдачи изменяется незначительно.

Большое влияние на величину коэффициента теплоотдачи оказывает относительное расстояние x/d_0 между срезом сопла горелки x и диаметром сопла d_0 . Так, изменение этой величины от 2 до 10 уменьшает величину коэффициента теплоотдачи более чем в 1,5 раза.

Скоростной конвективный (ударный) нагрев обладает рядом преимуществ по сравнению с нагревом в обычных печах: резко снижается обезуглероживание и окисление металла; увеличивается скорость нагрева, которая, однако, лимитируется внутренней задачей, в результате чего этот метод наиболее приемлем для нагрева тонких в тепловом отношении изделий. Проведенные металлографические исследования образцов, подвергавшихся конвективному (ударному) нагреву и обычному нагреву, убедительно говорят в пользу первого.

Все эти преимущества, а также малые размеры возможных печей при их высокой производительности, малая тепловая инерционность печей, большая универсальность использования нагрева атакующими струями раскаленных газов делают этот метод весьма перспективным, чем и вызвано большое внимание, которое уделяется разработке этого метода нагрева металла в ряде стран.

2. Конструкции печей

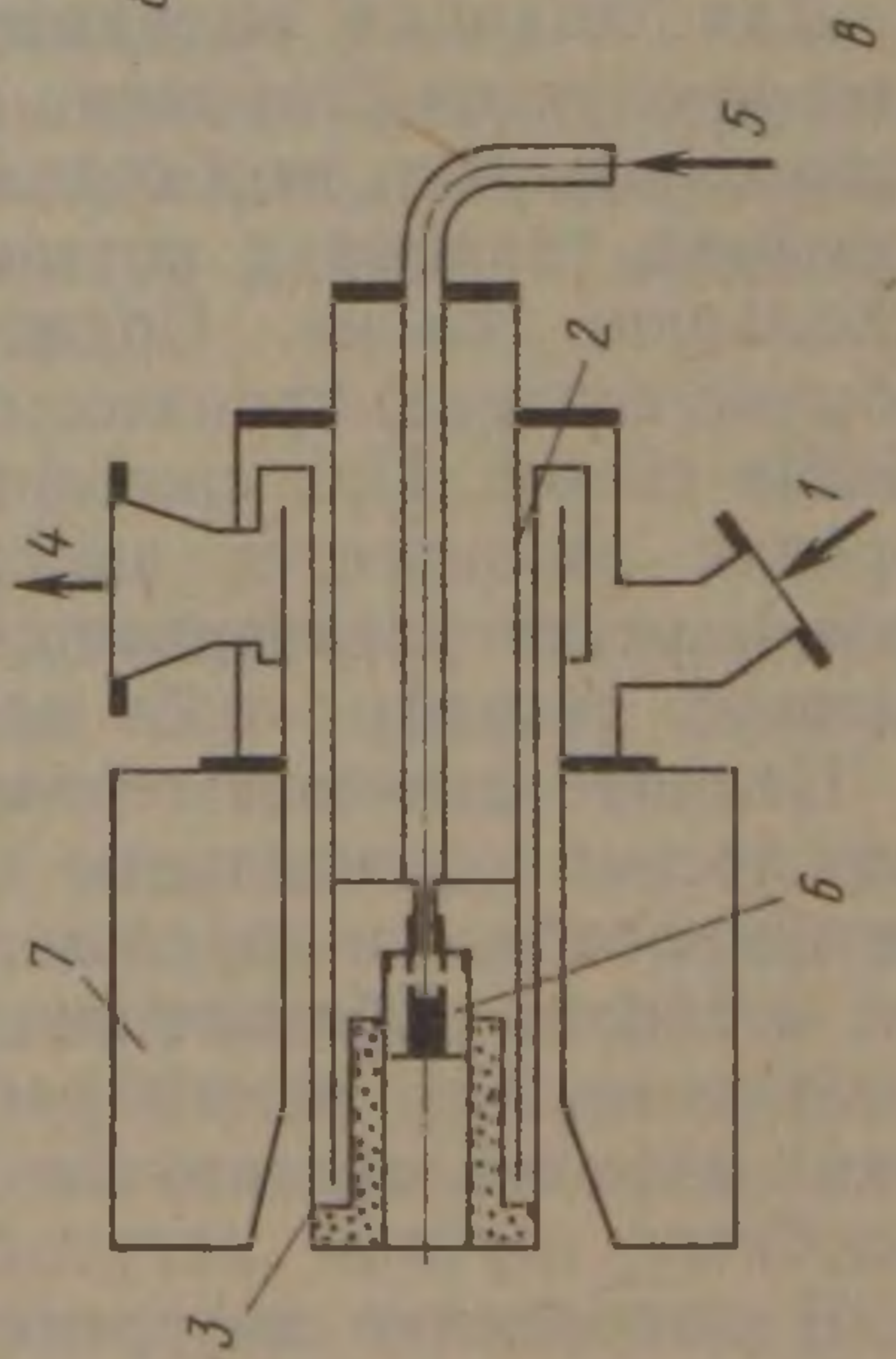
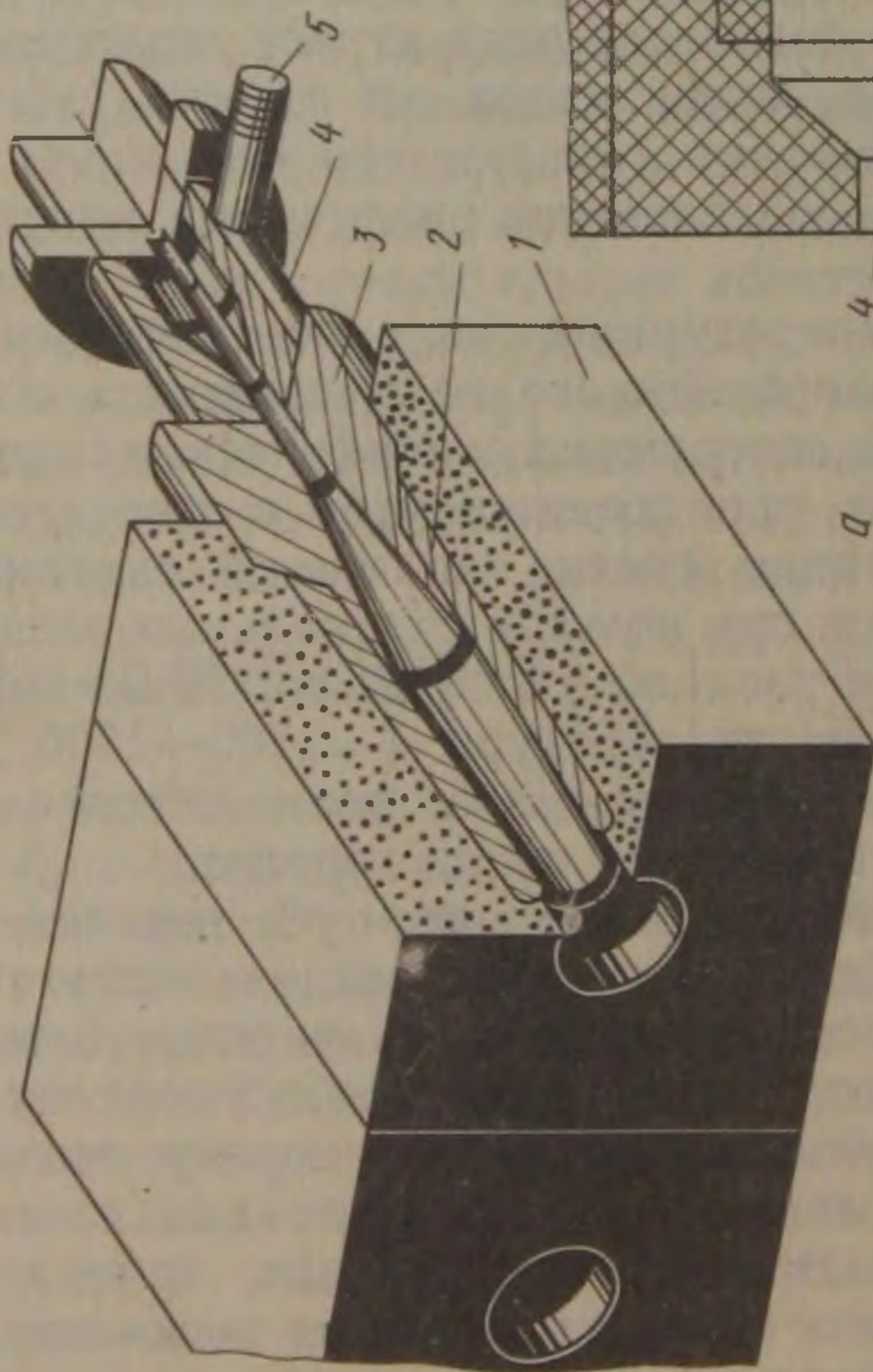
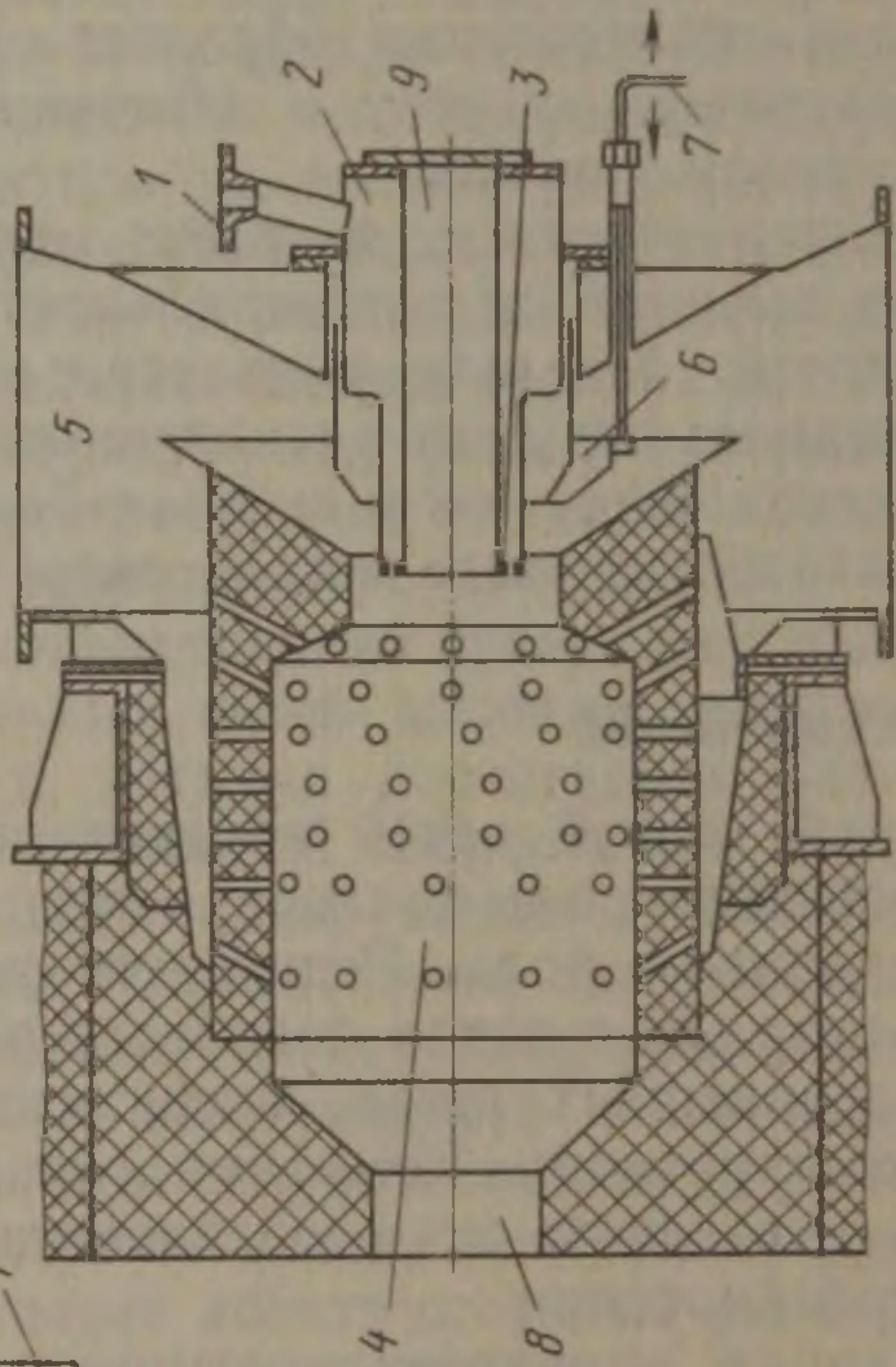
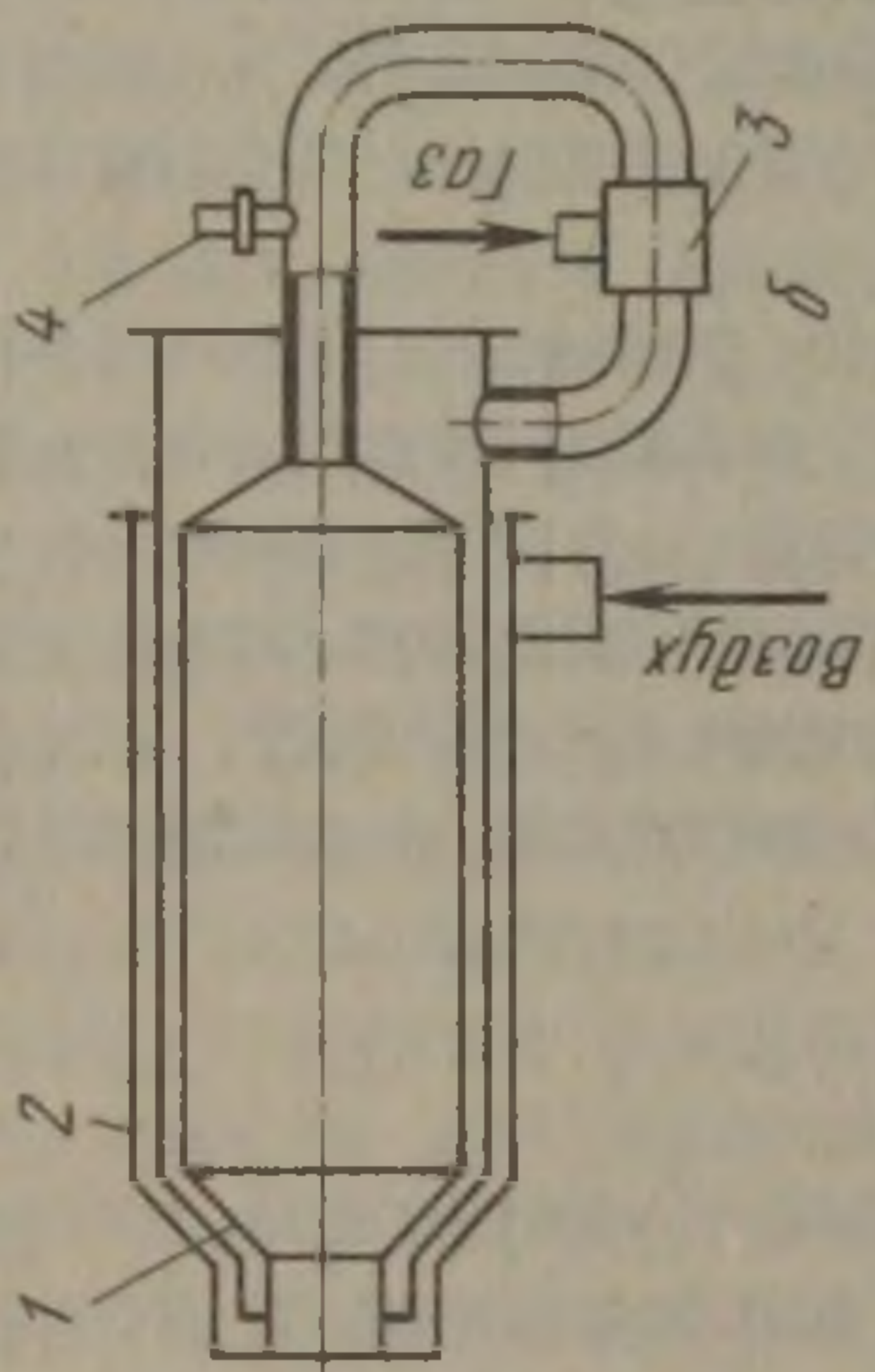
Отличительной чертой печей конвективного (ударного) нагрева является пассивная роль футеровки печи, теплоотдача от которой играет подчиненную роль. Решающую роль в теплоотдаче к нагреваемому металлу в печах подобного рода играет теплопереход от струй раскаленных газов, истекающих из горелок соответствующей конструкции. Компонова горелки тем или иным способом, можно создавать печи, обладающие различными конструктивными особенностями.

Для создания высокотемпературного высокоскоростного потока продуктов сгорания, направленного на поверхность нагреваемого изделия, необходимы совершенно специфические горелки, сжигание топлива в которых происходит внутри в относительно небольшом объеме. Поджигание смеси топлива и окислителя (обычно воздуха) производится при помощи специальных электрических свечей. При сжигании топлива в закрытом объеме внутри горелки развивается высокая температура ($\sim 1700-1900^\circ\text{C}$ и более), резко увеличивается давление газов, что и обеспечивает высокую скорость газов на выходе из сопла горелок.

Наличие высокой температуры внутри корпуса горелки создает весьма значительные проблемы по обеспечению достаточной жизнеспособности горелок, особенно при их значительной тепловой мощности. Обеспечение устойчивой работы таких горелок при необходимых границах регулирования делает задачу создания таких горелок достаточно сложной. В принципе для создания подобных горелок могут быть использованы два приема:

1) выполнение внутреннего объема горелки из высококачественных огнеупорных материалов;

2) выполнение внутреннего объема из жаростойкой стали с использованием охлаждения стенок горелки, например, воздухом, подаваемым для горения.



На рис. 28-1 представлены различные конструкции горелок для печей конвективного нагрева. Огнеупорную впускную насадку тоннельной горелки (рис. 28-1, а), где начинается воспламенение и камеру сгорания выполняют из высокоглиноземистых материалов. Скорость выхода продуктов сгорания из сопла горелки составляет 100—150 м/с, кратность регулирования горелки примерно равна 1 : 6, что позволяет вести автоматическое управление изменением температуры. Располагая горелки в ряд с двух (или четырех) сторон от нагреваемой заготовки, можно скомпоновать печь конвективного скоростного нагрева.

Горелки с металлическим корпусом из жаростойкого металла с охлаждением воздухом, подаваемым для горения (рис. 28-1, б), спроектированы, исходя из условия, что температура стенки камеры горения не должна превышать 900—950 °С, а температура подогрева воздуха не должна превышать 600 °С. Диапазон регулирования не менее 1 : 4. Результаты испытания горелок подобного рода показали, что горелки устойчиво работают при постоянном коэффициенте расхода воздуха равном 1,05, скорость истечения от 40 до 200 м/с.

Большой интерес представляют также горелки, представленные на рис. 28-1, в, г.

С использованием скоростных горелок был создан ряд полупромышленных печей. На рис. 28-2 показана печь скоростного конвективного нагрева производительностью 500 кг/ч с однорядным расположением заготовок диаметром 60—80, длиной до 120 мм. По всей длине установлено десять скоростных горелок с металлическими воздухоохлаждаемыми камерами горения (см. рис. 28-1, б) по пять с каждой стороны. Расстояние между осями соседних горелок 348 мм, противоположных 174 мм. Установка горелок по всей длине рабочего пространства печи позволяет изменять длину отапливаемой зоны путем включения или отключения определенного числа горелок. Часть рабочего пространства с отключенными горелками служит методической зоной. Розжиг горелок производится индивидуально. Каждая горелка оборудована электрической запальной свечой.

Рис. 28-1. Горелки для печей конвективного (ударного) нагрева:

а — тоннельная горелка с камерой сгорания, выполненной из огнеупорных материалов (1 — огнеупорный блок; 2 — камера сгорания; 3 — впускная насадка; 4 — металлический впускной блок; 5 — труба, подающая топливо и воздух); б — скоростная горелка с металлической воздухоохлаждаемой камерой сгорания (1 — камера сгорания; 2 — кожух; 3 — смеситель; 4 — запальная свеча); в — горелка с авторегуляцией (1 — подвод воздуха; 2 — воздушная трубка, по которой проходит подогреваемый воздух; 3 — кольцевой канал для удаления продуктов сгорания из печи; 4 — удаление продуктов сгорания (к дымососу); 5 — подвод газа; 6 — сопло для смешения газа с подогретым воздухом; 7 — стена печи); г — высокоскоростная горелка (1 — подвод газа; 2 — кольцевое пространство для газов; 3 — отверстия для прохода газа в камеру сгорания; 4 — камера сгорания; 5 — коробка для подвода воздуха в камеру сгорания через специальные отверстия; 6 — клапан, который открывается при помощи тяги; 7 — пропорционирование подачи воздуха в камеру сгорания через кольцевую щель и отверстия в стенках; 8 — сопло; 9 — цилиндрическая камера для установки форсунки в случае необходимости)

Заготовки проталкиваются через печь в торец по двум параллельным водоохлаждаемым трубам, конструкция которых исключает возникновение темных пятен на поверхности нагреваемого металла. Трубы опираются на водоохлаждаемые опоры. Выдача заготовок из печи производится по наклонному желобу. Разгрузочный торец печи оборудован водоохлаждаемой панелью. Отходящие газы отводятся по вертикальному каналу и дымопроводу, оборудованному эжектором, в атмосферу.

Печь оснащена системой автоматического регулирования теплового режима. Суммарный удельный тепловой поток к поверхности металла составляет $850 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, а доля тепла, передаваемого металлу конвекцией достигает 80—85 %. Печь обладает

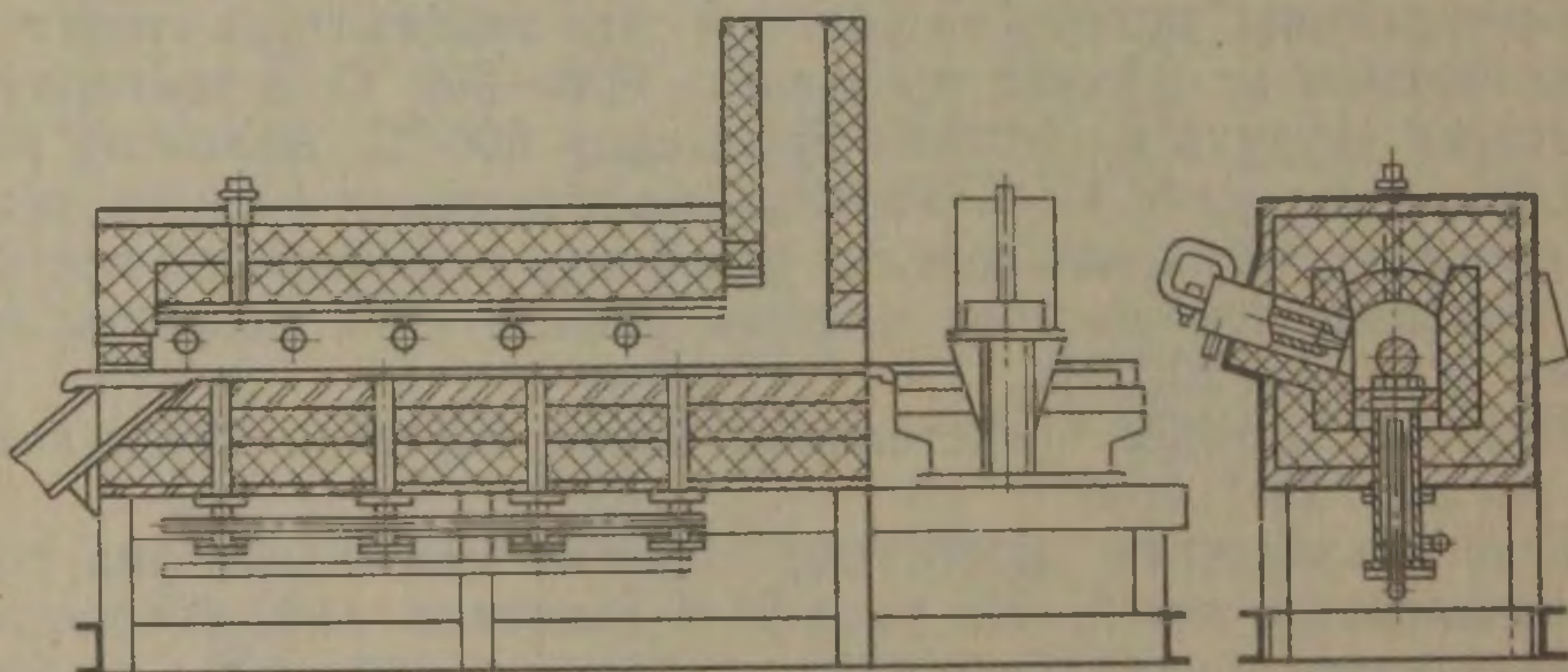


Рис. 28-2. Схема автоматизированной газовой печи скоростного конвективного нагрева стальных заготовок

малой тепловой инерцией, обеспечивает величину к. и. т. 20—25 % (без рекуператоров). Печь работает в режиме малоокислительного нагрева, себестоимость нагрева на 30 % ниже, чем в индукционной установке.

На рис. 28-3 представлена проходная печь конвективного нагрева, скоростные горелки в которой расположены только в зоне интенсивного нагрева, что позволяет иметь зону подогрева и тем самым повысить величину коэффициента использования тепла.

Высокая интенсивность внешнего теплообмена при конвективном нагреве делает весьма перспективным подобный метод нагрева в следующих случаях:

- 1) при нагреве термически тонкого тела, применительно к стальным заготовкам до толщин не превышающих 70—80 мм;
- 2) при малоокислительном нагреве в случае использования печи конвективного нагрева в паре с подогревательной печью, в которой равномерно по сечению нагревать металл до $800\text{—}900^\circ\text{C}$, а затем в конвективной печи догревать его до $1150\text{—}1200^\circ\text{C}$ в режиме скоростного конвективного нагрева;

- 3) при подогреве слябов, полученных на машинах непрерывного литья заготовок и охлажденных в большей мере с поверхности, в этом случае можно сделать процесс прокатки таких сля-

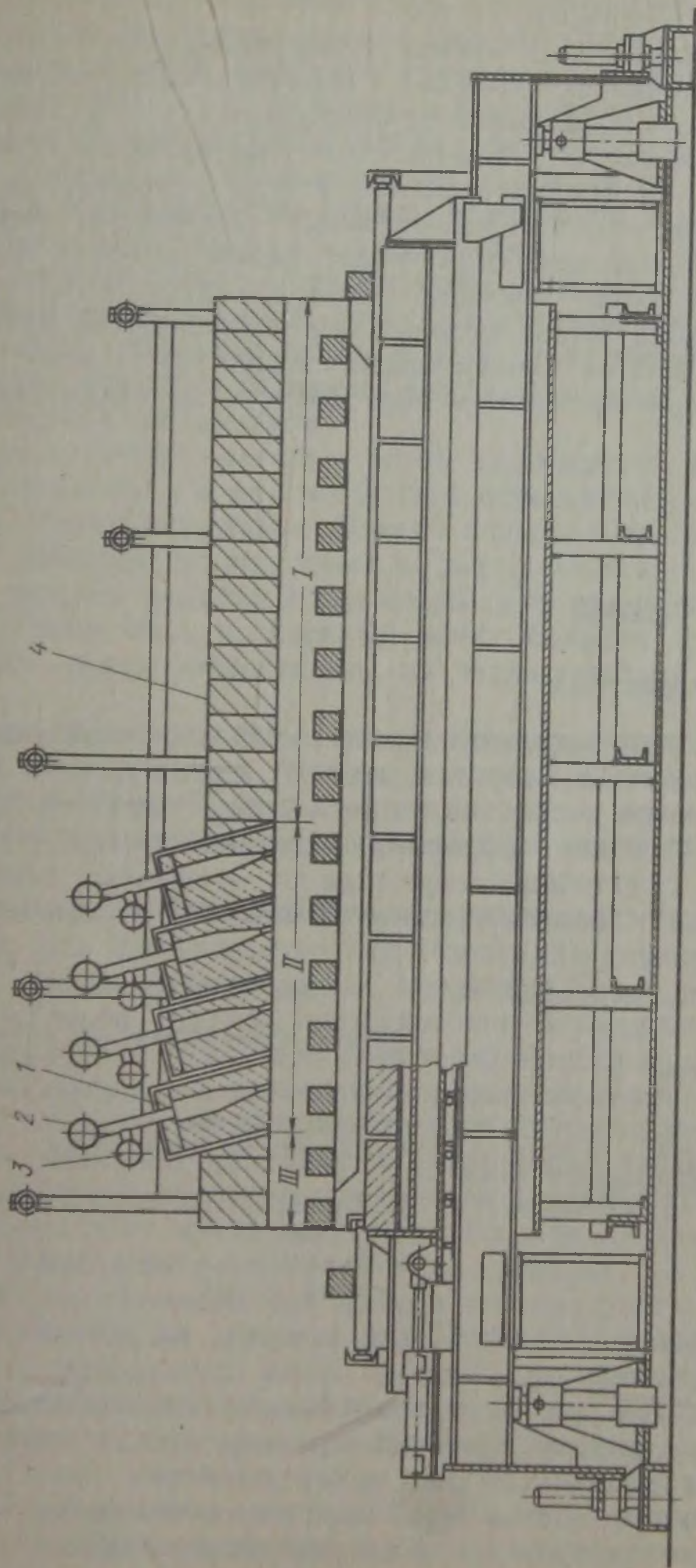


Рис. 28-3. Проходная нагревательная печь конвективного нагрева:
 I — зона подогрева; II — зона интенсивного нагрева; III — зона выдержки; 1 — горелочные блоки; 2 — подвод воздуха;
 3 — подвод газа; 4 — керамический свод

бов значительно более эффективным, так как не надо будет нарезать коротких слябов, остужать их и нагревать вновь до $\sim 1200^\circ\text{C}$ (как это делается сейчас).

Дальнейшая разработка метода конвективного нагрева позволит создать тепловые машины, оборудованные панелями, набранными из скоростных горелок, пригодные для нагрева самых разнообразных заготовок. Одним из самых главных обстоятельств, сдерживающих пока распространение рассматриваемого метода нагрева, является отсутствие надежных скоростных горелок значительной тепловой мощности. В настоящее время во многих странах ведутся работы, имеющие целью как разработку новых конструкций горелок, так и исследование особенностей процесса теплообмена в условиях конвективных печей, что позволяет надеяться на быстрый прогресс в этой области металлургической теплотехники.

Глава 29

ТЕРМИЧЕСКИЕ ПЕЧИ

1. Общая характеристика

В прокатных цехах предприятий черной металлургии термической обработке подвергаются сортовой прокат, горячекатаный и холоднокатаный листы, холоднокатаная лента, рельсы и другая продукция. Применяемые виды термической обработки достаточно разнообразны.

Наиболее распространенные виды термической обработки приведены ниже:

<i>Обрабатываемая продукция</i>	<i>Вид термообработки</i>
Сортовой прокат	Полный и изотермический отжиг
Горячекатаный лист: специальная и легированная сталь толщиной 4 мм и более малоуглеродистая и низколеги- рованная сталь толщиной 50 мм	Нормализация или закалка с последующим отпуском Отжиг или высокий отпуск
Холоднокатаный лист и лента	Низкотемпературный рекристаллизационный отжиг
Рельсы	Нормализация, изотермическая выдержка, отпуск

Все виды термической обработки проката могут быть разделены на две группы:

1) режимы, связанные со значительными затратами времени на выдержку при определенной температуре и медленным охлаждением (отжиг, отпуск);

2) режимы, связанные лишь с нагревом металла в печи до определенной температуры с последующей выдачей на воздух (нормализация) или в жидкие среды (закалка).

Такое распределение оказывает решающее влияние на выбор типа применяемых печей. При термической обработке прокатанной стали применяют печи двух типов (садочные и проходные), принципиально отличающиеся друг от друга.

Садочные печи являются периодически действующими агрегатами с переменной во времени температурой. Металл в них загружают на неподвижный под или на выкатную подину и в процессе нагрева он находится в неподвижном состоянии. Загрузка металла осуществляется обычно в полустывшую печь, и нагрев его происходит вместе с нагревом печи.

Проходные печи — это агрегаты постоянного действия с постоянной температурой во времени и в пределах рабочего пространства (печи камерного типа). В этих печах металл в процессе нагрева перемещается от одного конца печи к другому при помощи специальных механизмов.

Преимущество садочных печей заключается в их универсальности, поскольку в них могут быть обеспечены любые температурные и тепловые режимы. Однако большим недостатком садочных печей является то, что в них не достигается желаемая равномерность нагрева металла и они непригодны для поточного производства. Кроме того, в садочных печах большое количество тепла тратится непроизводительно, на периодический нагрев кладки печи.

Проходные печи более совершенны, так как в них обеспечивается непрерывность, поточность производства и однородность нагрева металла. Работу этих печей можно полностью механизировать и автоматизировать. Непрерывность потока производства позволяет совместить термическую обработку с другими технологическими операциями (очисткой, резкой и др.). Следует отметить, что строительство высокомеханизированных проходных печей требует значительных первоначальных капитальных затрат, которые, однако, впоследствии окупаются.

При осуществлении режимов термообработки, связанных с длительной выдержкой, применение проходных печей нецелесообразно, так как для обеспечения необходимой производительности термического отделения пришлось бы установить большое число крайне длинных печей. Разумное исключение в данном случае составляют протяжные печи для термообработки холоднокатаной ленты, в которых применяется ускоренное охлаждение.

Большое значение при выборе конструкции термических печей имеет качество получаемого металла. Например, при отжиге ленты в протяжных печах металл получается более жестким, не пригодным для глубокой вытяжки — процесса широко распространенного в автостроении. Поэтому, несмотря на то, что протяжные печи являются более прогрессивными агрегатами, для отжига автолиста в рулонах приходится применять садочные печи колпакового типа. Металл в них охлаждается медленнее и, имея меньшую жесткость, пригоден для штампования.

При нагреве металла в термических печах обязательными являются равномерность и относительно невысокая скорость нагрева без окисления и обезуглероживания поверхности. Для отопления термических печей используют обычно газообразное топливо. Чтобы обеспечить равномерность нагрева металла, горелки и дымоотборы стараются разместить равномерно по длине рабочего пространства. Температура в термических печах может превышать конечную температуру металла не более чем на 50—70 °С. Особое место занимают протяжные печи для нагрева тонкой ленты, в которых создается и поддерживается очень высокая скорость нагрева при значительном перепаде температур (500—600 °С).

Сжигание топлива в рабочем пространстве термических печей затруднено, поскольку факел, характеризуемый высокой температурой, может вызвать нежелательный перегрев нагреваемого металла, и температура рабочего пространства бывает порой недостаточна для достижения устойчивого горения топлива. По указанным причинам топки термических печей часто размещают либо вне рабочего пространства или под подом печи (подподовые топки), либо выносят за пределы печи (выносные топки). Применение подподовых топок позволяет обеспечить необходимую для равномерного нагрева циркуляцию газов.

На рис. 29-1 представлена термическая печь с подподовыми топками, в которых сжигают топливо. Образовавшиеся дымовые газы проходят под подом и поступают в рабочее пространство через правый канал 1. В топке развивается высокая температура, необходимая для сгорания топлива, однако рабочее пространство ограждено от воздействия излучающего высокотемпературного факела.

Очень важное значение имеет левый канал 2, через который в подподовую топку подсасываются более холодные дымовые газы из рабочего пространства. В результате этого снижается до требуемой величины температура вновь образующихся при горении дымовых газов перед их выходом в рабочее пространство и обеспечивается их циркуляция.

Обычно выполняют ряд подподовых топок по длине печи с шахматным расположением форсунок или горелок. При этом в рабочем пространстве печи достигается развитая циркуляция газов и обеспечивается тем самым равномерный нагрев металла. Наряду с подподовыми топками в термических печах применяют экранированные топки, в которых нагреваемый металл не воспринимает прямого излучения факела.

В зависимости от величины рабочей температуры печи можно разделить на три группы: высокотемпературные, среднетемпературные и низкотемпературные.

Высокотемпературные печи (рабочая температура 1100—1150 °С) применяют для закалки и высокотемпературного отжига нержавеющих кремнистых и других легированных сталей. При этом топливо сжигают в рабочем пространстве печи.

Среднетемпературные печи (рабочая температура 600—950 °С) используют для отжига, высокого отпуска и нормализации углеродистых и низколегированных сталей. В таких печах в зависимости

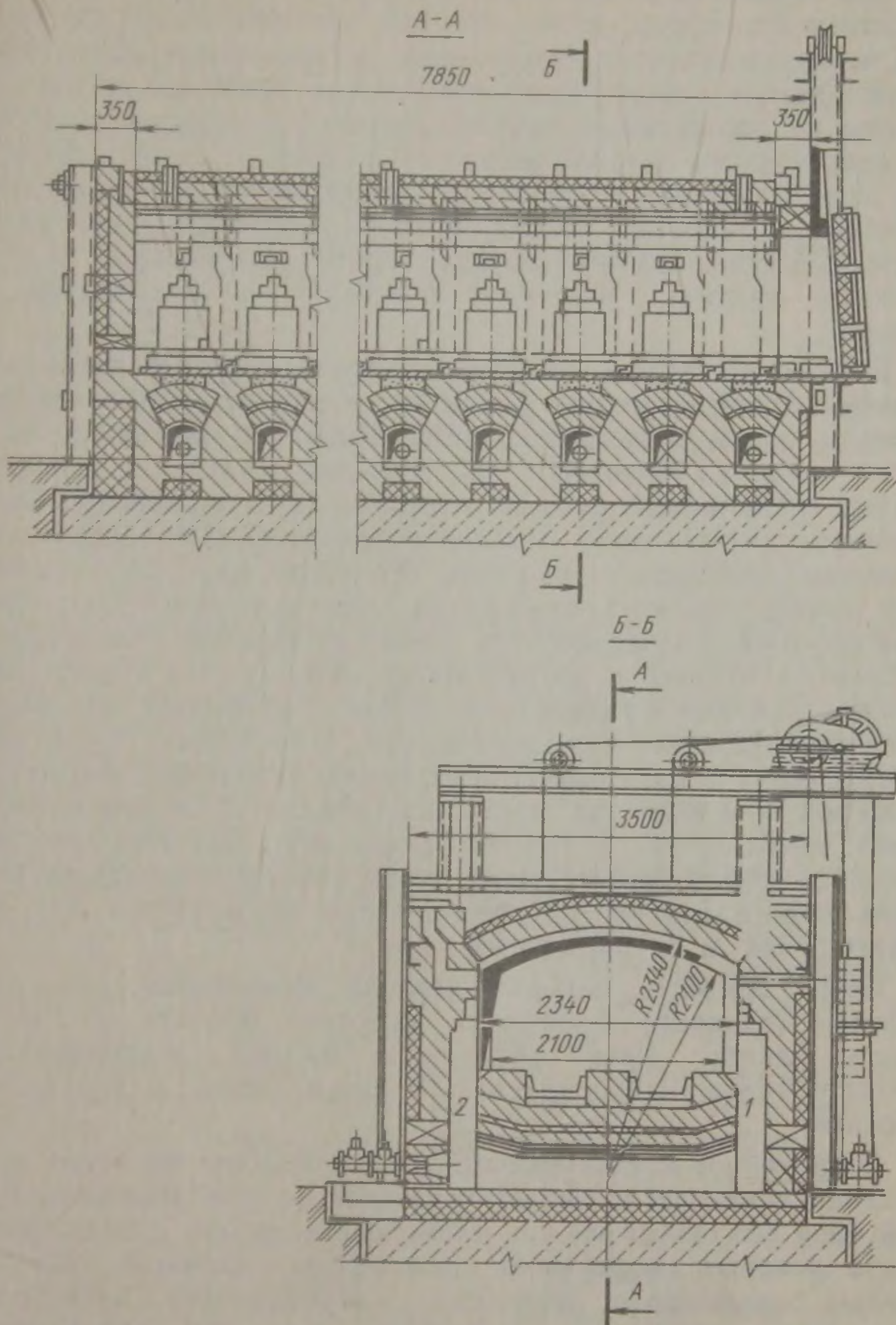


Рис. 29-1. Термическая печь с подподовыми топками

от рабочей температуры сжигают топливо в рабочем пространстве или применяют подподовые и экранированные топки.

Низкотемпературные печи (рабочая температура до 600 °С) применяют для низкого и среднего отпуска. В таких печах топливо

всегда сжигают вне рабочего пространства, причем часто используют рециркуляцию дымовых газов.

При термической обработке металла используют специальные защитные атмосферы, чтобы получить металл с чистой, неокисленной поверхностью (так называемый светлый отжиг). Поэтому все существующие конструкции термических печей могут быть разделены на две большие группы: прямого и косвенного нагрева. В печах прямого нагрева металл не отделен от печных газов. Такие печи применяют в том случае, когда допустим контакт между металлом и дымовыми газами, которые оказывают на него окисляющее действие. Обычно металл (лист), нагреваемый в печах прямого нагрева, проходит последующее химическое травление.

В печах косвенного нагрева (муфельных) нагреваемый металл отделен от печных газов. Такой метод нагрева применяют в тех случаях, когда недопустимо даже малейшее окисление поверхности металла. Различают два принципа отделения металла от печных газов: муфельирование металла и муфельирование пламени. В первом случае садку металла закрывают специальным металлическим колпаком — муфелем (съемным или стационарным). Под муфель подают специальную защитную атмосферу, препятствующую окислению металла. Тепло от печных газов передается муфелю, а от него — нагреваемому металлу. Во втором случае топливо сжигают в радиантных трубах. Продукты сгорания в рабочее пространство печи не попадают, а пройдя по трубе, уходят в атмосферу. В этом случае печь также заполняют защитной атмосферой во избежание окисления металла. Как при муфельировании металла, так и при муфельировании пламени необходима высокая степень герметизации, чтобы избежать попадания в печь атмосферного воздуха. Муфельирование применяется как в садочных, так и в проходных печах.

Печи прямого нагрева обычно применяют для нормализации (закалки) и отжига сортового проката и горячекатаного листа. Печи косвенного нагрева используют для светлого отжига холоднокатаного листа, ленты и других видов проката.

Современное металлургическое производство является высокомеханизированным и автоматизированным производством. В полной мере это относится и к термическим печам, степень механизации которых непрерывно повышается. Садочные печи оборудованы выкатными подинами, специальными загрузочными машинами, кранами. Проходные печи для транспортирования металла через печь снабжены шагающим подом, роликовым подом, специальными конвейерами. На многих термических печах (протяжных, колпаковых) начинают внедряться АСУ ТП.

2. Печи для термической обработки сортового проката

Режимы термической обработки

Наиболее распространенным видом термической обработки сортового проката является отжиг с целью проведения полной фазовой перекристаллизации, которая обеспечит получение необходимой твердости и оптимальной структуры, создающих наилучшие условия для обработки стали резанием. Отжиг стали, как известно, состоит из трех этапов: нагрева до заданной температуры, выдержки при температуре нагрева, охлаждения по тому или иному режиму.

Температура нагрева зависит от состава стали и ее выбирают таким образом, чтобы она на 20—40 °С превышала положение верхней критической точки A_c . Для сталей наиболее распространенных типов применяют следующую температуру нагрева °С:

Шарикоподшипниковая	720—820
Инструментальная углеродистая	715—820
Инструментальная легированная	720—820
Быстрорежущая	820—900

Скорость достижения конечной температуры нагрева не ограничивается, но обычно она составляет 100 °С/ч. Время выдержки выбирают таким образом, чтобы успели завершиться все те превращения, которые являются целью термической обработки. Строго говоря, выдержку следует проводить после выравнивания температуры по толщине садки металла. В садочных печах выравнивание температуры садки наступает после 10—12 ч с момента начала нагрева. После этого проводят выдержку в течение 2—3 ч.

Скорость охлаждения металла при проведении отжига лимитируется только до 550—600 °С, чтобы все превращения аустенита были закончены в перлитной области. Это охлаждение обычно осуществляется со скоростью 20—30 °С/ч. Таким образом, весь цикл отжига сортового проката занимает 18—24 ч.

В некоторых случаях сортовой прокат подвергают нормализации с нагревом до температуры на 30—50 °С выше точки A_c , с последующим охлаждением на спокойном воздухе.

Конструкция печей

Для отжига чаще всего применяют садочные печи с выкатным подом и с загрузочной машиной (с внешней механизацией). Кроме того, иногда используют колпаковые печи с радиационными трубами или без них с защитной атмосферой. Для нормализации применяют проходные печи с шагающим подом, конвейерные и роликовые.

Садочные печи. Некоторое время наиболее были распространены печи с выдвижным подом (рис. 29-2). В эту печь металл загружают при помощи подвижной тележки и нагревают вместе

с печью. Масса садки печей с выдвижным подом изменяется в очень широких пределах и составляет около 2 т/м^2 площади пода. Печь обычно отапливают газообразным топливом, для этого предусмотрено два ряда горелок, расположенных в шахматном порядке. Дымовые газы удаляются в боров через шесть отводящих каналов, расположенных попарно в середине и по концам печи. Специфическим недостатком печей с выкатным подом является то, что при выкатывании подины теряется тепло.

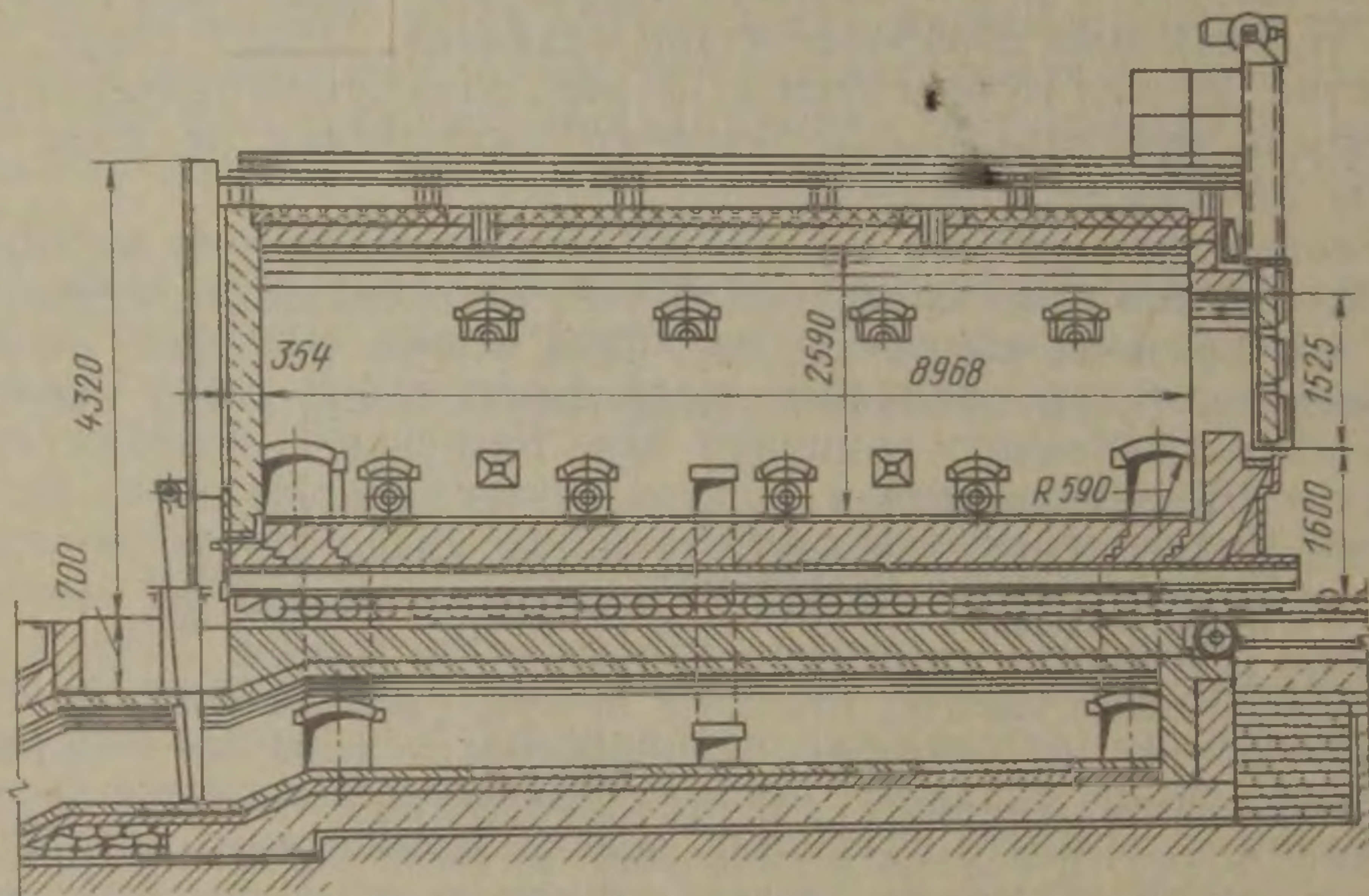


Рис. 29-2. Термическая печь с выдвижным подом

С целью устранения этого недостатка для отжига сортового проката применяют печи с механизированной загрузкой металла (см. рис. 29-1). Печь оборудована подподовыми топками, чаще всего ее отапливают смесью коксового и доменного газов с теплотой сгорания $7500\text{—}8300 \text{ кДж/м}^3$ при помощи горелок типа «труба в трубе».

Характер движения газов в рабочем пространстве определяется наличием подподовых топок. Для удаления дымовых газов из рабочего пространства печи в стенках выполнены специальные каналы, расположенные на уровне пода печи, что обеспечивает удовлетворительный нагрев низа садки. Масса садки печей составляет $15\text{—}20 \text{ т}$. Металл загружают в печь при помощи специальной машины.

Отжигу в рассматриваемых печах обычно подвергают круглые заготовки диаметром $30\text{—}60 \text{ мм}$ или квадратные сечением $120\text{—}180 \text{ мм}$. Между отдельными пакетами металла помещают специальные прокладки, что способствует циркуляции газов внутри садки и повышает равномерность нагрева. В печах с механизированной загрузкой применяют изотермический отжиг с нагревом до $780 \text{ }^\circ\text{C}$ и охлаждение до $650 \text{ }^\circ\text{C}$ с выдержкой при этой температуре.

Возможны два метода проведения этой операции:

1. Всю операцию проводят в одной печи. Металл нагревают до 780°C , а затем вместе с печью его охлаждают до 650°C и выдерживают при этой температуре. Для ускоренного охлаждения через горелки можно продувать воздух.

2. Операцию проводят в двух печах. Металл нагревают до 780°C в одной печи и пересаживают для выдержки при 650°C в другую печь. В этом случае на четыре печи для нагрева необходима одна печь для изотермической выдержки.

Второй метод более рационален, поскольку нагревательная печь, а также печь для выдержки, постоянно нагреты до необходимой температуры и периодически не охлаждаются (до 400°C и ниже). Это положительно сказывается на работе футеровки и горелок печи и снижает удельный расход тепла, который составляет $3100\text{—}3800$ кДж/кг. Производительность при втором методе также возрастает и составляет $800\text{—}900$ кг/ч на каждую печь, тогда как при работе по первому методу на печь приходится $600\text{—}700$ кг/ч.

В садочных печах, как в печах периодического действия, значительное количество тепла тратится на нагрев кладки. Для таких печей характерно, что на нагрев металла расходуется $17\text{—}18\%$ тепла, унос с продуктами сгорания составляет $54\text{—}56\%$ и потери кладкой обычно равны $18\text{—}19\%$. Иначе говоря, тепло, теряемое кладкой, равновелико полезному расходу тепла.

Футеровку термических печей выполняют обычно двухслойной: внутренний слой из шамота класса Б, наружный — из теплоизоляционного диатомового кирпича.

Поскольку садочные печи имеют переменный во времени температурный режим, тепловой расчет таких печей выполняют на весь цикл работы, а не на 1 ч, как это делают для печей постоянного действия.

Садочным печам присущи следующие серьезные недостатки: непостоянный во времени температурный режим, отрицательно сказывающийся на равномерности нагрева металла;

высокий удельный расход топлива, вызванный периодическим нагревом кладки печи;

сложность автоматического регулирования теплового режима печи;

непригодность для высокопроизводительного поточно-массового производства.

Однако эти печи пока являются наиболее приемлемыми агрегатами для выполнения таких операций термообработки, которые связаны со значительными выдержками и замедленным охлаждением. Садочные печи также наиболее пригодны для термхимической обработки металла.

Проходные печи. Применение проходных печей позволяет обеспечить более совершенный метод нагрева металла. Для термической обработки сортового проката применяют непре-

рывные (постоянного действия) печи прямого нагрева трех конструкций: с шагающим подом, с роликовым подом и конвейерные.

В печах с шагающим подом, применяемых для термической обработки, температура по длине печи чаще всего постоянна. В печах для нормализации иногда предусматривают по длине две зоны: нагрева до 900°C и охлаждения до $300\text{--}400^{\circ}\text{C}$. Обычно температура печи составляет около $1000\text{--}1050^{\circ}\text{C}$. Металл нагревается до $900\text{--}950^{\circ}\text{C}$. Печи отапливают холодным газообразным топливом. Горелки расположены равномерно по всей длине, дымовые газы удаляются из печи под зонт через рабочие окна и специальные, выполненные в свода, каналы. Печи с шагающим подом, предназначенные для термообработки, обеспечивают удельную производительность около $400\text{--}450\text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ при удельном расходе тепла около $2100\text{ кДж}/\text{кг}$.

Наиболее широкое распространение для термической обработки приобретают печи с роликовым подом.

В конвейерных печах рабочее пространство проходит цепной конвейер, транспортирующий металл. Конвейерным печам присущи серьезные недостатки, в силу которых в черной металлургии эти печи применяют крайне редко. Главными недостатками являются:

значительный вынос тепла из рабочего пространства печи элементами цепей, в результате чего увеличивается удельный расход тепла;

недостаточный прогрев металла в местах соприкосновения с цепью;

недолговечность цепей.

Удельный расход тепла в таких печах достигает $2900\text{--}3350\text{ кДж}/\text{кг}$.

3. Печи для термической обработки горячекатаных листов

Режимы термической обработки

Методом горячей прокатки обычно производят листы толщиной выше $1,5\text{ мм}$. Во многих случаях горячекатаные листы проходят термическую обработку. Толстые горячекатаные листы малоуглеродистых и низколегированных сталей подвергают чаще всего неполному или изотермическому отжигу, а иногда высокому отпуску. Неполный отжиг выполняется при нагреве стали до температур, лежащих между точками A_{c1} и A_{c3} и преследует цель повышения вязкости стали и снижения пределов текучести и прочности. Температура наименьшей устойчивости аустенита лежит на $150\text{--}200^{\circ}\text{C}$ ниже равновесной точки A_{c1} . В практических условиях температуру выдержки металла при изотермическом отжиге берут на $100\text{--}150^{\circ}\text{C}$ ниже точки A_{c1} . Время выдержки

выбирают так, чтобы обеспечить твердость продуктов изотермического распада не выше необходимого значения, и обычно оно составляет 4—6 ч. Кроме указанных видов термообработки, горячекатаные листы проходят также нормализацию.

Конструкции печей

Для термообработки горячекатаных листов применяют садочные колпаковые и проходные, главным образом роликовые, печи.

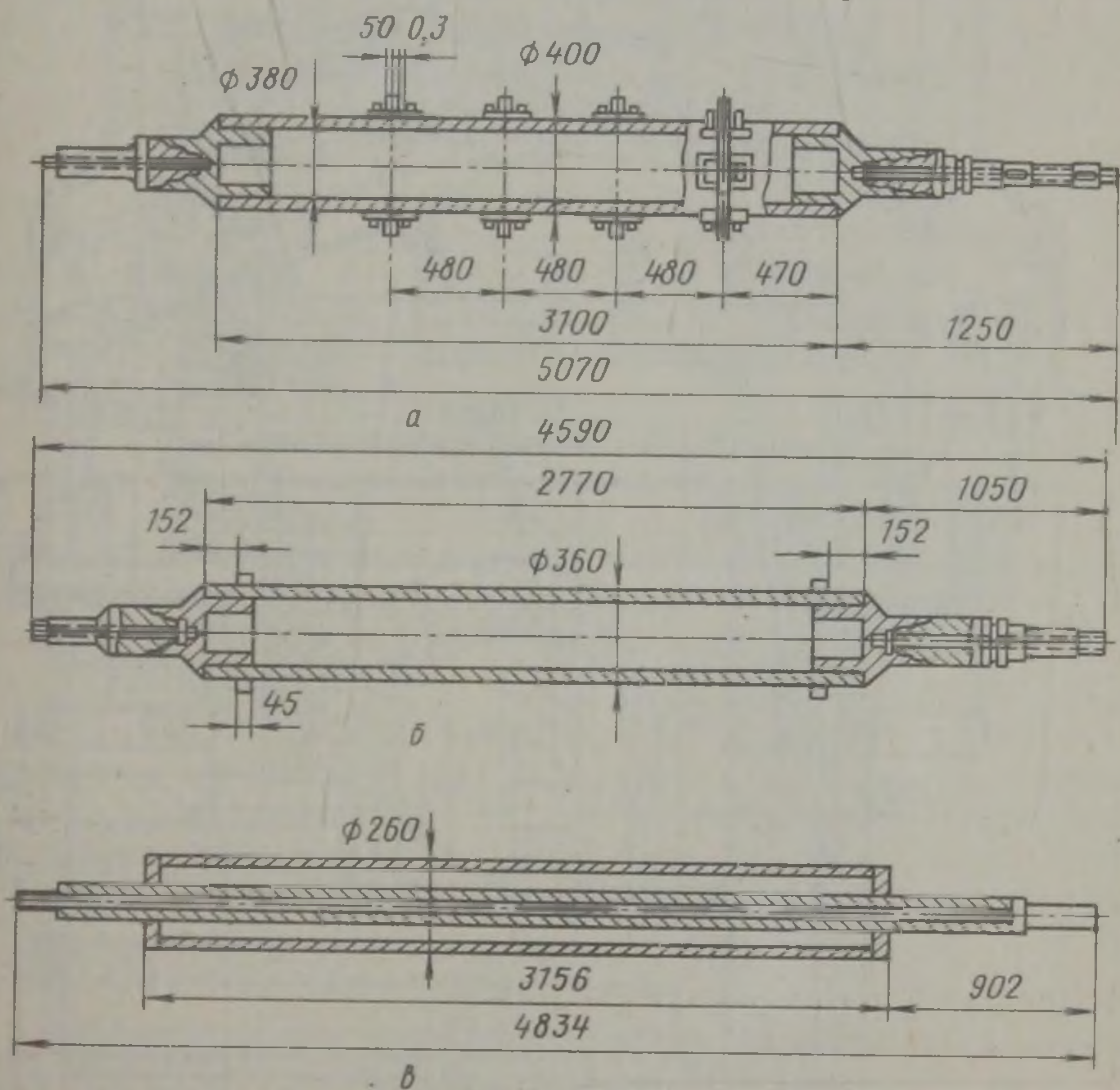


Рис. 29-3. Конструкция роликов:

а — с дисками; б — с неводоохлаждаемой бочкой; в — с водоохлаждаемым валом

В колпаковых печах осуществляют чистый отжиг металла, который нагревается под муфелем, но без защитной атмосферы. Печи подобного типа применяют при производстве холоднокатаного листа и ленты, поэтому они рассмотрены ниже.

В печах с роликовым подом, широко применяемых для нагрева листов, сорта, рельсов, бунтов проволоки, металл прямо с рольганга поступает на ролики печи, вращающиеся по несколько штук от одного привода или от индивидуальных приводов. Скорость вращения роликов может быть различной. Ролики обычно выполняют из жаропрочной стали (например, содержащей 20—30 % Ni и 20—25 % Cr).

Конструкция роликов зависит от назначения и температуры рабочего пространства печи. В печах для термообработки тонкого листа применяют ролики с дисками (рис. 29-3). Диски, расположенные в шахматном порядке, заходят друг за друга и препят-

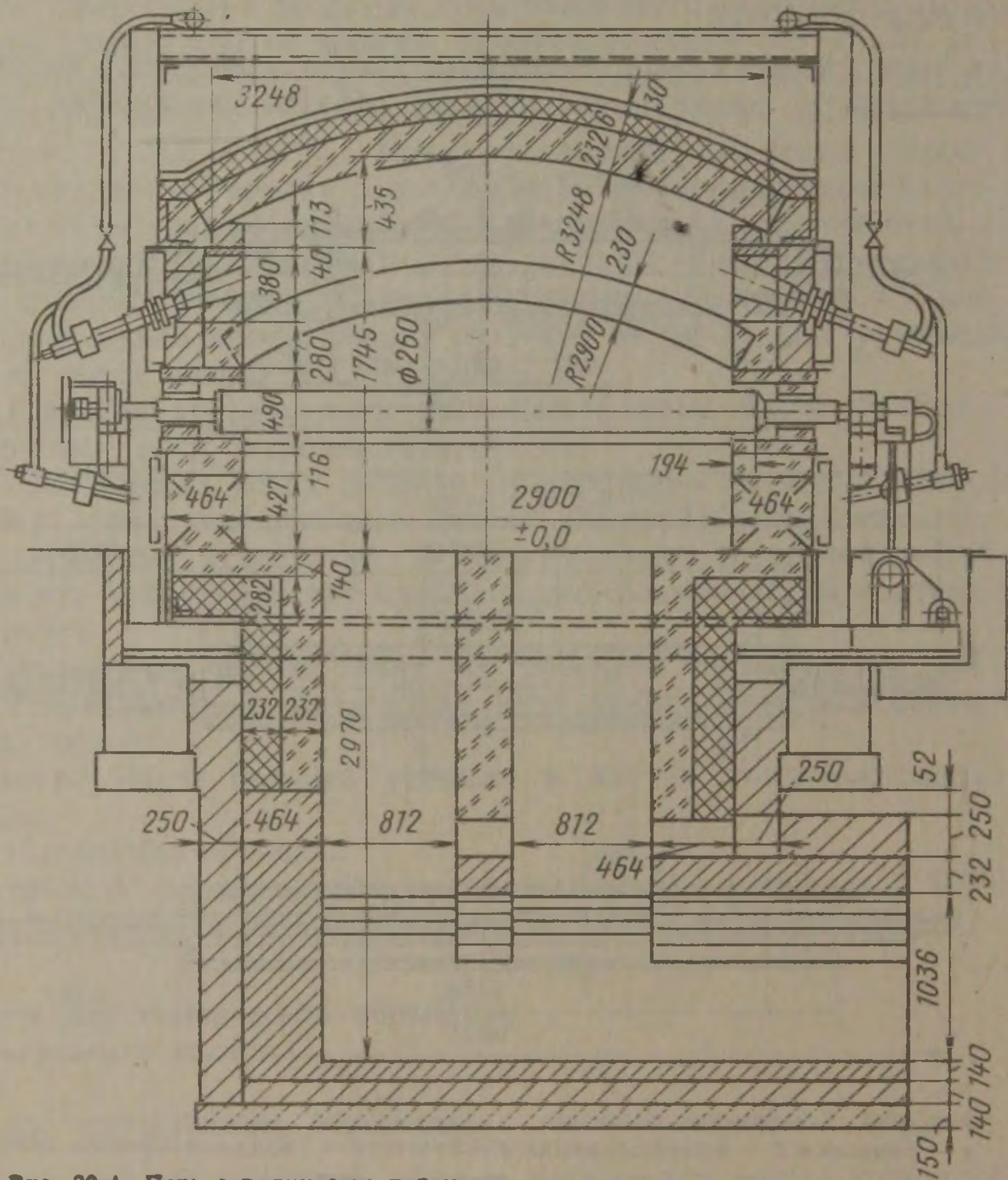


Рис. 29-4. Печь с роликовым подом

ствуют попаданию листа под ролики. Печи для толстого листа (рельсов, сорта) с рабочей температурой 800—1000 °С оборудуют роликами с неводоохлаждаемой бочкой. Для температуры печи 1000—1200 °С ролик выполняют с водоохлаждаемым несущим валком и укрепленной на нем жаропрочной бочкой. Пространство между бочкой и валком заполняют теплоизоляцией (шамотным или диатомитовым порошком).

Роликовые печи в зависимости от их назначения делают различной ширины (рис. 29-4 и 29-5).

Правильный выбор ширины роликовой печи очень важен, так как, чем шире печь, тем большую нагрузку испытывают ролики. В работающей печи нельзя останавливать вращения роликов во избежание их прогиба. Поэтому длина роликовых печей всегда больше суммарной длины листов, загружаемых в печь. В этом

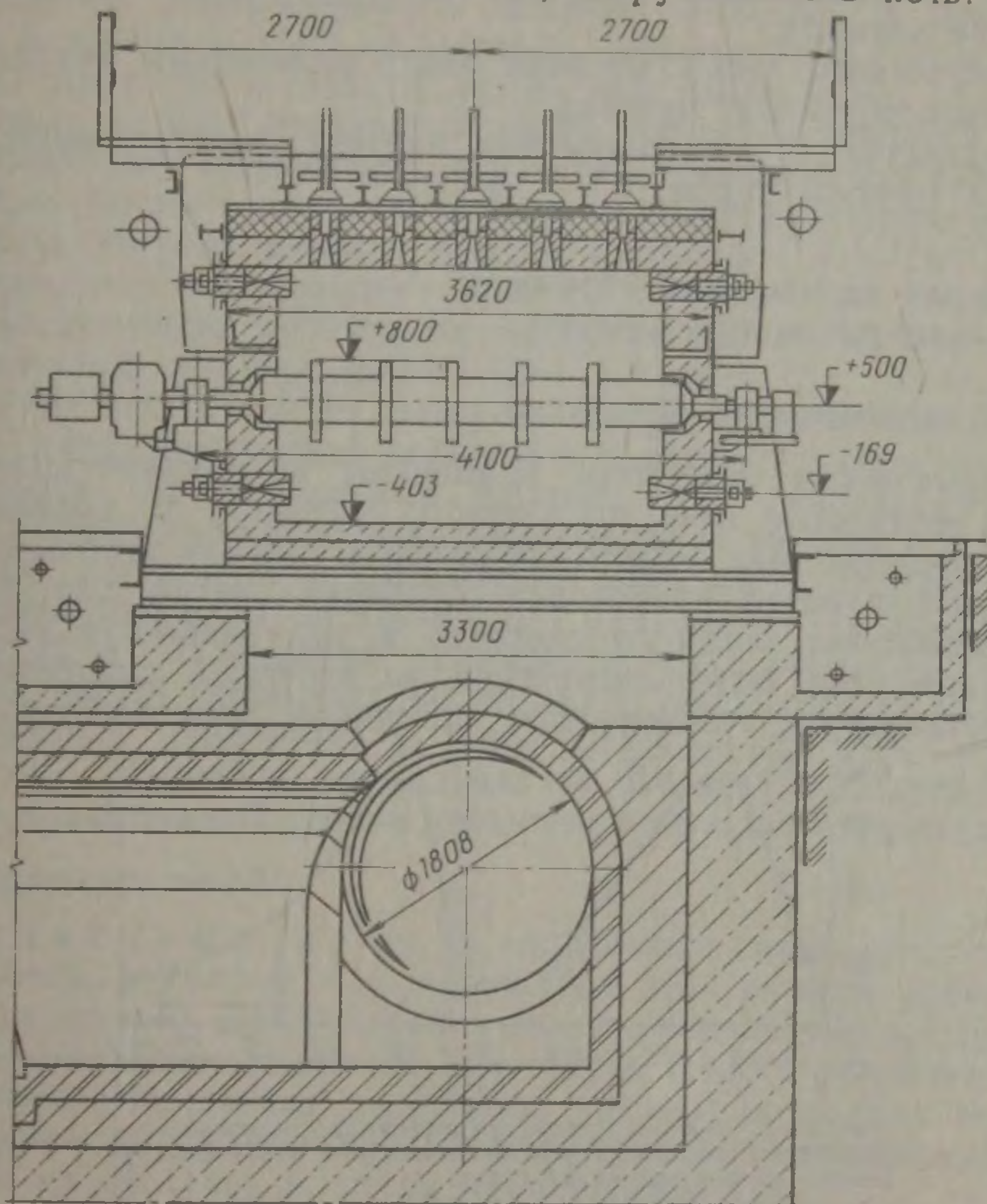


Рис. 29-5. Печь с роликовым подом для нагрева широких листов

случае в процессе нагрева необходимо непрерывное вращение роликов, осуществляемое перемещением листов то немного вперед, то немного назад.

Роликовые печи обычно отапливают различным газообразным топливом; горелки располагают в боковых стенах печи выше и ниже уровня роликового пода. Для обеспечения более равномерного нагрева широких листов горелки устанавливают и на своде печи.

Производительность роликовых печей колеблется от 4—5 до 40 т/ч при удельной производительности около 250 кг/(м²·ч) и удельном расходе тепла 3300—5000 кДж/кг.

Роликовые печи по сравнению с конвейерными и печами с шагающим подом обладают рядом преимуществ:

1) наилучшим соответствием поточному производству, так как роликовый под может служить продолжением цехового рольганга;

2) отсутствием подсоса холодного воздуха, увеличивающего окисление металла;

3) отсутствием уноса из печи тепла элементами механизмов для транспортировки металла;

4) скоростью и равномерностью нагрева, которые выше, чем в печах других типов.

4. Печи для термической обработки холоднокатаных листов и ленты

Режимы термической обработки

Для термической обработки применяют колпаковые садочные печи и протяжные печи постоянного действия. В колпаковых печах термообработке подвергают стопы листов или рулоны ленты. В протяжных печах происходит обработка одного слоя ленты, что обеспечивает большую скорость и равномерность нагрева. Протяжные печи более прогрессивные агрегаты, соответствующие требованиям современного поточного производства. Они

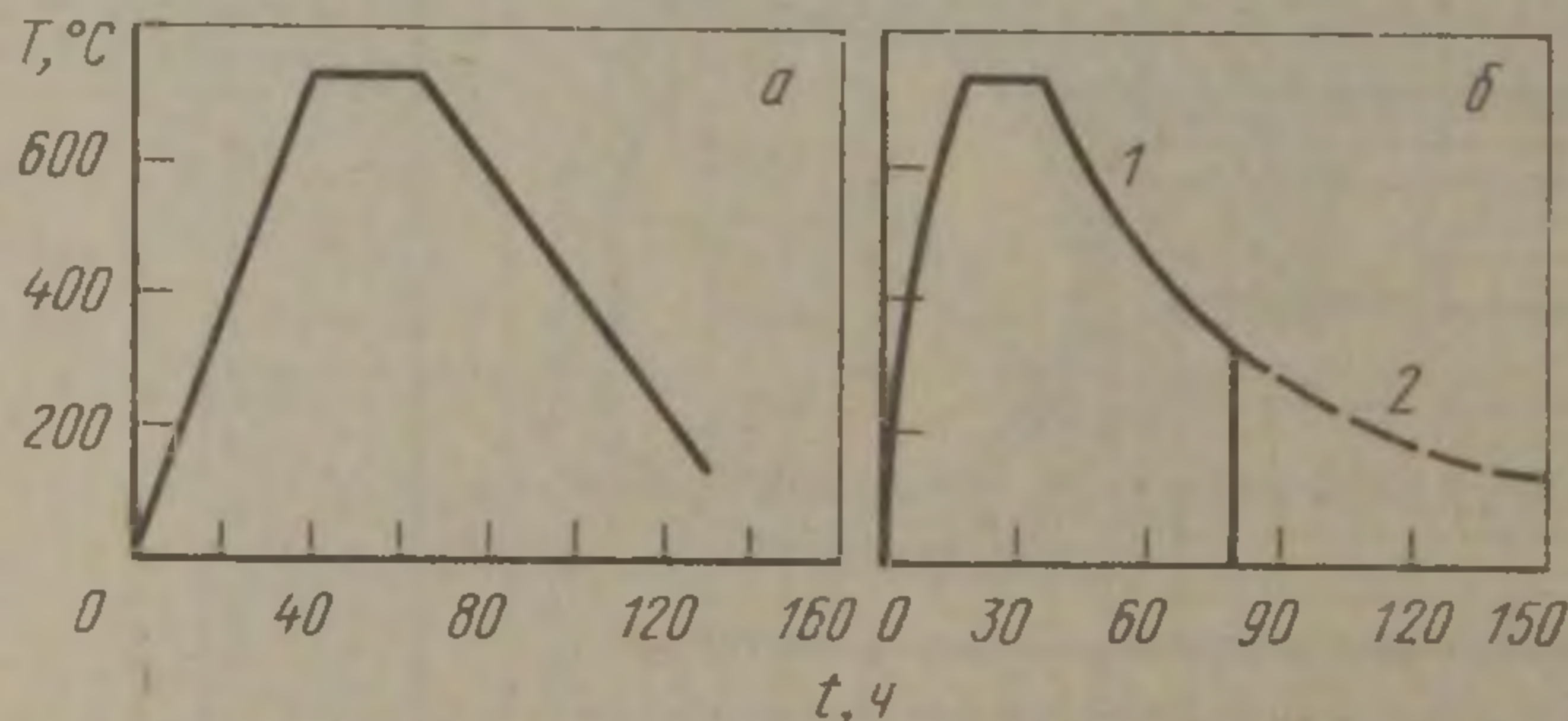


Рис. 29-6. Режимы рекристаллизационного отжига холоднокатаного металла в колпаковых (а) и протяжных (б) (время дано в секундах) печах:

1 — в башенной печи с косвенным обогревом и окончательным охлаждением в водяной ванне; 2 — то же, с охлаждением только в камере с водоохлаждаемыми стенками

обычно входят в состав непрерывных линий, в которых наряду с термообработкой металла осуществляют ряд других технологических операций (травление, нанесение покрытий и др.). Однако несмотря на эти преимущества, современное производство холоднокатаного листа не может обойтись пока без колпаковых печей.

Основным видом термической обработки холоднокатаного металла является низкотемпературный рекристаллизационный отжиг. Режимы отжига приведены на рис. 29-6. Из графика видно, что скорость охлаждения ленты в протяжных печах по сравнению

с колпаковыми очень велика. Поэтому получается более мелкозернистая структура и, как следствие, выше предел текучести и твердость металла. В протяжных печах структура получается однородной, чего нельзя сказать о металле, отожженном в колпаковых печах. Колпаковым печам, как печам садового типа, свойственна неравномерность нагрева металла. В результате этого у одного и того же металла, отожженного в колпаковых печах, структура и свойства могут быть различными.

Режим работы протяжных печей теснейшим образом связан с технологией термической обработки. Температура рекристаллизации (близкая к A_{c3}) определяет температуру нагрева металла. Скорость нагрева металла обычно составляет $25-100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, чем и определяется продолжительность нагрева. Для завершения рекристаллизации необходима выдержка при температуре рекристаллизации, которая должна быть не менее 25 с. Скорость охлаждения ленты следует выбирать такой, чтобы из твердого раствора в феррите успевал полностью выпасть углерод и не образовывался перенасыщенный раствор. При температуре около $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ содержание углерода примерно такое же, как и при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, поэтому регулируемое охлаждение надо вести до $480-500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Продолжительность регулируемого охлаждения не должна быть менее 25 с. Дальнейшее охлаждение ниже $480-500\text{ }^{\circ}\text{C}$ можно вести с любой скоростью, но до $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ленту следует охлаждать в защитной атмосфере, а ниже $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ — обдувкой холодным воздухом. Ускорение охлаждения от 500 до $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ представляет собой значительный резерв увеличения производительности печи.

Конструкции печей

Колпаковые печи. В колпаковых печах лист отжигают в пакетах, а рулоны — в стопах (при этом рулоны установлены один на другой). Для ускорения нагрева используют принудительную циркуляцию защитной атмосферы. Между рулонами предусмотрены специальные прокладки, которые позволяют защитной атмосфере циркулировать между рулонами и способствовать тем самым их прогреву в осевом направлении.

Применяют многостопные и одностопные колпаковые печи. В многостопных печах один нагревательный колпак приходится на несколько стоп, которые взаимно экранируют друг друга. Это приводит к неравномерности нагрева стопы и необходимости увеличения продолжительности выдержки и, следовательно, к снижению производительности.

Более совершенны с этой точки зрения одностопные колпаковые печи, в которых рулоны прогреваются равномернее. Однако в экономическом отношении эффективнее многостопные печи. Их целесообразно применять при массовом производстве, когда сортамент отжигаемого металла сравнительно неширок. В случае большого разнообразия сортамента отжигаемого металла одностопные печи позволяют более гибко вести производство.

Печи с муфелированием металла. Колпаковая печь для светлого отжига листа представлена на рис. 29-7. Она предназначена для отжига листов, уложенных в стопу. Нагрев стопы листов целесообразно вести так, чтобы тепло поступало к торцам листов, а не в поперечном направлении. Между листами, сложенными в стопу, находится газовая прослойка, которая снижает теплопроводность в поперечном направлении в 30—40 раз по сравнению с теплопроводностью сплошного металла. У печи два колпака: внутренний — из листового железа

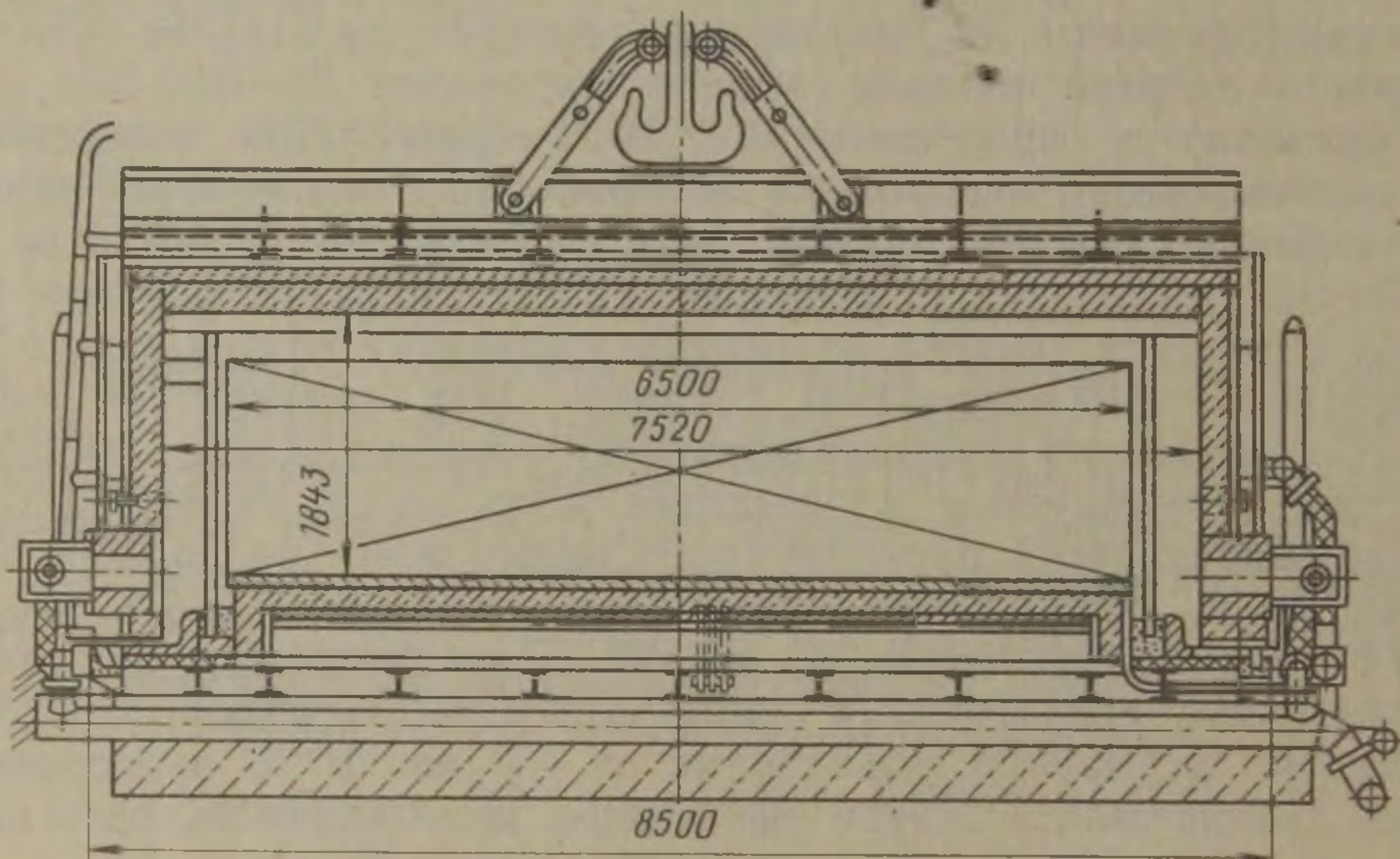


Рис. 29-7. Колпаковая печь для светлого отжига листов

и наружный футерованный колпак, на котором и размещены горелки. Внутренний колпак — это муфель, которым закрывают стопы, помещенные на неподвижный под (стенд) печи. Внизу внутреннего муфеля устроен песочный затвор, обеспечивающий необходимую герметизацию. Под внутренний муфель по специальной трубке подается защитная атмосфера.

Весь процесс делится на следующие стадии: а) загрузка стоп металла на стенд; б) установка внутреннего муфеля и продувка подмуфельного пространства защитной атмосферой для удаления воздуха; в) нагрев садки до 650—750 °С (с защитной атмосферой); г) охлаждение садки под внутренним муфелем до 150 °С (с защитной атмосферой); охлаждение от 150 °С на воздухе и разгрузка стенда.

Выдавать металл на воздух с температурой выше 150 °С нельзя во избежание появления на поверхности металла цветов побежалости.

Продолжительность нагрева садки до 650—750 °С приблизительно в три раза меньше суммарного времени охлаждения садки до 150 °С, загрузки и разгрузки металла. Поэтому обычно на

один наружный колпак приходится три стенда. Когда один стенд находится под наружным колпаком, второй разгружают и нагружают, а на третьем охлаждают металл под внутренним муфелем. Колпак переносят с одного стенда на другой специальным мостовым краном. Масса наружного колпака около 40 т.

При переносе с одного стенда на другой внутренняя поверхность футеровки колпака остывает до 300—350 °С. В нижней части наружного колпака с двух сторон по всей его длине расположена серия небольших инжекционных горелок, что обеспечивает торцевой подвод тепла к столам листов. Перед каждой горелкой установлена карборундовая пластина, предохраняющая внутренний муфель от местного перегрева. У наружного колпака также устроен внизу песочный затвор. В качестве топлива можно использовать любое газообразное топливо, чаще всего употребляют смесь коксового и доменного газов с $Q_{\text{н}}^{\text{в}} = 5800 \div 10\,000$ кДж/м³.

Дымовые газы отдают тепло внутреннему муфелю, а он в свою очередь передает тепло нагреваемому металлу. Удаляют дымовые газы из рабочего пространства при помощи эжектора. Газ и инжектирующий воздух подают через специальные гибкие шланги. Дымовые газы удаляются в дымоотводящие трубопроводы, присоединенные к дымовой трубе, оборудованной дымососом.

Ранее дымовые газы удаляли из колпаковых печей естественным путем прямо в атмосферу цеха. Для этого в стенках наружного колпака делали специальные вертикальные каналы. Применение эжекторов позволило устранить этот недостаток, резко улучшить санитарное состояние цеха и условия труда обслуживающего персонала.

Масса садки в колпаковых печах составляет 80—120 т, удельная производительность достигает 250—300 кг/(м²·ч), а удельный расход топлива равен 1200—1400 кДж/кг.

Колпаковые печи с муфелированием металла также широко применяют для светлого отжига рулонов холоднокатаной ленты. Обычно по высоте печи устанавливают вертикально три—четыре рулона, между которыми размещают специальные прокладки. Если основной поток тепла поступает к рулону в радиальном направлении, то равномерность и скорость нагрева невелики. Для ускорения нагрева создают интенсивную циркуляцию защитного газа под муфелем, для чего служит специальный вентилятор.

Колпаковые печи для отжига рулонов ленты чаще всего одностопные (рис. 29-8, а), однако встречаются еще и трехстопные (рис. 29-8, б).

В конструкциях колпаковых печей для отжига рулонов и для отжига листов много общего. Садка трехстопных колпаковых печей составляет 120 т. Один наружный нагревательный колпак обслуживает три печных стенда. Отличительной особенностью этих печей является применение трех (по числу стоп) внутренних муфелей и наличие вентилятора для создания циркуляции защитной атмосферы. В одностопных печах металл нагревается

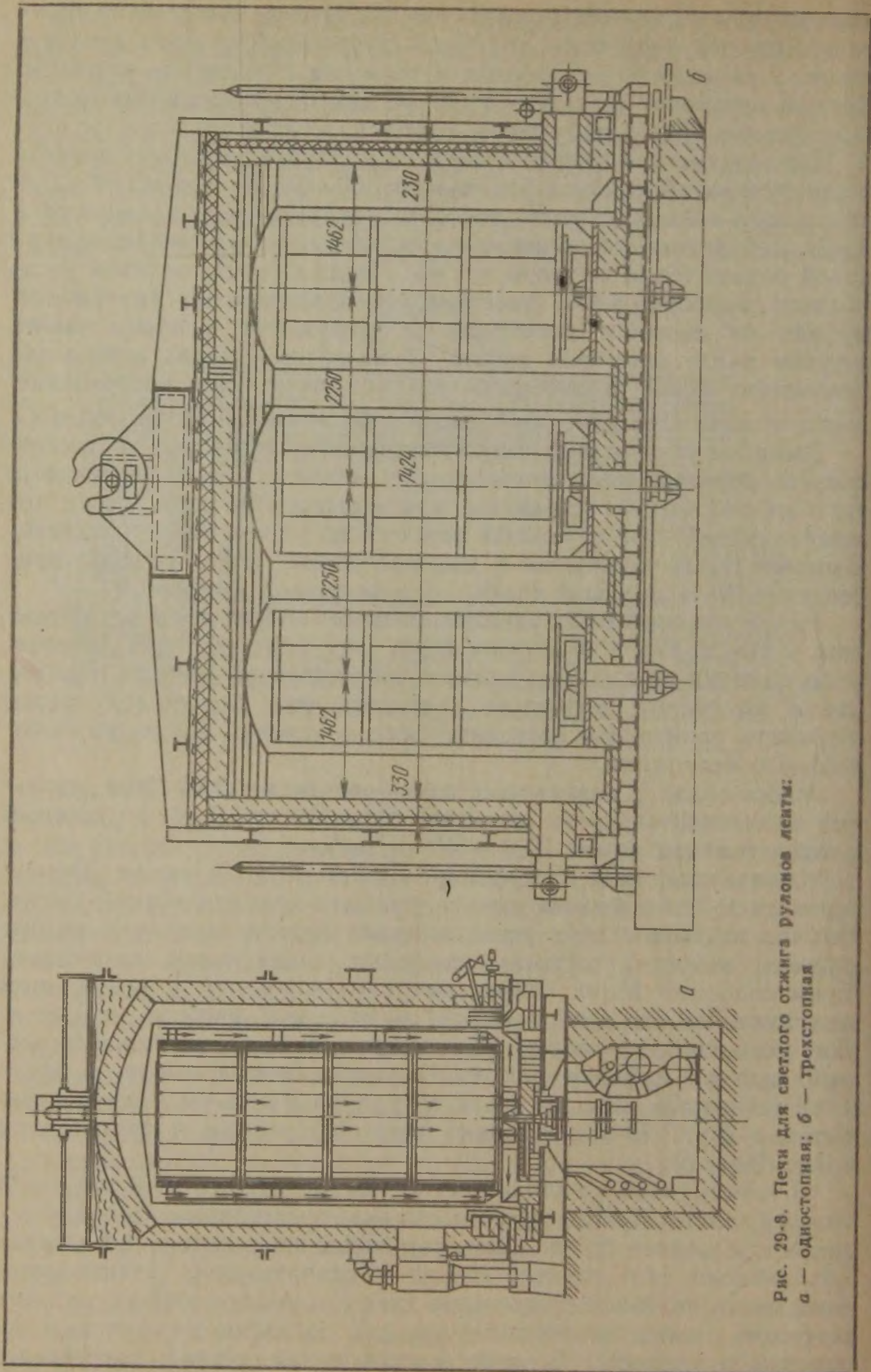


Рис. 29-8. Печи для светлого отжига рулонов ленты:
 а — одноэтапная; б — трехэтапная

равномернее и быстрее. Показатели работы одностопных и трех-
стопных колпаковых печей приведены ниже:

	Печи одно- стопные	Печи трех- стопные с циркуляцией
Удельный расход тепла, кДж/кг	1200—1400	1180—1300
Масса наружного клапана, т	15	40
Производительность, т/ч:		
общая	1,2—2,0	3,5—3,7
на 1 стопу	1,2—2,0	1,15—1,25

Из приведенных данных видно, что производительность одностопных колпаковых печей выше, если исходить из расчета на одну стопу при втрое меньшей массе наружного колпака, что удешевляет здание цеха.

В работе колпаковых печей для отжига ленты в рулонах большое значение имеет циркуляция защитного газа. Если сравнивать работу колпаковой печи в отсутствие циркуляции и с циркуляцией, то при циркуляции производительность увеличивается в 2—3 раза, а удельный расход тепла на отжиг уменьшается. Циркуляция позволяет не только ускорить нагрев рулонов, но и повысить равномерность нагрева садки.

Циркуляцию осуществляют при помощи вентиляторов с крыльчаткой центробежного типа. Крыльчатка помещена под стопой внутри специального направляющего аппарата. Вентилятор засасывает защитный газ из внутренней полости стопы рулонов и через направляющий аппарат подает его в щель между наружным и внутренним цилиндрами двойного муфеля или вдоль стен внутри одинарного муфеля. Поднимаясь вдоль стен муфеля, газ нагревается и затем поступает во внутреннюю полость стопы через специальные кольца, проложенные между рулонами. Проходя с большой скоростью между рулонами, газ отдает свое тепло торцу рулона, значительно ускоряя его нагрев. Чтобы защитный газ направлялся между рулонами, внутреннюю полость их сверху закрывают специальной крышкой. Применяют термическую обработку ленты в распушенном состоянии, для чего рулон направляют на специальную перемотку. Для того, чтобы защитный газ мог циркулировать между витками, рулон перематывают так, чтобы между витками были зазоры, соизмеримые с толщиной ленты. Цикл отжига распушенного рулона значительно меньше, чем для тугосмотанных рулонов.

Недостатком применения распушенных рулонов является то, что необходима двукратная перемотка — перед отжигом и после него. Кроме того, наружный диаметр распушенного рулона достигает 2,8—3 м, что требует увеличения габаритов печей. Распушенные рулоны обычно устанавливают по одному, что снижает производительность печи на единицу площади цеха. Это дает основание считать, что применение распушенного рулона весьма перспективно для обработки ленты термохимическими способами.

при которых необходимо, чтобы газ омывал всю поверхность ленты.

Печи с муфелированием пламени. Светлый отжиг металла также осуществляют в колпаковых печах, в которых топливо сгорает внутри радиантных труб.

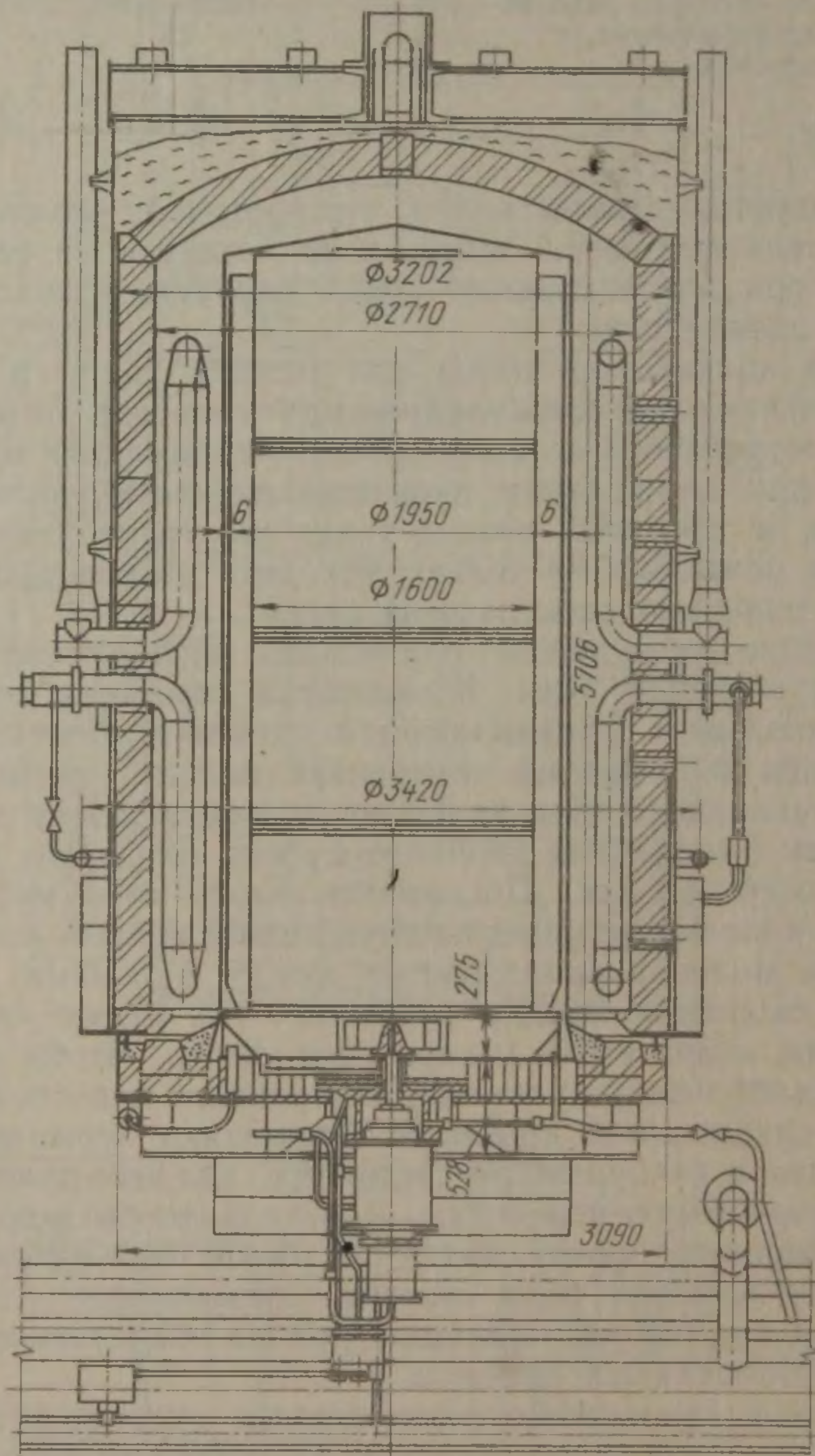


Рис. 29-9. Одностопная печь с вертикальными радиантными трубами

Печи с радиантными трубами применяют для светлого отжига металла в рулонах (рис. 29-9). Эти печи отапливают газообразным топливом с теплотой сгорания не ниже 7500 кДж/м^3 . Температура нагрева металла $650\text{—}750 \text{ }^\circ\text{C}$. Масса садки зависит от размеров

печи и колеблется в пределах 20—80 т. Удельная производительность печей составляет 150—250 кг/(м²·ч) при удельном расходе тепла 1050—1400 кДж/кг.

Для предотвращения окисления металла в печах применяют внутренний металлический муфель. Этот муфель позволяет осуществить циркуляцию защитной атмосферы.

Протяжные печи для термической и термохимической обработки тонкой стальной ленты и жести. Выше было отмечено, что отжиг рулонов в колпаковых печах широко распространен. Однако этому методу присущи следующие недостатки: а) цикл отжига длится очень долго — до нескольких дней; б) равномерный нагрев металла не обеспечивается; в) невозможно полностью механизировать и автоматизировать загрузку, транспортирование и уборку рулонов; г) требуются большие производственные площади.

Поэтому все шире применяют непрерывные линии с протяжными печами, которые используют для обезуглероживающего отжига электротехнической стали, светлого отжига жести, светлой закалки нержавеющей полосы, цинкования тонкого листа и лужения жести. Все шире начинают применять протяжные печи для отжига тонкого автомобильного листа.

Протяжные печи могут быть разделены на две большие группы: горизонтальные и вертикальные (башенные). Длина ленты в горизонтальных печах допускается не более 200 м, а скорость движения до 2 м/с, так как при больших значениях трудно обеспечить центрирование при движении ленты через печь. Производительность горизонтальных печей невелика и их обычно применяют при небольшом объеме производства. В вертикальных печах условия центрирования благоприятнее, поэтому длина ленты в таких печах может достигать 1 км, а скорость движения 10 м/с. Такие печи распространены шире, так как при весьма высокой производительности они занимают небольшую производственную площадь. Подобные печи обычно состоят из трех секций: входной, печной и выходной (рис. 29-10).

Входная и выходная секции отделены от печной секции петлевыми башнями, в которых накапливается запас полосы. Во входной и выходной секциях скорости синхронизируются со скоростями движения полосы в рабочей (печной) секции. Для этого устраивают специальные петлевые ямы, в которых положение свободно висящей ленты контролируется фотоэлементами. Скорость движения полосы во всех агрегатах задают в зависимости от скорости нагрева и охлаждения полосы.

На входном участке происходит сварка рулонов между собой, а также обезжиривание и очистка полосы при помощи специальных щелочных ванн; на выходном участке — разрезка полосы после намотки рулона требуемого размера.

Печная секция состоит из четырех камер: нагрева, выдержки, замедленного и быстрого охлаждения. В камере нагрева металл

нагревается до конечной температуры 700—730 °С. Эту камеру в топливных печах обычно отапливают коксовым или природным газом, сжигаемым в радиантных трубах. Светлый отжиг полосы проводят чаще всего в азотной защитной атмосфере (96 % N₂ и 4 % H₂). Чтобы дымовые газы не попадали в печь, радиантные трубы работают под разрежением. Разность между температурой в печи и конечной температурой металла около 200 °С; при этом продолжительность нагрева полосы толщиной 0,25 мм состав-

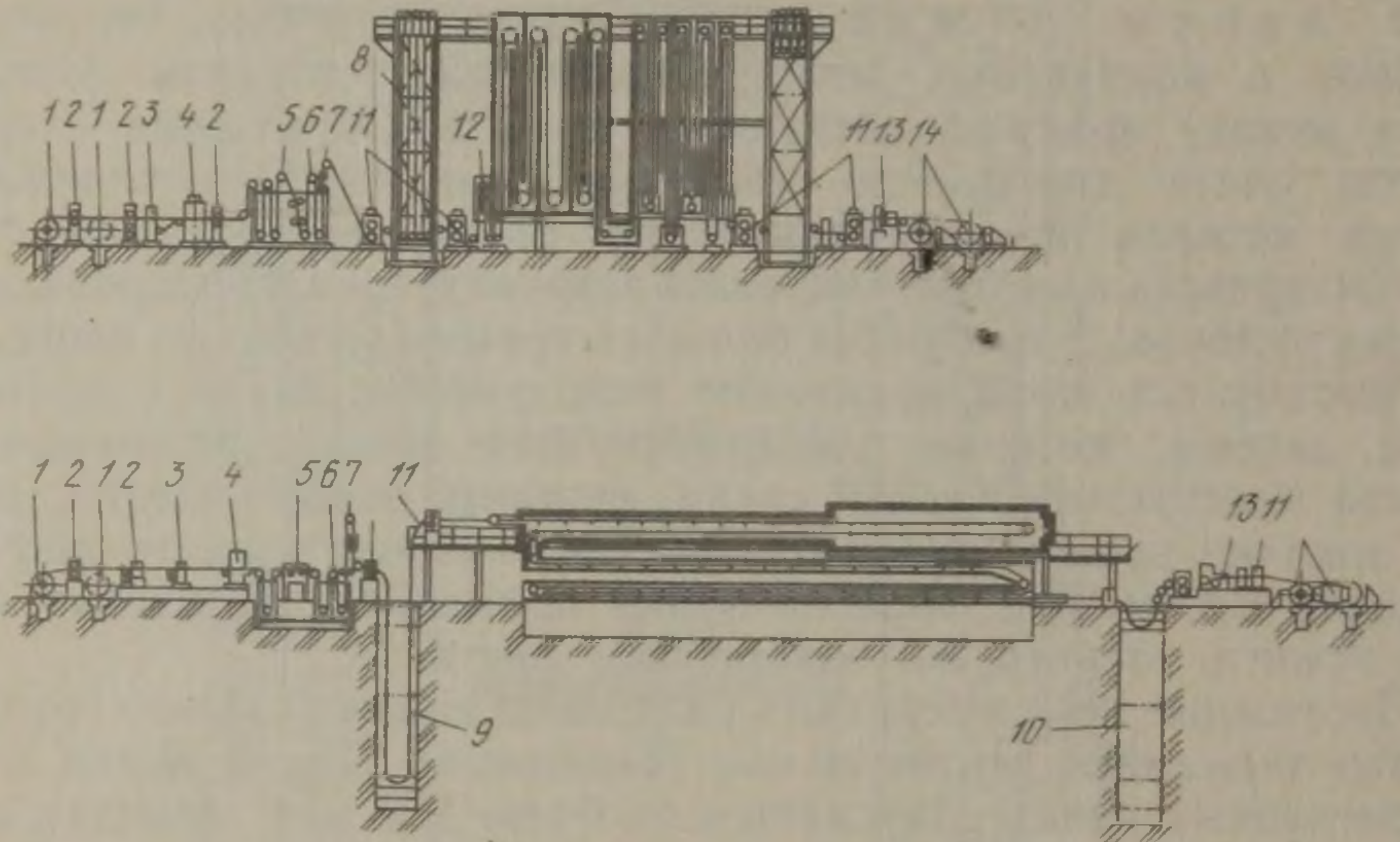


Рис. 29-10. Схема линий с протяжными печами:

а — линия для отжига жести с вертикальной печью; б — то же, с многостажной горизонтальной печью; 1 — разматыватель рулонов; 2 — тянущие релики; 3 — ножницы; 4 — машины для сварки концов; 5 — устройство для очистки ленты; 6 — моеющее устройство; 7 — устройство для сушки ленты; 8, 10 — петлевые башни; 9 — петлевая яма; 11 — устройства для натяжения ленты; 12 — регулятор натяжения ленты; 13 — ножницы; 14 — сматыватели

ляет 15—20 с. Предельная температура печи 1000 °С, выше которой возможен перегрев и разрыв полосы. Камера нагрева с радиантными трубами приведена на рис. 29-11. Камеры выдержки конструктивно весьма схожи с камерой нагрева с той лишь разницей, что в камеру выдержки подается такое количество тепла, которого было бы достаточно для покрытия тепловых потерь. Кроме радиантных труб, камеры нагрева и выдержки иногда оборудованы электронагревателями.

В камере замедленного охлаждения температура металла падает с 700—780 до 480 °С в течение 25 с. Камера оборудована воздухоохлаждаемыми трубами и электронагревателями. Скорость охлаждения регулируют изменением расхода воздуха. Электронагреватели включают при разогреве и остановках печи.

В камере быстрого охлаждения металл охлаждается до заданной температуры. Применяют две системы высокоскоростного охлаждения: первой предусмотрена установка в камере большого числа водяных теплообменников со встроенными вентиляторами

для обеспечения интенсивного движения охлажденного защитного газа. По второй системе охлажденный в водяных холодильниках защитный газ подается вентиляторами в вертикальные проходы и через щелевые отверстия с большой скоростью обдувает с двух сторон движущуюся полосу. Такое струйное охлаждение резко уменьшает длительность операции и позволяет сократить длину камеры.

Непрерывные агрегаты для светлого отжига жести с вертикальными башенными печами распространены достаточно широко. Обычно обработке подвергают полосу толщиной 0,2—0,3 мм, движущуюся со скоростью 150—600 м/мин. Производительность агрегатов колеблется в пределах 25—60 т/ч. В камере нагрева обычно предусмотрено 6—12 проходов, она вмещает 100—200 м полосы, камера выдержки вмещает 120—170 м полосы, камеры медленного охлаждения — около 100—130 м, общая длина полосы составляет 600—1200 м.

При отоплении камеры нагрева коксовым газом на 1 т отжигаемой полосы расходуется около 40 м³ газа и 9 кВт·ч электроэнергии. Расход защитной азотной атмосферы при производительности агрегата 55 т/ч составляет 700—900 м³/ч. В печах поддерживают давление 50—150 Па. При использовании башенной печи с защитной атмосферой для светлой закалки полосы из нержавеющей стали толщиной от 0,08 до 0,3 мм полосу нагревают до 1100—1150 °С, температуру в печи поддерживают на 200—250 °С выше конечной температуры металла. Такие печи работают со скоростью движения полосы 20—30 м/мин и обеспечивают производительность до 10 т/ч. В качестве защитной атмосферы применяют диссоциированный аммиак или чистый водород, которые должны быть абсолютно обезвоженными.

Основное звено непрерывных линий для горячего цинкования стальной полосы — ванна с расплавленным цинком, через которую непрерывно движется полоса металла. Наибольшее распространение получил такой метод обработки, при котором в одной линии совмещены отжиг полосы и нанесение цинкового покрытия.

Вся непрерывная линия состоит из входной, технологической и выходной секций. Во входной и выходной секциях находится следующее оборудование: сварочные машины, ножницы, тянущие ролики, петлевые устройства и др.

В технологической секции осуществляются три стадии обработки:

1) нагрев полосы в окислительной атмосфере до 465 °С для сжигания прокатной смазки и образования тонкой равномерной пленки оксидов на поверхности полосы;

2) отжиг при 830 °С или нормализация при 950 °С в восстановительной атмосфере (75 % Н₂ и 25 % N₂, с температурой точки росы —65 °С). На этой стадии наряду с отжигом восстанавливаются оксиды и образуется тонкий слой металлически

чистого железа, что обеспечивает прочное сцепление цинкового покрытия с полосой;

3) охлаждение до 480—520 °С с обязательным применением защитной атмосферы для сохранения светлой поверхности. После охлаждения до этой температуры полоса поступает в ванну цин-

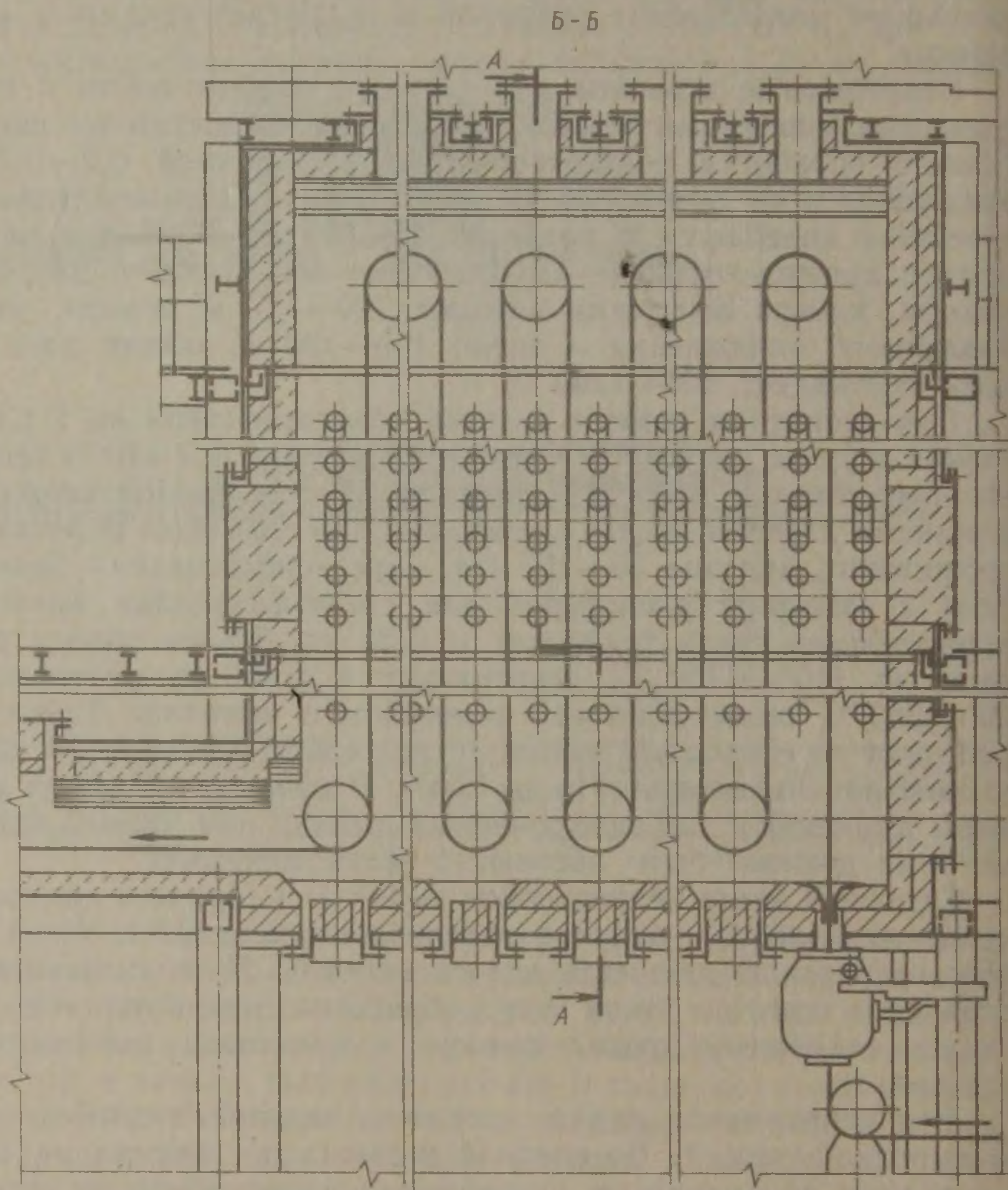
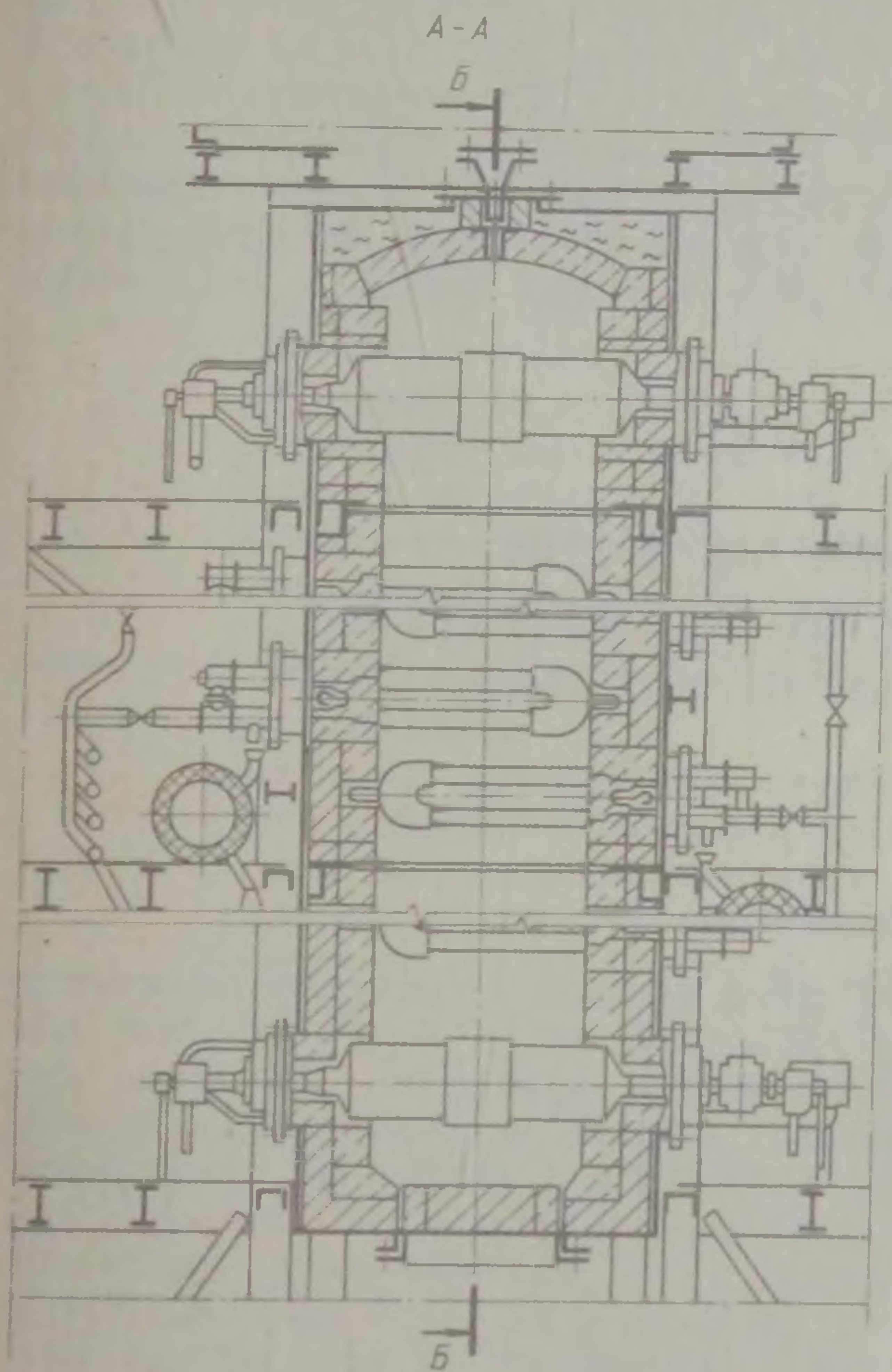


Рис. 29-11. Камера нагрева башенной печи

кования, не соприкасаясь с воздухом. Рабочую температуру ванны цинкования автоматически поддерживают на уровне 450 °С. На выходе из расплавленного цинка полоса проходит пассивацию в ванне с хромовым ангидридом, промасливается и поступает на моталки.

В соответствии с тремя стадиями термохимической обработки протяжная горизонтальная печь состоит из трех камер: окислительной, восстановительной и камеры охлаждения. Печь обычно

отапливают газообразным топливом. В окислительной камере происходит нагрев в атмосфере продуктов сгорания. В восстановительной камере газ сгорает в радиантных трубах, располагаемых поперек печи (сверху и снизу движущейся полосы). В камере охлаждения устанавливают охлаждающие трубы, через которые



пропускают холодный воздух. Восстановительную камеру и камеру охлаждения заполняют водородной защитной атмосферой, поэтому печь должна быть герметизирована.

На непрерывных линиях горячего цинкования обрабатывают полосу толщиной 0,3—3,5 мм и шириной 500—1500 мм. Расход цинка составляет 0,2—0,35 кг/м² поверхности полосы, толщина покрытия 0,025—0,038 мм. Скорость движения полосы достигает 120 м/мин, производительность линии 10—15 т/ч.

Как уже отмечалось, непрерывные агрегаты применяют и для электролитического лужения жести. Толщина жести, применяемой в пищевой промышленности, 0,15—0,1 мм. Такая тонкая жечь требует в процессе обработки осторожного обращения. Поэтому поддерживающие и направляющие ролики во избежание чрезмерных напряжений и разрывов ленты выполняют в большинстве случаев приводными, причем конструкция роликов и других элементов должна быть такой, чтобы исключить повреждение поверхности ленты. Все это удорожает и усложняет производство. Проводят работы по применению для транспортирования ленты воздушной подушки, которая образуется при пропускании определенного количества воздуха между лентой и поддерживающей поверхностью.

Раздел VIII **ТОПЛИВНЫЕ ПЕЧИ** **ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

Глава 30.

ШАХТНЫЕ ПЕЧИ

1. Особенности тепловой работы

Тепловая работа шахтных печей цветной металлургии отличается рядом особенностей, обусловленных видом и параметрами протекающих в них технологических процессов. Шахтные печи широко применяют на заводах цветной металлургии для плавки кусковой руды, брикетов, агломерата и различных промежуточных продуктов металлургического производства, имеющих кускообразную форму. Помимо этого шахтные печи используют для переплавки вторичных металлов и катодной меди. Конечным продуктом шахтной плавки в зависимости от вида технологического процесса могут быть штейн или черновой металл и шлак. При плавке кусковых материалов в печь сверху загружается шихта вместе с твердым топливом, роль которого обычно выполняет высококачественный кокс.

В зависимости от вида перерабатываемого материала топливные шахтные печи могут иметь два принципиально различных режима работы, основанных на газогенераторном и топочном процессах. Печи, работающие на базе газогенераторного процесса, применяют для плавки окисленных руд и аналогичных им по составу шихтовых материалов. В них на участке сжигания топлива, наряду с генерацией тепла, протекают процессы образования газообразной восстановительной среды, содержащей большое количество оксида углерода (CO). Оксид углерода, обра-

зующийся в результате газогенераторного процесса, используется при плавке как реагент для так называемого непрямого восстановления оксидов металлов, содержащихся в шихте.

Прямым восстановителем является кокс. Однако энергозатраты на восстановление окислов при использовании в качестве реагента кокса, отнесенные к килограмму углерода, в 2,45 раза выше, чем в случае применения оксида углерода.

Шахтные печи с режимом работы на базе топочного процесса применяют для переработки сульфидных материалов и переплавки вторичных металлов и катодной меди. В печах для плавки сульфидов кислород дутья используется при горении топлива и как реагент для окисления части сульфидов железа и элементарной серы, выделившейся при термическом разложении минералов. В печи таким образом поддерживается окислительная атмосфера. В шахтных печах, применяемых для переплавки вторичных металлов и катодной меди, газовая фаза не является реагентом технологического процесса. Для того, чтобы предотвратить угар металла, в рабочем пространстве печи обычно поддерживается восстановительная атмосфера. Однако образование больших количеств оксида углерода в процессе горения топлива является нежелательным явлением, так как оно сопровождается значительным потреблением тепла.

Шахтные печи цветной металлургии являются агрегатами непрерывного действия с режимом работы, характеризующимся неизменностью во времени основных параметров теплового и температурного режимов плавки. Конкретные значения параметров находятся в непосредственной зависимости от вида протекающего в печи технологического процесса и состава перерабатываемого сырья. В качестве примера рассмотрим процессы, осуществляемые в наиболее распространенных шахтных печах, применяемых на никелевых и свинцовых заводах.

Тепловая работа шахтных печей для плавки никельсодержащего сырья отличается крайней сложностью и ее количественная оценка базируется на анализе теплового баланса процесса. Примерно 95—97 % тепла, используемого в зоне технологического процесса, поступает в нее при горении твердого топлива и 3—5 % в процессе шлакообразования. Эта энергия распределяется среди продуктов плавки следующим образом: примерно 40—45 % расходуется на нагрев и расплавление шихты; 12—14 % — на осуществление эндотермических реакций и 21—22 % отводится с газообразными продуктами сгорания топлива и техническими газами. Потери тепла на нагрев воды в кессонах составляют около 22—24 %.

Температурный режим плавки пока еще не поддается расчету и выбирается опытным путем. При определении его параметров необходимо учитывать, что протекающие в печи процессы нагрева и расплавления шихты сопровождаются многочисленными экзотермическими и эндотермическими реакциями. К экзотермическим реакциям

относятся, в основном, окисление углерода и шлакообразование. Эндотермические реакции протекают в широком диапазоне температур и могут быть условно разделены на три группы, к которым относятся: образование газообразного реагента-восстановителя, состоящего из оксида углерода; диссоциация содержащихся в шихте основных флюсов и сульфидирующих компонентов; восстановление оксидов и сульфидирование переходящих в штейн металлов.

Газообразные продукты сгорания топлива, фильтруясь через слой шихтовых материалов, поднимаются вверх по шахте и постепенно охлаждаются за счет того, что в процессе теплообмена передают тепло шихте и активно участвуют в эндотермических реакциях. Восстановление диоксида углерода (CO_2) начинается сразу же после выхода газов из зоны горения и продолжается до тех пор, пока они не охладятся до 700°C . Образующийся в этих условиях оксид углерода взаимодействует с оксидами содержащихся в шихте металлов. Наиболее интенсивно протекает восстановление оксида никеля, начинающееся при $250\text{--}300^\circ\text{C}$. Для восстановления магнетита до оксида железа, имеющего большое значение в процессах формирования шлака, необходимы температуры свыше 900°C и концентрация оксида углерода в газовой фазе не менее 23 %.

Тепло, полученное материалом слоя в процессе теплообмена, расходуется на нагрев и плавление шихты, а также на диссоциацию и сульфидирование. Диссоциация известняка и сульфидирующих реагентов типа пирита происходит при температурах свыше $600\text{--}650^\circ\text{C}$. Реакции сульфидирования металлов идут в широком интервале температур от 800 до 1300°C .

В нижней части шахты, где накапливаются жидкие продукты плавки, температурный режим определяется условиями наиболее полного разделения шлака и штейна. Температура шлака, как правило, поддерживается на уровне 1400°C , температура штейна во многом зависит от его состава. С уменьшением содержания серы в штейне его температура должна увеличиваться, чтобы избежать насталеобразования, связанного с выпадением кристаллов ферроникеля. Например, при концентрации серы в штейне около 15 % выделение кристаллов ферроникеля начинается при 1250°C , а для штейна, содержащего 21 % серы — при 1100°C .

В шахтных печах свинцовых заводов плавят сырьевые материалы (агломерат), содержащие свинец в форме легковосстановимых оксидных соединений. В результате их переработки получают черновой металл, в который переходят также медь, олово, висмут, золото, серебро и некоторые другие компоненты шихты. Трудновосстановимые оксиды, например, железа и цинка, соединяясь с диоксидом кремния, переходят в шлак. Помимо оксидов металлов в шихте содержится небольшое количество сульфидных соединений, которые при плавке могут образовывать самостоятельную фазу — штейн и шпейзу.

Восстановление оксида свинца начинается практически сразу после того, как шихта попадает в печь при температуре 160—180 °С. Интенсивность этого процесса нарастает по мере прогревания шихты, достигая максимального значения при температурах порядка 750—1000 °С. Плавление шихты начинается задолго до завершения процессов восстановления. Эвтектики сплавов свинца и меди плавятся при 550 °С, смесь оксидов свинца и сурьмы при 550 °С, ферриты свинца при 752 °С и т. д.

Легкоплавкая жидкая фаза образуется уже в верхних частях шахты и движется вниз гораздо быстрее, чем слой твердого материала. На своем пути она вступает в многочисленные технологические реакции с твердой шихтой и коксом. В результате в центральной части печи слой в основном состоит из кокса и остатков нерасплавившейся шихты. Между ними идет интенсивное взаимодействие, протекающее с потреблением большого количества тепла, и поэтому температура на этом участке зоны технологического процесса невелика и составляет примерно 1300—1350 °С. То, что значительная часть оксидов восстанавливается непосредственно углеродом, влечет за собой некоторый перерасход кокса. В нижних частях шахты, где в зону технологического процесса подается газообразный окислитель (воздух, или дутье, обогащенное кислородом), до 75 % площади поперечного сечения печи занято коксом, свободным от шихты (коксовая постель). Температура здесь достигает 1400—1450 °С. Жидкие продукты плавки на выходе из печи имеют существенно более низкую температуру: шлак порядка 1200 °С, штейн 1000—1050 °С.

2. Конструкция и основные показатели работы

Шахтные печи, применяемые для переработки одного и тем более разных видов сырья, могут существенно отличаться друг от друга профилем и размерами шахты, числом дутьевых устройств (фурм) и рядом других параметров. Однако для всех печей характерен единый принцип работы, что позволяет осуществлять компоновку агрегата из практически одинаковых конструктивных элементов, к которым относятся горн, шахта, колошник и шатер. В ряде случаев к печи может примыкать внешний обогреваемый отстойник (передний горн), используемый для разделения жидких продуктов плавки.

Конструкцию конкретного агрегата удобнее всего рассмотреть на примере широко распространенной в промышленности шахтной печи свинцовой плавки прямоугольной формы (рис. 30-1).

Горн печи, повторяющий форму и размеры шахты на уровне фурм, сооружают из огнеупорного кирпича и устанавливают на массивном бетонном фундаменте. Изнутри горн футеруют хромомагнезитовым кирпичом, стойким по отношению к агрессивному воздействию расплавленной среды, для внешней кладки стен используют шамот. Снаружи горн заключен в сварной кожух из

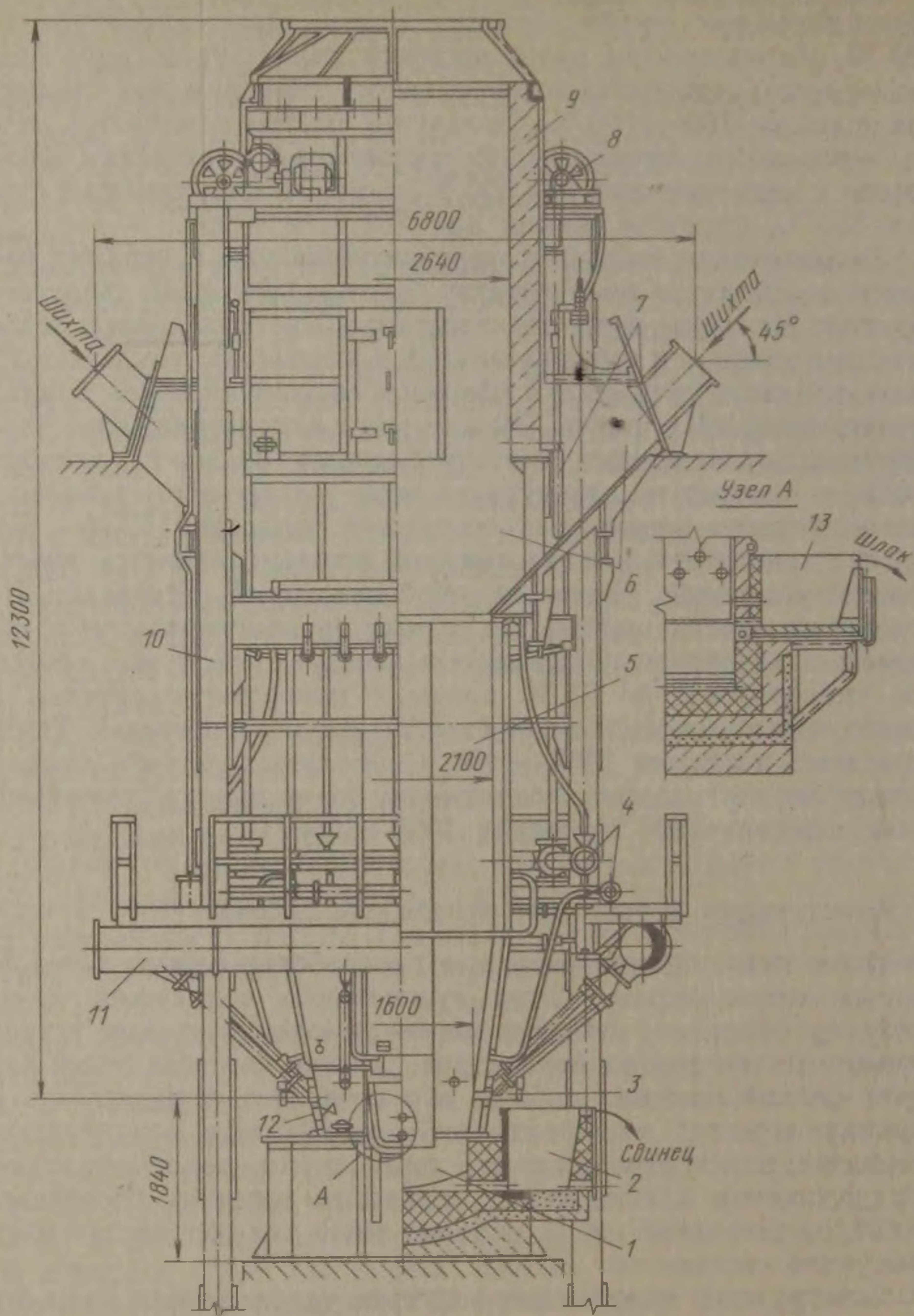


Рис. 30-1. Шахтная печь свинцовой плавки (вид с торца):

1 — горн; 2 — сифон для выпуска чернового свинца; 3 — фурменное устройство; 4 — коллекторы системы водяного охлаждения; 5 — шахта; 6 — колошник; 7 — шиберы загрузочные; 8 — привод подъема шиберов; 9 — шатер; 10 — каркас; 11 — коллектор для подвода дутья; 12 — фурменный кессон; 13 — сифон для выпуска шлака

листовой стали. Сверху на стенки горна укладывают и приваривают к кожуху массивные металлические плиты, служащие основанием для установки и крепления кессонов.

В условиях непрерывно работающей печи горн всегда заполнен расплавом. Внизу на лещади, выполненной в виде обратной арки, скапливается свинец, над которым располагаются штейн и шлак. Выпуск свинца организуется непрерывно через один или (для больших печей) два сифона, примыкающих к боковой стенке печи. Они представляют собой небольшую футерованную огнеупорным кирпичом камеру-копильник, соединенную с внутренним пространством горна специальным каналом. Шлак из печи выпускается периодически по мере накопления через специальные шпуровые отверстия в медных водоохлаждаемых кессонах, установленных в торцевой стенке горна. Для больших печей при получении легкоплавких, жидкостекучих шлаков может быть организован непрерывный сифонный выпуск.

Шахта печи состоит из кессонов, представляющих собой плоские металлические коробки шириной 0,6—0,9 м и высотой 1,5—6,0 м, охлаждаемые проточной водой. В последнее время кессоны в основном оборудуют системой испарительного охлаждения. Обычно устанавливают два ряда кессонов. Нижние или фурменные кессоны крепят друг к другу болтами и устанавливают на основании с небольшим ($3-5^\circ$) наклоном к вертикальной плоскости, образуя так называемые заплечики, воспринимающие активное давление слоя, находящегося в печи материала. Кессоны торцевых стен устанавливают вертикально. Верхнюю часть второго ряда кессонов крепят с помощью домкратов, опирающихся на специальную балку, опоясывающую печь по периметру и жестко соединенную со стечным каркасом. Для уплотнения зазоров между кессонами используют шнуровой асбест.

На высоте 300 мм от нижней кромки кессонов первого ряда расположены отверстия, в которые вставляют металлические водоохлаждаемые фурмы, заглубляемые в рабочее пространство печи на 200—300 мм. Фурмы имеют в диаметре 100—125 мм и устанавливаются в один реж в два ряда. Ширину печи на уровне фурм выбирают таким образом, чтобы воздух, подаваемый в печь под давлением порядка 20 кПа, достигал центра слоя. Обычно она составляет от 1,3 до 1,9 м. Длина печи зависит от ее производительности и колеблется в пределах от 2,5 до 26 м.

Колошник называется верхняя часть печи, расположенная над шахтой. Он сооружается из металлических плит, при необходимости футеруемых огнеупорным кирпичом. Колошник служит для размещения устройств загрузки перерабатываемых материалов, которые могут быть расположены в центре или вдоль боковых стен печи. Предпочтение отдается, как правило, боксовой загрузке, так как в этом случае крупные куски материала

располагаются в центре слоя, что способствует увеличению его газопроницаемости и улучшению аэродинамических характеристик печи. При боковой загрузке с одной или двух продольных стен колошника расположены несколько (3—4) загрузочных окон, оборудованных двухшиберными устройствами. Сначала открывают наружный шибер и в приемную камеру загружают порцию (колошу) агломерата или кокса. Затем закрывают наружный и открывают внутренний водоохлаждаемый шибер и материал по наклонной плоскости сползает в шахту.

Ш а т е р накрывает колошник, выполняя функции газоотводящей и сепарационной камеры. В куполе шатра имеются два-три отверстия, соединенные с металлическим газоходом. Внутреннюю поверхность заключенного в металлический кожух шатра футеруют огнеупорным кирпичом. На шахтных печах, применяемых для переработки шихт с большим содержанием цинка, применяют в основном шатры, изготовленные из металлических кессонов, охлаждаемых водой. Такая конструкция позволяет значительно облегчить очистку стен от пыли и настылей.

Сложность тепло- и массообменных процессов, протекающих в шахтных печах, и отсутствие надежных данных о теплофизических характеристиках перерабатываемых в них материалов в значительной степени ограничивают возможность применения расчетных методов при оценке тепловой работы этих агрегатов. В настоящее время эффективность работы шахтных печей оценивается в основном на базе статистической обработки производственных данных.

Важнейшими показателями работы печи являются ее удельная производительность, которую рассчитывают по количеству проплавляемой в течение суток шихты, отнесенному к 1 м^2 площади сечения печи в области фурм, и удельный расход топлива (кокса), определяемый в процентах от массы перерабатываемой шихты. Широкие пределы изменения этих показателей в условиях одного технологического процесса обусловлены, как правило, различиями в химическом и фракционном составе сырья, качеством применяемого топлива и характером дутья. Например, при свинцовой плавке высота слоя в зависимости от фракционного состава материала может изменяться от 2,5 до 6,0 м. Удельная производительность и расход топлива в зависимости от его химического состава колеблются соответственно в пределах от 35 до 100 т/м^2 в сутки и от 8 до 13 %. Отходящие газы шахтной печи свинцовой плавки имеют температуру порядка $250\text{—}400^\circ\text{C}$. Они содержат большое количество пыли, являющейся ценным полиметаллическим сырьем, направляемым после очистки газов в металлургическое производство.

[ПЛАВИЛЬНЫЕ ПЛАМЕННЫЕ ПЕЧИ]

1. Общие сведения

Плавильные пламенные печи широко применяют в цветной металлургии при производстве меди, никеля, олова и других металлов. По энергетическому признаку эти агрегаты относятся к классу печей теплообменников с радиационным режимом тепловой работы, благодаря чему они называются отражательными печами. По назначению они делятся на две большие группы: печи для переработки минерального сырья, основными представителями которых являются отражательные печи для плавки сульфидных медных концентратов на штейн, и печи, предназначенные для рафинировочной плавки металлов.

Отражательная печь для плавки на штейн является универсальным агрегатом с продолжительностью кампании от 1—2 до 6 лет. В ней можно плавить разнообразные по составу и физическим характеристикам материалы, основу которых составляет сырая (подсушенная) шихта. Большая емкость печи, в которой одновременно находится около 900—1000 т расплавленного материала, позволяет поддерживать стабильные теплотехнические параметры плавки при значительных колебаниях в производительности предшествующего (подготовка шихты) и последующего (конвертирование штейнов) за отражательной плавкой переделов. К основным недостаткам отражательных печей следует отнести отсутствие очистки дымовых газов от пыли и сернистого ангидрида и сравнительно высокий удельный расход топлива.

До настоящего времени отражательные печи остаются основными агрегатами на медеплавильных заводах. Однако с повышением требований к комплексному использованию сырья и охране окружающей среды, перспективы их дальнейшего использования существенно снизились. Кроме того, в отражательных печах практически не используется тепло, получаемое при окислении серы, выделяющееся при разложении сульфидных минералов. Поэтому в последнее время осуществляется постепенная замена отражательных печей более совершенными агрегатами для автогенной плавки медных концентратов на штейн.

Отражательные печи, в которых производится очистка металлов от примесей, носят названия, отражающие сущность протекающих в них технологических процессов. Например, печи, применяемые для получения специальных отливок — анодов, которые используют в последующем процессе электролитического рафинирования меди, называют анодными печами. Это малопродуктивные плавильные агрегаты периодического действия, в которых перерабатывается твердая и жидкая черновая медь, причем жидкую черновую медь подают в печь ковшем непосредственно из конвертера. Так называемые вайербарсовые печи от-

личаются от анодных только тем, что в них перерабатываются катоды, полученные в процессе электролиза, а также отходы красной и электролитной меди.

2. Отражательные печи для плавки медных концентратов на штейн

Основные характеристики

Конструкции печей для плавки на штейн различаются в зависимости от площади пода, состава и вида перерабатываемого сырья, способа отопления и применяемого топлива. В мировой практике встречаются агрегаты с площадью пода 300—400 м², однако наибольшее распространение получили печи, площадь пода которых порядка 200—240 м².

Основные характеристики отражательных печей приведены в табл. 31-1.

Таблица 31-1. Техническая характеристика отражательных печей для плавки медных сульфидных концентратов на штейн

Параметры	Характеристика печей с площадью пода, м ²				
	182 * ¹	190 * ²	225 * ³	240 * ¹	240 * ³
Основные размеры печи, м:					
длина по ванне	31,8	31,8	32,8	30,6	30,0
ширина по ванне	7,8	8,0	7,6	8,0	8,0
высота от лежачи до свода	2,6	2,4	2,6	3,2	3,8
Глубина ванны, м	0,8	1,1	1,0	1,0	0,9
Конструкция подиума	Набивная		Арочная		
Способ выпуска штейна	Сифонный		Через шпур		

*¹ Свод арочный из магнезитохромита. *² свод арочный из дивана. *³ свод распорно-подвесной из магнезитохромита.

Отражательные печи работают в основном на газовом, реже газомазутном и крайне редко на пылеугольном топливе. Для интенсификации процессов горения топлива на некоторых предприятиях используют дутье, обогащенное кислородом. Для большинства печей применяют торцевую подачу топлива, на ряде агрегатов торцевую подачу комбинируют со сводным отоплением. При торцевом отоплении обычно используют комбинированные газо-мазутные горелки, производительность которых по природному газу составляет 1100—1600 м³/ч, по мазуту — до 300 кг/ч. Основное назначение мазута — повышение степени черноты газового факела. В тех случаях, когда нет необходимости в интенсификации внешнего теплообмена в рабочем пространстве отражательной печи горелки такого типа успешно работают на

одном природном газе. В зависимости от производительности агрегата на печи устанавливают от 4 до 6 горелок. Такое же число горелок устанавливают на печи и при пылеугольном отоплении. Пылеугольные горелки типа «труба в трубе» работают с коэффициентом расхода воздуха порядка 1,1—1,2 и обеспечивают хорошее перемешивание топливо-воздушной смеси.

При комбинированном отоплении отражательных печей на своде печи могут быть установлены плоскопламенные радиационные горелки типа ГР, работающие на природном газе с использованием холодного и подогретого до 400 °С воздуха.

Основными элементами отражательной печи (рис. 31-1) являются: фундамент, под, стены и свод, которые в совокупности образуют рабочее пространство печи; устройства для подачи шихты, выпуска продуктов плавки и сжигания топлива; система отвода дымовых и технологических газов, бортов и дымовая труба. Фундамент печи представляет собой массивную бетонную плиту толщиной 2,5—4 м, верхняя часть которой выполнена из жаропрочного бетона. В фундаменте обычно имеются вентиляционные каналы и смотровые проходы.

Рабочее пространство является основной частью печи, так как в нем протекает технологический процесс и развиваются высокие температуры (1500—1650 °С). Подина (лещадь) выполняется в виде обратного свода, толщиной 1,0—1,5 м. Для кислых шлаков в качестве огнеупорных материалов при кладке пода и стен печи используют диас, для основных шлаков — хромомагнезит. Толщина стен на уровне ванны 1,0—1,5 м, над ванной — 0,5—0,6 м. Для теплоизоляции стен обычно используют легковесный шамот. Расстояние между боковыми стенами (ширина печи) в зависимости от конструкции агрегата изменяется в пределах 7—11 м, между торцевыми стенами (длина печи) 28—40 м.

Свод печи является наиболее ответственным элементом ее конструкции, так как от его стойкости зависит продолжительность кампании печи. Свод имеет толщину 380—460 мм и выкладывается из специального магнезитохромитового и периклазошпинелидного кирпича. Как правило, используют распорно-подвесные и подвесные своды. У боковых стен свод опирается на стальные пятовые балки. Для компенсации распирающих усилий создаваемых ванной расплава и сводом, стены печи заключены в каркас, состоящий из стоек, расположенных через 1,5—2 м вдоль стен, скрепленных продольными и поперечными тягами. На концах тяги оснащены пружинами и гайками, которые позволяют компенсировать температурные расширения кладки.

Для загрузки шихты используют специальные отверстия, расположенные в своде через каждые 1,0—1,2 м вдоль боковых стен печи, в которых установлены воронки с патрубками диаметром 200—250 мм. К загрузочным воронкам шихта подается ленточными или скребковыми транспортерами. В некоторых случаях загрузка шихты производится с помощью шнековых питателей или

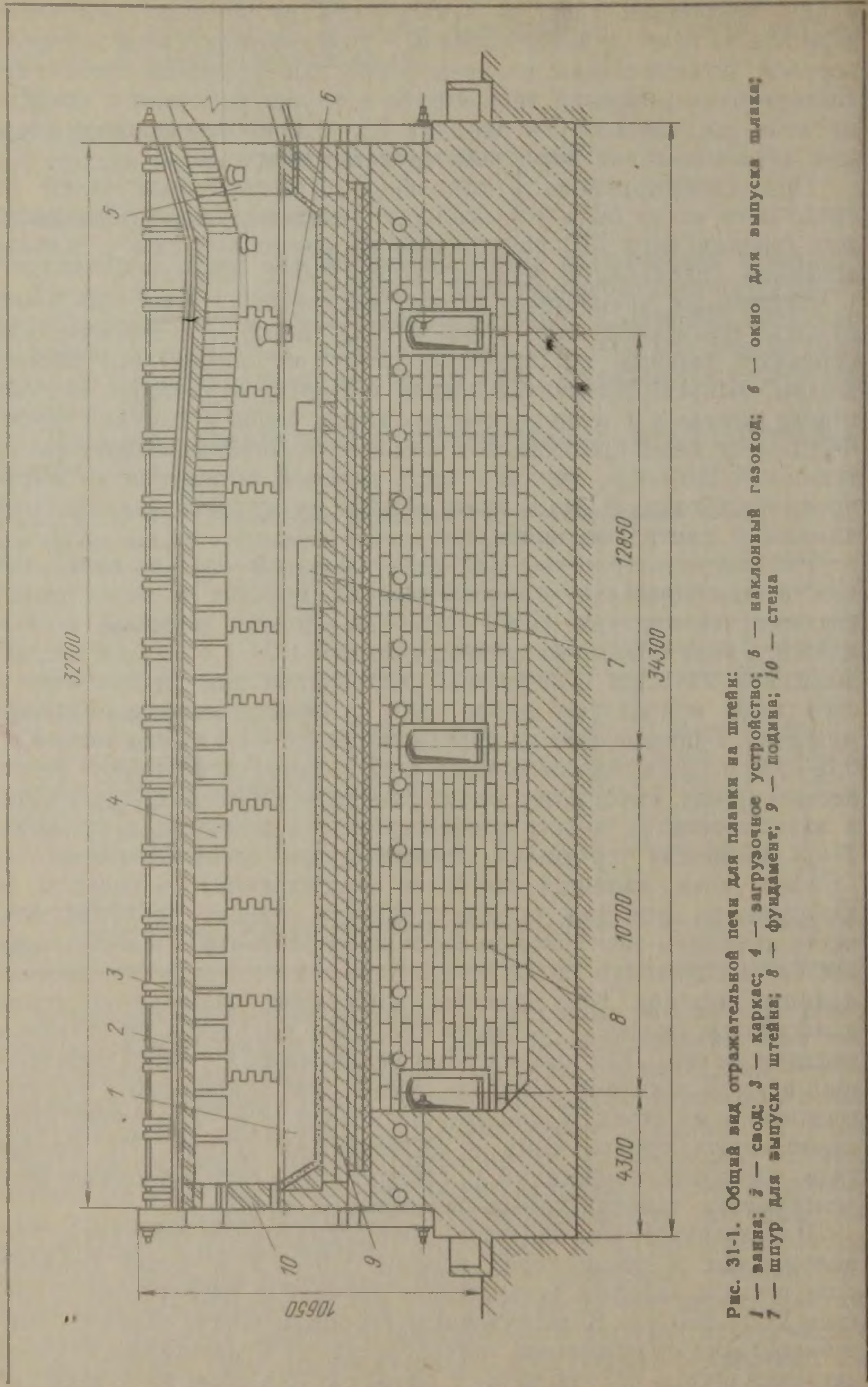


Рис. 31-1. Общий вид отражательной печи для плавки на штейн:
 1 — ванна; 2 — свод; 3 — каркас; 4 — загрузочное устройство; 5 — наклонный газоход; 6 — окно для выпуска шлака;
 7 — шпур для выпуска штейна; 8 — фундамент; 9 — подина; 10 — стена

забрасывателей через окна в боковых стенах печи. Загрузочные отверстия имеются по всей длине печи, но шихта подается, как правило, только в плавильную зону.

Конвертерный шлак заливается в печь через окно в торцевой стенке расположенное над горелками. Иногда для этого используют специальные отверстия в своде или окна в боковых стенах, расположенные вблизи от передней торцевой стенки печи. Для выпуска штейна применяют сифонные или специальные разборные металлические шпуровые устройства с керамическими или графитовыми втулками. Устройства для выпуска штейна расположены в двух или трех местах вдоль боковой стенки печи. Шлак выпускается периодически по мере его накопления через специальные окна, расположенные в конце печи в боковой или торцевой стенке на высоте 0,8—1,0 м от поверхности пода.

Отвод газов из рабочего пространства печи осуществляется через специальный газоход (аптейк), наклоненный к горизонтальной плоскости под углом 7—15°. Наклоненный газоход переходит в боров, который служит для отвода продуктов сгорания топлива в котел-утилизатор или в дымовую трубу. Боров представляет собой горизонтально расположенный газоход прямоугольного сечения, внутренняя поверхность которого выложена из шамота, наружная — из красного кирпича.

Для утилизации тепла отходящих газов в сборном борове отражательных печей устанавливают водотрубные котлы-утилизаторы, которые оборудованы специальными экранами, позволяющими эффективно бороться с заносом и ошлакованием рабочей поверхности котлов, содержащимися в газах пылью и каплями расплава. Для предотвращения сернокислотной коррозии металлических элементов температура газов на выходе из котла должна быть существенно выше 350 °С. После котла-утилизатора устанавливают металлический петлевой рекуператор, позволяющий использовать тепло газов, выходящих из котла, для нагрева дутьевого воздуха.

Основными достоинствами отражательной плавки являются: относительно небольшие требования к предварительной подготовке шихты (влажность, повышенное содержание мелких фракций и т. п.); высокая степень извлечения меди в штейн (96—98 %); незначительный унос пыли (1—1,5 %); повышенная производительность единичного агрегата, достигающая до 1200—1500 т в сутки по проплавляемой шихте, а также высокий коэффициент использования топлива в печи, который составляет в среднем около 40—45 %.

К недостаткам процесса следует отнести низкую степень десульфурации (получение сравнительно бедных по меди штейнов) и большой удельный расход топлива, который составляет примерно 150—200 кг у. т. на тонну шихты. Значительное количество дымовых газов на выходе из печи ограничивает возможность их очистки и использования в сернокислотном производстве из-за низкого содержания в них сернистого ангидрида (2,5 %).

Тепловой и температурный режимы работы

Отражательная печь для плавки на штейн является агрегатом непрерывного действия с относительно постоянными во времени тепловым и температурным режимами работы. В ней осуществляется технологический процесс, состоящий из двух послед-

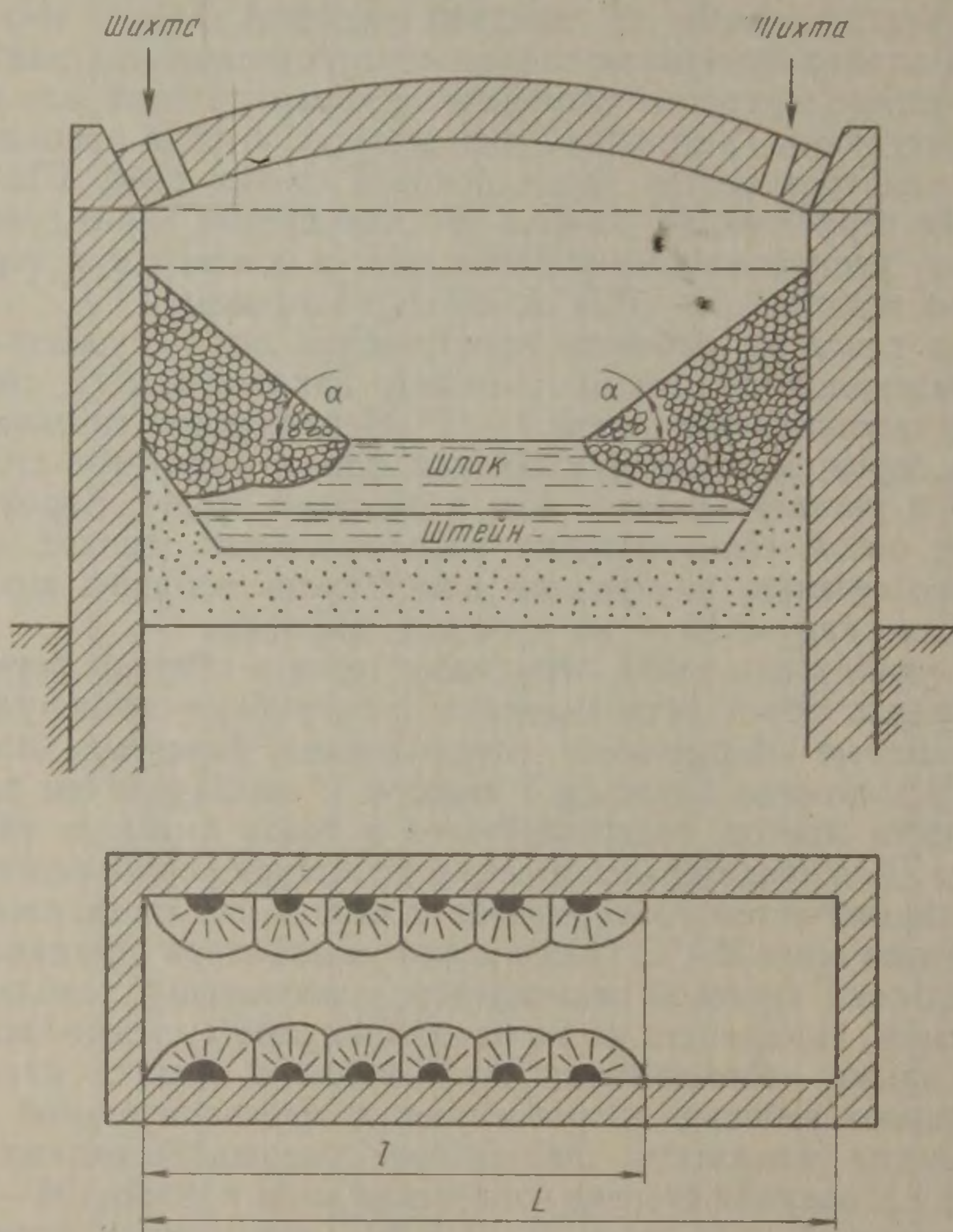


Рис. 31-2. Схема расположения материалов в рабочем пространстве отражательной печи для плавки на штейн:

l — длина плавильной зоны; L — длина печи

вательно протекающих операций: расплавления шихтовых материалов и разделения полученного расплава под действием силы тяжести на штейн и шлак. Для сохранения последовательности этих процессов они осуществляются в различных участках рабочего пространства печи. На протяжении всей работы агрегата в нем постоянно находятся твердая шихта и продукты плавки.

Схема расположения материалов в печи представлена на рис. 31-2. Шихтовые материалы располагаются вдоль стен с обеих

сторон печи, образуя откосы, которые закрывают боковые стены почти до свода на $\frac{2}{3}$ их длины. Между откосами и в хвостовой части печи размещается ванна расплава, которую условно можно разделить на две части. Верхний слой занимает шлак, нижний — штейн. По мере накопления они выпускаются из печи. При этом шлаковый расплав постепенно перемещается вдоль агрегата и непосредственно перед выпуском попадает в так называемую отстойную зону, свободную от откосов.

Технологический процесс в отражательной печи осуществляется за счет тепла, выделяемого в пламени при горении топлива. Тепловая энергия поступает на поверхность ванны и шихтовых откосов в основном в виде потока тепла излучением от факела, свода и других элементов кладки ($\sim 90\%$), а также конвекцией от раскаленных продуктов сгорания топлива ($\sim 10\%$). Теплообмен излучением в плавильной зоне рабочего пространства печи рассчитывают по формулам:

$$q_w^o = C_o \left\{ A_o \epsilon_r \left[\left(\frac{T_r}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_o}{100} \right)^4 \right] + B_o (1 - \epsilon_r) \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_o}{100} \right)^4 \right] + D_o (1 - \epsilon_r) \left[\left(\frac{T_b}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_o}{100} \right)^4 \right] \right\};$$

$$q_w^b = C_o \left\{ A_b \epsilon_r \left[\left(\frac{T_r}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_b}{100} \right)^4 \right] + B_b (1 - \epsilon_r) \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_b}{100} \right)^4 \right] + D_b (1 - \epsilon_r) \left[\left(\frac{T_o}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_b}{100} \right)^4 \right] \right\};$$

$$q_w^k = C_o \left\{ A_k \epsilon_r \left[\left(\frac{T_r}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_n}{100} \right)^4 \right] + B_n (1 - \epsilon_r) \left[\left(\frac{T_b}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_n}{100} \right)^4 \right] + D_n (1 - \epsilon_r) \left[\left(\frac{T_o}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_n}{100} \right)^4 \right] \right\}, \quad (31-1)$$

где q_w^o , q_w^b , q_w^k — соответственно плотность результирующих тепловых потоков для тепловоспринимающих поверхностей откосов, ванны и свода (кладки), Вт/м²; T_r , T_n , T_o , T_b — соответственно средние температуры продуктов сгорания топлива и поверхностей свода, откосов и ванны, К; ϵ_r — степень черноты газа; $C_o = 5,67$ Вт/(м²·К⁴) — коэффициент излучения абсолютно черного тела; A_o , B_o , D_o , A_b , B_b , D_b , A_k , B_n , D_n — коэффициенты, с помощью которых учитывают оптические характеристики поверхностей откосов, ванны и свода и их взаимное расположение в рабочем пространстве печи. Для современных отражательных печей значения этих коэффициентов равны: $A_o = 0,718$; $B_o = 0,697$; $D_o = 0,012$; $A_b = 0,650$; $B_b = 0,593$; $D_b = 0,040$; $A_k = 1,000$; $B_n = 0,144$; $D_n = 0,559$.

В отстойной зоне откосов нет и теплообмен излучением может быть рассчитан по формуле

$$q_w^в = C_{пр} \left[\left(\frac{T_r}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_b}{100} \right)^4 \right], \quad (31-2)$$

где $C_{пр}$ — приведенный коэффициент излучения в системе газ—кладка—расплав.

Система уравнений (31-1)—(31-2) представляет собой описание так называемой «внешней» задачи. В качестве независимых переменных величин в уравнениях используются средние значения температур продуктов сгорания топлива и тепловоспринимающих поверхностей свода откосов и ванны. Температура газов в печи может быть найдена при расчетах горения топлива. Температуру кладки определяют по опытным данным, для чего обычно задаются величиной тепловых потерь через свод ($q_{пот}^*$), считая, что $q_w^к = q_{пот}^к$. Средние температуры поверхностей откосов и ванны находят при решении внутренней задачи, к которой относятся вопросы тепло- и массопереноса, протекающего внутри зоны технологического процесса.

Нагрев и расплавление шихты на откосах. В состав шихты в качестве основных компонентов входят сульфидные минералы меди и железа, а также оксиды, силикаты, карбонаты и другие порообразующие соединения. Под действием высоких температур эти материалы нагреваются. Нагрев сопровождается испарением влаги, содержащейся в шихте, разложением минералов и другими физико-химическими превращениями, обусловленными принятой технологией. Когда температура на поверхности загружаемой шихты достигает примерно 915—950 °С, начинают плавиться сульфидные соединения, образующие штейн. Наряду с плавлением сульфидов продолжается нагрев стальных материалов и при температурах порядка 1000 °С в расплав начинают переходить оксиды, образующие шлак. Интервал температур плавления основных шлаков составляет 30—80 °С. С увеличением степени кислотности шлака этот интервал растет и может достигать 250—300 °С. Полного расплавления шлака на откосах, как правило, не происходит, так как штейн и легкоплавкие соединения шлака стекают с наклонной поверхности откосов, увлекая за собой остальной материал. В период плавления откосы покрыты тонкой пленкой расплава, температура которого постоянна во времени и зависит в основном от состава шихты.

Процессы, протекающие на откосах, можно условно разделить на два периода, включающие в себя нагрев поверхности загруженной шихты до температуры, при которой образующийся расплав начинает стекать с откосов, и дальнейший нагрев шихты в сочетании с плавлением материала. Длительность первого периода определяется условиями внешней задачи, примерно одинакова для всех шихт и составляет около 1,0—1,5 мин. Продол-

жительность второго периода определяется условиями внутренней задачи. Она обратно пропорциональна величине плотности теплового потока на поверхности откосов и прямо пропорциональна толщине слоя загружаемой шихты. В условиях конкретной печи длительность этого периода зависит от способа загрузки и может составлять от нескольких минут до 1—2 ч. После окончания периода плавления на откосы загружается новая порция шихты и процесс повторяется.

Необходимо отметить, что с уменьшением интервала времени между загрузками снижается средняя (во времени) температура поверхности откосов. Соответственно растут плотность результирующего теплового потока на этой поверхности и скорость плавления шихты. Максимальный эффект достигается тогда, когда этот интервал сопоставим по величине с продолжительностью первого периода, т. е. практически при непрерывной загрузке. Поэтому при конструировании печи следует учитывать, что системы непрерывной загрузки имеют несомненное преимущество.

Средняя по массе скорость плавления материала (кг/с) может быть определена по формуле

$$G^{\circ} = kq_w^{\circ}F_o/Q_{ш}^{\circ}, \quad (31-3)$$

где $Q_{ш}^{\circ}$ — теплотребление шихты на откосах, Дж/кг; k — коэффициент, учитывающий конвективную составляющую суммарного теплового потока на поверхности шихтовых откосов, $k = 1,1 \div 1,15$; F_o — поверхность откосов, м².

Переработка материалов в шлаковой ванне. В ванну поступает расплавленный материал с откосов и, кроме того, обычно заливается конвертерный шлак, содержащий примерно 2—3 % меди и других ценных компонентов, которые при плавке переходят в штейн. Поступающие материалы прогреваются в ванне до средней температуры содержащегося в ней расплава, что сопровождается завершением процессов формирования шлака, а также эндо- и экзотермическими реакциями, характер которых обусловлен технологией плавки. Расходуемое на эти процессы тепло распределяется следующим образом: нагрев продуктов, поступающих с откосов (Q_1) 15—20 %; завершение процессов плавления и образования вновь поступившего шлака (Q_2) 40—45 %; прогрев конвертерного шлака (Q_3) и эндотермические реакции (восстановление магнетита и т. п.) (Q_4) 35—40 % и потери тепла теплопроводностью через стены и под печи 1 %. Кроме того, в ванне происходят экзотермические процессы, связанные с усвоением кремнезема расплавом шлака (Q_5). Суммарный эффект от протекания процессов, идущих с потреблением и выделением тепла, отнесенный к единице массы перерабатываемой шихты $\left(\sum_{i=1}^n Q_i\right)$ носит название теплотребления шихты в ванне и обозначается $Q_{ш}^{\circ}$.

Процессы тепло- и массопереноса в ванне отличаются крайней сложностью вследствие сочетания конвекции и теплопроводности. Задачу можно существенно упростить, если учесть, что температура капель штейна, распределенных по объему шлака, равна температуре окружающего их расплава. В этом случае можно предположить, что штейн фильтруется через относительно неподвижный шлак, в котором тепло передается теплопроводностью, и что капли штейна практически принимают температуру шлака в любой точке ванны. С целью создания возможностей для математического описания крайне сложных тепло- и массообменных процессов, протекающих в шлаковой ванне, были приняты следующие необходимые допущения:

1. Завершение тепловой обработки материала, поступающего с откосов в ванну расплава отражательной печи, происходит в условиях, когда температурный режим ванны не изменяется во времени. Скорость осаждения капель штейна считается постоянной, равной среднему удельному расходу штейна lG_y^a , где G_y^a — скорость поступления материала в ванну, равная количеству шихты проплавляемой в единицу времени на откосах и отнесенная к единице поверхности ванны F_b , кг/(м²·с); l — доля штейна в 1 кг шихты. Удельная теплоемкость штейна принимается равной $c_{шт}$.

2. Градиенты температур по длине и ширине ванны ($\sim 1,0$ — $1,5$ °С/м) незначительны по сравнению с градиентами температур по ее глубине (~ 300 — 400 °С/м) и их значениями можно пренебречь, считая поле температур в ванне одномерным.

3. Процессы тепло- и массопереноса в ванне сопровождаются эндо- и экзотермическими реакциями, которые могут рассматриваться как стоки и источники тепла, распределенные по глубине ванны. Суммарный эффект от их воздействия равен теплотреб-

лению шихты в ванне $G_y^a \sum_{i=1}^n \int_0^{\delta} Q_i(x) dx$, где $Q_i(x)$ — интенсив-

ность процессов, идущих с потреблением тепла, отнесенная к единице массы проплавляемой шихты, Дж/кг. Для аппроксимации закона распределения этой величины по глубине ванны можно воспользоваться полиномом второй степени

$$Q_i(x) = a_i + b_i x + c_i x^2,$$

где x — координата точек на оси, нормальной к поверхности ванны.

4. Содержание штейна в шлаковой ванне невелико и поэтому предполагается, что занимаемый им объем пренебрежимо мал по сравнению с объемом ванны. Глубина ванны принимается равной δ , средняя температура шлака, а также температуры на верхней ($x = 0$) и нижней ($x = \delta$) границах шлаковой ванны определяются параметрами технологического процесса и соответственно равны $T_{ср. ш.}$, T_0 , T_δ .

При составлении дифференциального уравнения переноса тепла в ванне отражательной печи (с учетом принятых допущений) ее можно рассматривать в виде плоской пластины (шлака) с коэффициентом теплопроводности, равным коэффициенту теплопроводности шлака $\lambda_{ш}$. Плотность теплового потока внутри ванны в сечениях x и $x + dx$ определится следующими уравнениями:

$$q_x = -\lambda_{ш} \frac{dT}{dx} \text{ и } q_{x+dx} = -\lambda_{ш} \frac{d}{dx} \left(T + \frac{dT}{dx} dx \right).$$

В условиях, когда температура по глубине ванны не меняется во времени, изменение теплового потока на участке dx происходит вследствие охлаждения штейна и протекания эндо- и экзотермических процессов, интенсивность которых будет равна:

$$Q_v(x) = G_y^B \sum_{i=1}^n Q_i(x) dx,$$

$$\text{т.е. } dq_x = q_x - q_{x+dx} = G_y^B n c_{шт} dT + Q_v(x)$$

$$\text{или } \frac{d^2T}{dx^2} + P \frac{dT}{dx} + Q(x) = 0, \quad (31-4)$$

$$\text{где } P = -\frac{1}{\lambda_{ш}} G_y^B n c_{шт} \text{ и } Q(x) = -\frac{1}{\lambda_{ш}} G_y^B \sum_{i=1}^n Q_i(x).$$

При описании условий на границах шлаковой ванны были использованы уравнения теплового баланса шлаковой и штейновых ванн, которые имеют вид:

$$-\lambda_{ш} \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} + G_y^B n c_{шт} T_0 + \lambda_{шт} \frac{dT}{dx} \Big|_{x=\delta} -$$

$$- G_y^B n c_{шт} T_\delta = G_y^B \sum_{i=1}^n \int_0^\delta Q_i(x) dx;$$

$$-\lambda_{ш} \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} + G_y^B n c_{шт} T_\delta - q_{пот} - G_y^B n c_{шт} T_{ср.ш} = 0,$$

где $q_{пот}$ — плотность теплового потока на подине печи (потери тепла теплопроводностью через под печи), Вт/м²; $T_{ср.шт}$ — средняя температуры штейна, °С.

Общее решение уравнения (31-4) имеет вид

$$T(x) = T_0 - C_1 \frac{1}{P} (e^{-Px} - 1) + C_2 x + C_3 x^2 + C_4 x^3. \quad (31-5)$$

При анализе внутренней задачи удобнее использовать частные решения уравнения (31-4), позволяющие вычислить среднюю температуру шлака $T_{ср.ш}$ и температуру на границе раздела шлака и штейна T_δ , влияние которых на параметры технологического процесса достаточно хорошо изучены.

Средняя температура шлака, вычисленная при интегрировании уравнения (31-5), определится по формуле

$$T_{\text{ср. ш}} = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} T(x) dx = T_0 + \frac{C_1}{P\delta} (e^{-P\delta} - 1) + \\ + \frac{C_2}{P} + \frac{1}{2} C_3\delta + \frac{1}{3} C_3\delta^2 + \frac{1}{4} C_4\delta^3. \quad (31-6)$$

После нахождения постоянных интегрирования C_1, C_2, C_3, C_4 из граничных условий и почленного суммирования выражений (31-5) и (31-6) была получена формула для расчета температуры на границе раздела шлака и штейна

$$T_{\delta} = T_0 - \frac{\delta}{\lambda_{\text{ш}}} G_{\text{у}} \left[\sum_{i=1}^n k_i \int_0^{\delta} Q_i(x) dx - n c_{\text{шт}} (T_{\text{ср. ш}} - T_{\text{ср. шт}}) \right] - \\ - \frac{\delta}{\lambda_{\text{ш}}} q_{\text{пот}}, \quad (31-7)$$

где k_i — коэффициент, величина которого зависит от характера распределения стоков и источников тепла в ванне. В зависимости от вида функции $Q_i(x)$ величина k_i изменяется в пределах от нуля до единицы.

В процессе эксплуатации печи параметры температурного режима ванны оказывают существенное влияние на основные технологические показатели плавки. Например, величина средней температуры шлаковой ванны имеет непосредственное влияние на скорость разделения продуктов плавки. Чем она выше, тем меньше вязкость расплавленного шлака и выше скорость осаждения штейна. Однако величина средней температуры шлака ограничена значениями температур на верхней и нижней границах шлаковой ванны. Повышение температуры на границе раздела шлака и штейна способствует интенсификации процессов диффузии штейна (и вместе с ним меди и других ценных компонентов) в шлак и увеличению растворимости штейна в шлаковом расплаве. Снижение этой температуры до значений, при которых начинает выделяться твердая фаза, ведет к образованию настелей на подине печи. Поверхность ванны находится в непосредственном контакте с печными газами, т. е. с окислительной атмосферой. В этих условиях увеличение температуры шлака влечет за собой рост химических потерь металла.

Таким образом, параметры температурного режима ванны зависят от состава перерабатываемой шихты, индивидуальны для каждой печи и определяются опытным путем в ходе технологических экспериментов. Любое отклонение от заданных параметров приводит к повышению содержания металла в шлаке, что из-за большого выхода шлака ведет к существенным потерям металла. Вместе с тем повышение потерь металла со шлаками при прочих

равных условиях свидетельствует о нарушении температурного и теплового режимов работы отражательной печи.

Взаимосвязь между температурным и тепловым режимами ванны может быть получена из уравнения (31-7), для чего это уравнение необходимо представить в виде:

$$G_y^0 \sum_{i=1}^n \int_0^{\delta} Q_i(x) dx - G_y^0 \left[\sum_{i=1}^n (1 - k_i) \int_0^{\delta} Q_i(x) dx + c_{шт} (T_{ср. ш} - T_{\delta}) n \right] = \frac{\lambda_{шт}}{\delta} (T_0 - T_{\delta}) + G_y^0 c_{шт} n (T_{\delta} - T_{ср. шт}) - q_{пот} \quad (31-8)$$

или

$$G_y^0 = \frac{\frac{\lambda_{шт}}{\delta} (T_0 - T_{\delta}) - q_{пот}}{\sum_{i=1}^n k_i \int_0^{\delta} Q_i(x) dx - c_{шт} (T_{ср. ш} - T_{ср. шт}) n} \quad (31-8')$$

Физический смысл полученных уравнений заключается в следующем. Первое слагаемое в левой части уравнения (31-8) — это плотность теплового потока, или удельная тепловая мощность, которая требуется для полной тепловой обработки материалов, поступающих на единицу поверхности ванны. Второе и третье слагаемые представляют собой плотность суммарного теплового потока теплопроводности и конвекции, который усваивается этими материалами внутри ванны. Необходимо отметить, что интенсивность переноса тепла конвекцией в ванне шлака определяется количеством и степенью перегрева получаемого штейна относительно средней температуры штейновой ванны и в условиях отражательной плавки при неизменных параметрах технологического процесса является постоянной величиной.

Количество тепла, подводимого к продуктам плавки за счет теплопроводности, в основном определяется характером распределения стоков и источников тепла (интенсивности процессов потребления тепла) по глубине ванны. Чем ближе они расположены к поверхности ванны, тем больше тепла подводится к ним за счет теплопроводности и соответственно тем меньше величина коэффициента k_i . Расчетным путем значения коэффициента k_i могут быть получены только для наиболее простых функций распределения $Q_i(x)$. Например, при линейном и параболическом законах распределения $Q_i(x)$, когда максимум потребления тепла находится на поверхности ванны, а на ее нижней границе потребление тепла равно нулю, величина k_i будет соответственно равна 0,33 и 0,25. Если максимум и минимум теплотребления поменять местами, то значения коэффициента k_i будут соответственно равны 0,67 и 0,75.

Правая часть уравнения (31-8) представляет собой плотность суммарного теплового потока теплопроводности и конвекции, который усваивается поступившим в ванну материалом на границе раздела шлака и штейна.

Уравнение (31-8') определяет оптимальную с позиций технологии скорость поступления материалов в ванну, т. е. скорость, при которой температурное поле ванны соответствует заданному технологическому режиму плавки. Ее величина будет равна частному от деления удельной тепловой мощности, подводимой к нижней границе шлаковой ванны, на то количество тепла, которое необходимо для завершения процесса тепловой обработки поступающих в ванну материалов в расчете на единицу массы проплавляемой шихты.

Теоретически могут существовать такие шихтовые материалы, тепловая обработка которых полностью завершается внутри ванны шлакового расплава. В этом случае скорость поступления материала в ванну определяется условиями внешней задачи, так как любое количество тепла, подводимое к ее поверхности, усваивается продуктами плавки. На границе раздела шлака и штейна отсутствуют процессы, протекающие с потреблением тепла, и формула (31-8) теряет свой смысл, так как ее числитель и знаменатель тождественно равны нулю. В реальной практике медеплавильных заводов сырье такого типа обычно не встречается. Подтверждением этого может служить известное правило, согласно которому рост удельной производительности печи всегда сопровождается увеличением потерь металла с отвальными шлаками. Объясняется это следующими причинами. Удельная производительность отражательной печи, рассчитываемая по количеству проплавляемой шихты, фактически определяется скоростью процессов плавления материала на откосах, которая прямо пропорциональна плотности теплового потока на их поверхности и может достигать 15—20 т/м² в сутки в расчете на единицу площади пода печи. Скорость последующей тепловой обработки шихты в ванне, от величины которой зависит содержание металла в шлаке, лимитируется условиями внутренней задачи, т. е. интенсивностью процессов тепло- и массопереноса в шлаковом расплаве, и составляет, как показывает практика, примерно 2—5 т/м² в сутки при плавке сырой (подсушенной) шихты.

За счет интенсификации внешнего теплообмена при обогащении дутья кислородом, установки дополнительных сводовых горелок, и т. п. может быть увеличена величина результирующего теплового потока на поверхность зоны технологического процесса. На откосах соответственно возрастает скорость плавления шихты и вместе с ней удельная производительность печи. Скорость тепловой обработки продуктов плавки в ванне не зависит от условий внешней задачи и поэтому увеличение плотности результирующего теплового потока на ее поверхности и количества поступающих в нее материалов приводит к перестройке температурного

поля шлаковой ванны, т. е. к нарушению заданного температурного режима плавки и, как следствие, способствует росту потерь металла со шлаком.

Наиболее отчетливо это проявляется при резком (скачкообразном) повышении скорости поступления материала в ванну, например при локальном «обрушении» откосов. При сползании относительно большой массы непроплавленной шихты в ванну уменьшается температура верхнего слоя шлакового расплава, его вязкость растет, что в сочетании с обильным выделением технологических газов приводит к образованию на поверхности ванны в том месте, где произошло «обрушение», пористого слоя («пены»), коэффициент теплопроводности которого на порядок ниже, чем у остального расплава. В результате на этом участке, согласно формуле (31-8'), резко снижается скорость тепловой обработки материала, в то время как с откосов расплавленная шихта продолжает поступать с прежней интенсивностью. Поэтому снижение температуры и образование пористого слоя продолжается и вскоре этот слой «растекается» по всей поверхности ванны. В итоге, как показывает практика работы отражательных печей, температурный режим ванны становится неуправляемым и технологический процесс прекращается, так как металл практически полностью переходит в шлак.

В тех случаях, когда при прочих равных условиях скорость поступления материала в ванну снижается за счет уменьшения поверхности откосов или каких-либо других причин и становится меньше оптимальной, согласно формуле (31-7) происходит уменьшение перепада температур по глубине шлаковой ванны. Это приводит к интенсификации процессов диффузии штейна в шлак и увеличению его растворимости в шлаковом расплаве, т. е. росту потерь металла со шлаком.

Таким образом удельная производительность печи определяется скоростью процессов тепло- и массопереноса в ванне и зависит в основном от характеристики сырья ($Q_{ш}^в$, $\lambda_{ш}$, $c_{шт}$, n , k_l , $Q_{ш}^0$) и температурного режима плавки (T_0 , $T_{ср.ш}$, $T_{ср.шт}$, T_δ).

Непосредственное экспериментальное определение скорости тепловой обработки материала в ванне из-за сложности протекающих в ней процессов пока не представляется возможным. Это создает известные трудности при адаптации расчетной модели и подборе так называемых настроечных коэффициентов, использование которых в формулах (31-8) и (31-8') позволило бы применить их для расчета конкретных параметров отражательных печей. Анализ этих уравнений может быть использован только для интерпретации существующих инженерных решений и обоснования выбора направления дальнейшего совершенствования тепловой работы агрегата. Необходимо также учитывать, что для большинства современных отражательных печей характерны максимальная для каждого агрегата интенсивность внешнего тепло-

обмена и, как следствие, повышенная удельная производительность. В этих условиях повышение скорости тепловой обработки материала в ванне способствует сокращению потерь металла со шлаком и создает предпосылки для дальнейшего повышения производительности печи.

Проведенный анализ позволяет получить необходимые расчетные выражения и дать энергетическую интерпретацию известных технологических особенностей отражательной плавки и конструктивных решений отдельных элементов печи:

1. Для большинства медеплавильных заводов отражательная печь является единственным агрегатом, в котором могут перерабатываться конвертерные шлаки. В этих условиях довольно часто конвертерный шлак загружается в печь в твердом состоянии на поверхность откосов вместе с шихтой. Такой способ загрузки ведет к дополнительным затратам энергии, так как для повторного расплавления шлака требуется значительное количество тепла. Тем не менее он получил широкое распространение, так как загрузка твердого конвертерного шлака на откосы способствует улучшению температурного режима плавки. На поверхности откосов присутствие в шихте твердого конвертерного шлака приводит к снижению температуры плавления образующегося шлака за счет снижения степени его кислотности. Следствием этого является увеличение плотности результирующего теплового потока на поверхности откосов и соответственно коэффициента использования топлива в отражательной печи. Далее конвертерный шлак вместе с остальными продуктами плавки стекает на поверхность ванны, вблизи которой более интенсивно идут процессы потребления тепла, подводимого за счет теплопроводности (уменьшается значение коэффициента k_i). В этом случае, как показывает анализ уравнения (31-8'), увеличивается скорость тепловой обработки продуктов плавки и уменьшаются потери металла с отвальными шлаками.

2. Из формулы (31-8') следует, что скорость тепловой обработки материала в ванне тем выше, чем меньше потери тепла через кладку на уровне ванны. Поэтому при строительстве отражательных печей всегда применяют подины с повышенной теплоизоляцией, а толщина стен на уровне ванны в 3—3,5 раза больше, чем над ванной.

3. Глубина шлаковой ванны при заданном температурном режиме может быть определена из уравнения (31-7) и рассчитывается по формуле

$$\delta = \frac{\lambda_{ш} (T_0 - T_\delta)}{G_y^B \left[\sum_{i=1}^n k_i \int_0^\delta Q_i(x) dx - nc_{шт} (T_{ср.ш} - T_{ср.шт}) \right]}$$

Из полученной зависимости следует, что глубина шлаковой ванны не может быть установлена произвольно, так как она зависит

от свойств перерабатываемой шихты и состава продуктов плавки. Ее величина тем больше, чем меньше теплотребление шихты в ванне. В современных отражательных печах глубина шлаковой ванны колеблется в пределах 0,6—0,8 м.

4. Связь между параметрами теплового и температурного режимов ванны шлакового расплава, расположенной между шихтовыми откосами, может быть установлена с помощью уравнения теплового баланса, которое имеет вид

$$G^{\circ} = (kq_{\text{ш}}^{\circ} - q'_{\text{пот}}) F_{\text{в}} / Q_{\text{ш}}^{\circ}, \quad (31-9)$$

где $F_{\text{в}}$ — поверхность ванны, м^2 ; $q'_{\text{пот}}$ — плотность теплового потока теплопроводностью (потери тепла) через ограждение печи на уровне ванны, отнесенная к единице ее поверхности; G° — средняя по массе скорость переработки материала в ванне, кг/с .

При соответствии параметров теплового режима ванны и откосов скорости тепловой обработки шихтовых материалов на этих участках зоны технологического процесса должны быть равны между собой, т. е. $G^{\circ} = G^{\text{в}}$. Для выполнения этого требования необходимо, чтобы на всем протяжении зоны плавления шихты плотности результирующих тепловых потоков для поверхностей откосов и ванны оставались неизменными, т. е. чтобы средняя температура продуктов сгорания топлива была одинакова на расстоянии примерно 20—25 м от передней торцевой стенки печи. При традиционном торцевом отоплении печи выполнить это условие довольно трудно и поэтому в последнее время наметилась тенденция к применению сводового отопления.

Зона отстаивания продуктов плавки. Этот участок ванны расположен в хвостовой части печи и в нем происходит завершение процессов разделения продуктов плавки. Средняя температура шлака в нем на 70—100 °С ниже, чем в зоне плавления, что способствует повышению извлечения меди в штейн за счет снижения степени растворимости штейна в шлаке. При охлаждении шлака штейн выделяется из него в виде мельчайших капель, для отстаивания которых требуется продолжительное время. Так как время пребывания шлака в отстойной зоне прямо пропорционально количеству содержащегося в ней материала, под нее отводится обычно около одной третьей части рабочего пространства печи.

3. Печи для рафинирования меди

Основные характеристики и конструкция

К пламенным плавильным печам для рафинирования меди относятся в основном стационарные анодные и вайербарсовы печи, которые различаются в зависимости от емкости, состава перерабатываемой шихты и применяемого топлива. Техническая характеристика этих агрегатов приведена в табл. 31-2.

Таблица 31-2. Техническая характеристика анодных и вайербарсовых печей

Параметры	Характеристика печей емкостью, т				
	350	200	150	80	50
Размеры ванны, м:					
глубина	0,94	0,76	0,69	0,75	0,45
длина	14,6	13,8	16,8	7,9	4,8
ширина	4,5	4,8	2,5	2,7	2,7
Число горелочных устройств, шт.	3	2	2	2	2
Продолжительность плавки, ч	24	12	18	18	16
Содержание твердого в загрузке, %	100	15	90	100	100

Примечание. Печи емкостью 350 т анодные и вайербарсовые, остальные — анодные.

В анодных печах можно перерабатывать как первичную так и вторичную черновую медь. Первая получается из руд и концентратов, вторая при переплавке вторичных металлов. В первичной черновой меди количество примесей, к которым относятся мышьяк, сурьма, свинец, олово, сера, железо и т. п., составляет от десятых долей до одного процента; во вторичной 2—4 %.

Загружаемый материал может подаваться в печь как в твердом, так и в жидком состоянии. Соотношение между твердой и жидкой фазами зависит от условий конкретного производства. Когда загрузка целиком состоит из расплавленной черновой меди для анодной плавки, используют печи типа конвертера, которые не могут быть отнесены к плавильным агрегатам. В вайербарсовых печах переплавляется катодная медь повышенной чистоты (99,90—99,99 % Cu). Однако в ней содержатся растворенные газы: оксид углерода, водород, сернистый ангидрид в количестве ~80 см³/кг металла, которые удаляются в процессе плавки.

Технологический процесс, осуществляемый в рафинировочных печах, протекает в четыре стадии, которые включают в себя: загрузку и плавление металла, окисление содержащихся в нем нежелательных примесей кислородом воздуха, восстановление переокисленной меди и разливку металла в изложницы. К недостаткам анодных и вайербарсовых печей можно отнести: повышенный удельный расход топлива; низкий коэффициент использования вспомогательного оборудования (механизмы для загрузки металла и разливочные машины), обусловленный периодичностью процесса; применение ручного труда (съемка шлака, загрузка шихты и т. п.). Основным направлением в совершенствовании конструкций анодных печей следует считать создание агрегатов подового типа с непрерывным режимом работы. Для переплавки катодов в последнее время все чаще применяют шахтные печи, а также индукционные, дуговые и вакуумные электропечи,

в которых получается металл, обладающий высокими механическими свойствами и имеющий электропроводность на 4—5 % выше обычной вайербарсовой меди.

Конструкция стационарной отражательной печи для рафинирования меди. Общий вид печи представлен на рис. 31-3. Ее возводят на мощном фундаменте, выполненном из бетона в виде монолитной плиты с наклонной поверхностью корытообразной формы, на которой установлены опорные столбики из шамотного кирпича сечением

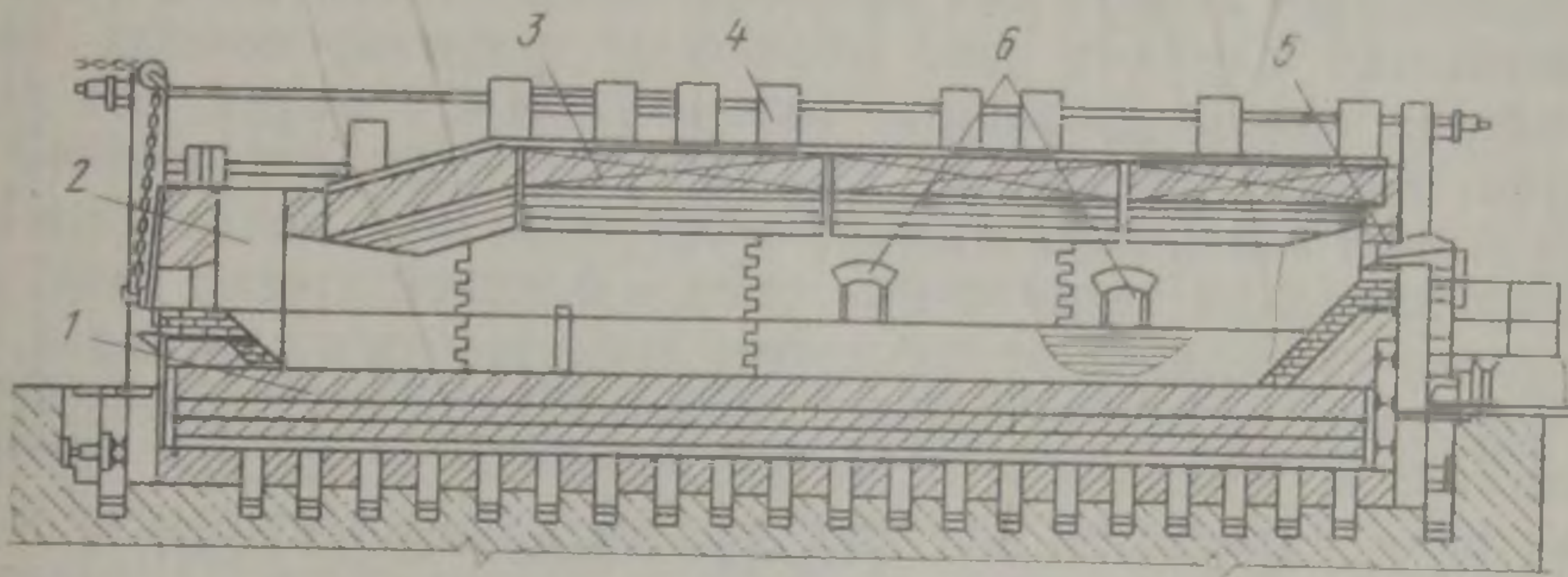


Рис. 31-3. Общий вид анодной печи:

1 — подина; 2 — вертикальный газоход; 3 — свод; 4 — каркас; 5 — горелочные устройства; 6 — загрузочные окна

700 × 700 мм и высотой от 0,5 до 1,0 м. Опорные столбики и уклон фундамента предназначены для того, чтобы обеспечить беспрепятственный сток металла в аварийной ситуации при его прорыве через подину, а также для создания условий эффективного охлаждения элементов металлического каркаса печи (поперечных тяг) за счет естественной циркуляции воздуха. На опорные столбики укладывают чугунную плиту толщиной ~25—50 мм, которая служит основанием подины.

Под печи выполняют в виде трехслойной обратной арки, имеющей уклон в сторону летки для выпуска металла. Между чугунной плитой и подом располагается прослойка из жаропрочного бетона. Нижний слой арки выкладывают из шамотного кирпича. Материал последующих слоев зависит от состава ванны. Для кислых ванн используют диасовые огнеупоры, для основных — хромомагнетитовые, магнезитохромитовые или периклазошпинелидные.

Стены печи возводят преимущественно из хромомагнетитового и магнезитохромитового огнеупорного кирпича. Для теплоизоляции стен используют шамот-легковес. Свод большегрузных печей имеет распорно-подвесное или подвесное исполнение, обычно он изготавливается из магнезитохромитового огнеупорного кирпича и имеет толщину 380 мм. В хвостовой части печи к своду примыкает вертикальный боров, который служит для отвода продуктов сгорания топлива.

Снаружи печь заключена в стоечный каркас подвижного типа. Для придания прочности конструкции печи на уровне ванны ее нижняя часть забрана в металлический кожух, который выполняют в двух вариантах: составным из чугунных плит или цельносварным из листового железа толщиной ~ 25 мм.

Рафинировочные печи в основном отапливают природным газом, реже используют газо-мазутное отопление. Устройства для сжигания газа устанавливают в специальных отверстиях, расположенных в передней торцевой стенке печи, к которой со стороны печи примыкает камера для предварительного сжигания топлива. В отдельных случаях для отопления рафинировочных печей используют комбинированные газо-мазутные горелки. На большинстве заводов применяют горелки типа «труба в трубе».

Шихтовые материалы и жидкая черновая медь подаются в печь через специальные загрузочные окна в боковой стенке печи, размеры которых зависят от габаритов загружаемых слитков и способа загрузки. Обычно ширина рабочих окон составляет 1,5 м, высота 1,0 м. Шлаковое окно расположено в задней торцевой стенке печи. Отверстие для выпуска металла имеет форму щели, высота которой соответствует уровню ванны. Оно расположено в боковой стенке печи и заделано специальной набивочной массой. Снаружи щель закладывают съемными чугунными плитами. При выпуске металла плиты и набивную массу из выпускной щели удаляют постепенно по мере понижения уровня ванны. Внутренние размеры щели зависят от емкости и назначения печи. Отношение длины ванны к ее ширине составляет величину порядка $3,5 \div 2$.

Для утилизации тепла отходящих газов рафинировочных печей используют в основном радиационно-конвективные рекуператоры, в которых осуществляется подогрев дутьевого воздуха до $500\text{—}550$ °С независимо от периода плавки. Применение рекуператоров позволяет на одной печи получить экономию топлива за счет нагрева дутья до $4\text{—}5$ млн. м³ в год.

Тепловой и температурный режимы работы

Расплавление загружаемого в печь материала по существу производится в ванне металла, которая наводится на подине печи в самом начале процесса. Это необходимо для предотвращения механических повреждений подины, неизбежных при загрузке на ее поверхность крупных слитков черновой меди. Поэтому в анодных печах процесс начинается с заливки в агрегат черновой меди непосредственно из конвертеров. В этом случае, когда шихта полностью состоит из твердого материала, на под печи сначала загружают анодные остатки и мелкий скрап, которые образуют ванну, и только потом осуществляют загрузку крупногабаритных слитков черновой меди. По ее окончании загрузочные окна закрывают и начинается процесс интенсивного плавления металла.

В условиях анодной и вайербарсовой плавок ванна расплава и находящиеся в ней слитки и скрап, имеющие высокую теплопроводность, представляет собой тонкое в тепловом отношении тело, нагрев и плавление которого определяют условиями внешней задачи, т. е. интенсивностью процессов теплообмена в рабочей камере печи над ванной. Теплообмен излучением в печах периодического действия рассчитывают по формулам:

$$q_{\omega}^{\text{м}} = C_{\circ} \left\{ A \left[\left(\frac{T_{\text{г}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{м}}}{100} \right)^4 \right] + B \left[\left(\frac{T_{\text{к}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{м}}}{100} \right)^4 \right] \right\}, \quad (31-10)$$

$$q_{\omega}^{\text{к}} = C_{\circ} \left\{ D \left[\left(\frac{T_{\text{г}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{к}}}{100} \right)^4 \right] - \frac{B}{\omega} \left[\left(\frac{T_{\text{к}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{м}}}{100} \right)^4 \right] \right\}, \quad (31-11)$$

где $q_{\omega}^{\text{м}}$, $q_{\omega}^{\text{к}}$ — соответственно плотности результирующих тепловых потоков для поверхностей ванны (металла) и кладки печи:

$$A = \frac{\epsilon_{\text{г}} \epsilon_{\text{м}} \left[1 + (1 - \epsilon_{\text{г}}) (1 - \epsilon_{\text{к}}) \frac{1}{\omega} \right]}{M}, \quad B = \frac{\epsilon_{\text{м}} \epsilon_{\text{к}} (1 - \epsilon_{\text{к}})}{M},$$

$$D = \frac{\epsilon_{\text{г}} \epsilon_{\text{к}} \left[1 + (1 - \epsilon_{\text{г}}) (1 - \epsilon_{\text{г}}) \frac{1}{\omega} \right]}{M},$$

$$M = 1 - (1 - \epsilon_{\text{г}}) (1 - \epsilon_{\text{к}}) \left(1 - \frac{1}{\omega} \right) - (1 - \epsilon_{\text{г}})^2 (1 - \epsilon_{\text{м}}) (1 - \epsilon_{\text{к}}) \frac{1}{\omega};$$

$T_{\text{г}}$, $T_{\text{м}}$, $T_{\text{к}}$ — соответственно средние температуры газов (пламени), поверхностей зеркала ванны и кладки; $\epsilon_{\text{г}}$, $\epsilon_{\text{м}}$, $\epsilon_{\text{к}}$ — соответственно степени черноты газов (пламени) поверхностей ванны и кладки; $\omega = F_{\text{к}}/F_{\text{м}}$ — степень развития кладки; $F_{\text{м}}$, $F_{\text{к}}$ — соответственно величины поверхностей ванны и кладки.

Продолжительность периода плавления металла зависит от скорости подвода тепла к поверхности ванны, необходимого для компенсации тепловых затрат на нагрев и плавление шихты ($Q_{\text{ш}}$), величину которых рассчитывают по формуле

$$Q_{\text{ш}} = M_{\text{т}} [c_{\text{т}} (T_{\text{пл}} - T_{\text{т}}^{\text{н}}) + c_{\text{ж}} (T_{\text{ж}}^{\text{к}} - T_{\text{пл}}) + q_{\text{пл}}] + M_{\text{ж}} c_{\text{ж}} (T_{\text{ж}}^{\text{н}} - T_{\text{ж}}^{\text{к}}), \quad (31-12)$$

где $M_{\text{т}}$, $M_{\text{ж}}$ — соответственно масса металла, загружаемого в печь в твердом и жидком состоянии; $T_{\text{т}}$, $T_{\text{ж}}$ — соответственно температуры твердого и жидкого металла, буквы «н», и «к» указывают, что значения температуры берется в начальный и конечный моменты периода; $c_{\text{т}}$; $c_{\text{ж}}$ — удельные теплоемкости соответ-

ственно твердого и жидкого металла; $q_{пл}$ — скрытая теплота плавления металла.

При расчете продолжительности первого периода плавки t_1 обычно используют уравнение теплового баланса ванны, которое имеет вид

$$t_1 = Q_{ш} / (kq_{ш}^M F_M - q_{пот}^n F_n - q_{пот}^{ст} F_{ст}), \quad (31-13)$$

где k — коэффициент, учитывающий конвективную составляющую плотности суммарного теплового потока излучения и конвекции, усваиваемого ванной, $k = 1,1 \div 1,15$; $q_{пот}^n$, $q_{пот}^{ст}$ — соответственно плотность потока тепла, теряемого теплопроводностью через под и стены печи на уровне ванны; F_n , $F_{ст}$ — соответственно площади поверхности пода и стен печи на уровне ванны.

Величина, стоящая в знаменателе уравнения (31-13), представляет собой количество тепла, которое расходуется в ванне на нагрев и плавление металла в единицу времени. Продолжительность первого периода плавки при прочих равных условиях зависит от емкости печи и составляет в среднем 8—12 ч, из них 2—3 ч занимает загрузка, 6—8 ч — процесс плавления и $\sim 0,5$ ч удаление шлака. Температура поверхности ванны во время расплавления черновой меди близка к ее температуре плавления и равна 1090—1100 °С. В конце периода температура расплава поднимается до 1150 °С. Дальнейшее ее повышение нецелесообразно, так как перегретый металл может привариться к материалу изложницы во время разлива. Средняя температура газов (пламени) в течение всего поддерживается на уровне 1450—1600 °С.

Для сокращения продолжительности процесса плавления используются различные способы интенсификации лучистого теплообмена в рабочей камере печи. К ним в первую очередь относится повышение средней температуры газов (факела) и степени черноты поверхностей, участвующих в теплообмене.

Повышение температуры продуктов сгорания топлива достигается за счет подогрева воздушного дутья до 500—550 °С и увеличения расхода топлива, который в первом периоде существенно выше (в 1,5—2,5 раза), чем в остальные периоды плавки. Для улучшения оптических характеристик ванны шлак, образующийся при окислении примесей (во второй период), не удаляют из печи, а оставляют на следующий цикл (после разлива меди он оседает на подине). В период плавления, после образования ванны, шлак предыдущей плавки всплывает на ее поверхность и удаляется только после окончания периода. Таким образом, в течение всего процесса ванна расплава покрыта пленкой шлака, степень черноты которого (0,5—0,6) в 3—4 раза выше степени черноты расплавленной меди (0,14—0,16). При газовом отоплении используют горелки с внешним смещением, позволяющие получать хорошо видимое пламя ($\epsilon_r \approx 0,5$). Из уравнения (31-13) следует также, что при прочих равных условиях продолжитель-

ность периода плавления во многом зависит от величины потерь тепла через ограждение печи на уровне ванны. Поэтому при конструировании печей предпочтение отдается «теплым» подинами и тщательной теплоизоляции стен печи на уровне ванны.

Продолжительность второго и третьего периодов плавки зависит от скорости протекания реакций, обусловленных заданной технологией. В период окисления, который продолжается 1,5—2,0 ч, тепло в ванну поступает в виде суммарного теплового потока излучения и конвекции на ее тепловоспринимающей поверхности, а также за счет теплогенерации при протекании экзотермических реакций окисления примесей и основного металла. Эта энергия расходуется на компенсацию потерь тепла через ограждение печи на уровне ванны и на нагрев воздуха, вдуваемого в ванну, до средней температуры расплава. Температура газов (пламени) в рабочей камере печи поддерживается на таком уровне, чтобы металл не перегревался выше 1150 °С. Ее величину определяют следующим образом. Из уравнения теплового баланса ванны находят значение плотности результирующего теплового потока для поверхности ванны, которое рассчитывают по формуле

$$q_w^m = \frac{V_b c_b (T_b^k - T_b^n) - Q_{\text{экз}}}{t_{II} F_M k} + q_{\text{пот}}^n \frac{F_{II}}{F_M k} + q_{\text{пот}}^{\text{ст}} \frac{F_{\text{ст}}}{F_M k}, \quad (31-14)$$

где V_b, c_b, T_b^n — соответственно объем, удельная теплоемкость и начальная температура воздуха, идущего на окисление примесей; $Q_{\text{экз}}$ — суммарный эффект экзотермических реакций; t_{II} — продолжительность второго периода.

Полученное значение q_w^m — подставляют в уравнение (31-10), которое решают относительно средней температуры газа в рабочем пространстве печи.

В третий период плавки, который продолжается 2,5—3 ч, в ванне протекают эндотермические реакции восстановления Si_2O , образующегося на стадии окисления примесей. В качестве восстановителя наибольшее распространение получил природный газ, удельный расход которого составляет около 5,4 м³ на тонну металла. Тепло, поступающее в ванну, расходуется на нагрев газообразного восстановителя, протекание эндотермических реакций и компенсацию потерь тепла через ограждение печи на уровне ванны. Плотность результирующего теплового потока для поверхности ванны в этот период определяют по формуле

$$q_w^m = \frac{V_r c_r (T_r^k - T_r^n) + Q_{\text{энд}}}{t_{III} F_M k} + q_{\text{пот}}^n \frac{F_{II}}{F_M k} + q_{\text{пот}}^{\text{ст}} \frac{F_{\text{ст}}}{F_M k},$$

где V_r, c_r, T_r^n — соответственно объем, удельная теплоемкость и начальная температура газообразного восстановителя, t_{III} — продолжительность третьего периода; $Q_{\text{энд}}$ — суммарный эффект эндотермических реакций.

В четвертый период происходит разливка металла, его продолжительность определяется производительностью разливочной машины и составляет 5—8 ч. Ванна расплава имеет в течение всего периода постоянную температуру ($\sim 1150^\circ\text{C}$) и тепло, поступающее на ее поверхность, расходуется на компенсацию тепловых потерь через ограждение печи. Плотность результирующего теплового потока для поверхности ванны определяют по формуле

$$q_w^m = q_{\text{пот}}^n \frac{F_n}{F_{mk}} + q_{\text{пот}}^{\text{ст}} \frac{F_{\text{ст}}}{F_{mk}}.$$

Основной задачей при организации теплового и температурного режимов в рафинировочных печах является создание условий для ускоренного расплавления металла в первый период процесса и обеспечение минимальных колебаний температуры в ванне в остальные периоды плавки.

Глава 32

ТРУБЧАТЫЕ ВРАЩАЮЩИЕСЯ И НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ

1. Основные характеристики и конструкция вращающихся печей

Трубчатыми вращающимися печами принято называть технологические агрегаты непрерывного действия с рабочим пространством в виде полого цилиндра, в котором вследствие небольшого наклона ($\sim 3^\circ$) печи и вращения перерабатываемые сыпучие материалы перемещаются вдоль печи, нагреваясь за счет тепла, выделившегося при сжигании топлива. В конструктивном отношении они отличаются друг от друга только размерами корпуса и устройством систем загрузки и выгрузки материала. В названии печи обычно отражено ее назначение. Так, например, различают вельц-печи, применяемые для вельцевания кеков цинкового производства, печи для спекания бокситов, кальцинации глинозема, обжига ртутьсодержащих материалов, а также печи для сушки различных промежуточных продуктов металлургического производства.

По энергетическому признаку трубчатые вращающиеся печи относятся к печам-теплообменникам с переменным по длине режимом тепловой работы. На участке печи, где происходит горение топлива и температура продуктов сгорания достигает $1550\text{—}1650^\circ\text{C}$, осуществляется радиационный режим работы печи. По мере продвижения продуктов сгорания топлива по длине печи они охлаждаются до нескольких сот градусов и режим тепловой работы печи постепенно становится конвективным. Конкретное

распределение по печи зон с конвективным и радиационным режимом работы зависит от вида и параметров технологического процесса.

За исключением получивших небольшое распространение печей для сушки сульфидного сырья, трубчатые печи работают в режиме противотока. Загружаемая в печь шихта может иметь различную степень влажности, вплоть до пульпы, содержащей до 40 % воды. Она подается в верхнюю (хвостовую) часть печи и медленно движется навстречу газам, образующимся в результате сгорания топлива в головной части агрегата. Из барабана перерабатываемые продукты в виде спека или раскаленного порошкообразного материала поступают в специальный холодильник, а газообразные продукты сгорания топлива вместе с технологическими газами направляются в систему пылегазоочистки. В зависимости от вида технологического процесса для отопления трубчатых вращающихся печей могут быть использованы: природный газ, мазут и твердое топливо в виде коксовой мелочи или угольной пыли. В качестве сжигающих устройств в трубчатых печах обычно применяют газовые горелки типа «труба в трубе», форсунки для сжигания малосернистого мазута или специальные пылеугольные горелки.

Основными элементами вращающейся печи (рис. 32-1) являются корпус (барабан), приводной механизм, опорные бандажы с роликами, а также загрузочная и разгрузочная камеры.

Корпус печи представляет собой сварную металлическую трубу диаметром до 5 м и длиной до 185 м, футерованную изнутри огнеупорным кирпичом. Он опирается на специальные ролики, ширина пролета между которыми составляет для больших печей 26—28 м. Для перемещения материала корпус наклонен к горизонту под углом в 2,5—3°. Привод печи, с помощью которого она вращается с частотой около 1 об/мин, состоит из электродвигателя, редуктора и зубчатой передачи.

Опорные бандажы кольцевой формы воспринимают на себя всю нагрузку от веса барабана, достигающую 70—80 т. Для больших печей применяют кованные бандажы прямоугольного сечения, которые надевают на корпус свободно, с небольшим зазором, учитывая последующее тепловое расширение барабана. Каждый бандаж опирается на два ролика, вращающиеся вместе с бандажом во время работы печи.

Верхний торец печи входит в загрузочную камеру. Сухую шихту загружают в печь с помощью шнекового питателя через патрубков, расположенный в загрузочной камере. Пульпа подается в печь через пульповую трубу ковшом-дозатором или с помощью специальной форсунки. Улавливаемая пыль возвращается в барабан печи так же, как сухая шихта.

Нижний торец печи входит в разгрузочную камеру. Между ней и барабаном ставится специальное кольцевое уплотнение. В передней стенке камеры имеются отверстия для установки горе-

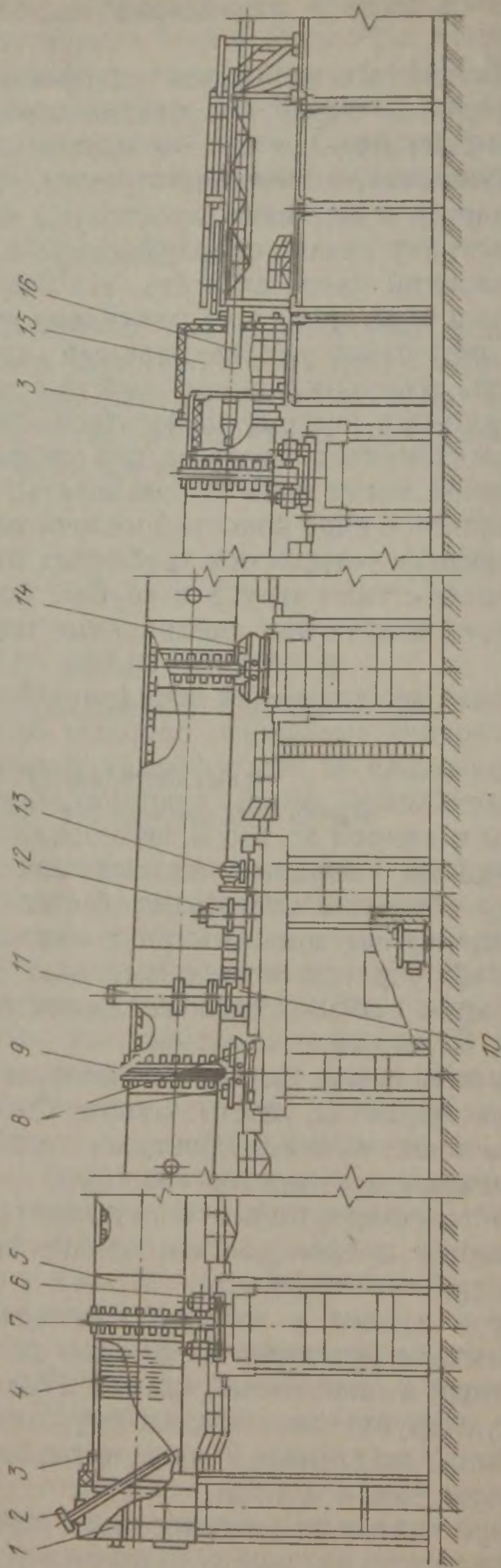


Рис. 32-1. Общий вид вращающейся трубчатой печи:

1, 15 — верхняя и нижняя головки печи; 2 — загрузочное устройство; 3 — цепное устройство; 4 — зубчатая передача; 5 — барабан; 6 — подшипник; 7 — опорный ролик; 8 — опорный ролик; 9 — опорный ролик; 10, 11 — бандаж; 12 — зубчатая передача; 13 — редуктор; 14 — упорное устройство; 16 — форсунка

лочных устройств. К ней также примыкает устье канала, по которому готовый продукт пересыпается в холодильник.

Для предотвращения налипания влажной шихты на стенки барабана и насталеобразования в холодном конце печи устанавливают цепные завесы. Их прикрепляют к барабану одним концом по всему сечению печи, выбирая длину зоны таким образом, чтобы температура газов в ней не превышала 700°C . При отсутствии завес может быть использовано отбойное устройство, представляющее собой связки рельсов длиной до 12 м, прикрепленные цепью к торцевой головке печи.

Футеровка вращающихся печей работает в весьма тяжелых условиях, что связано с периодическим колебанием температур на поверхности кладки, обусловленным вращением печи и перемещением находящегося в ней материала. Перепады температур на внутренней поверхности барабана при входе и выходе из-под слоя шихты составляют $150\text{--}200^{\circ}\text{C}$. В зоне спекания на футеровку сильное химическое и абразивное воздействие оказывает материал. В зоне сушки кладка подвергается значительному истиранию цепями. Основным материалом для футеровки печей глиноземных заводов служит шамот. Высокотемпературные зоны печи выкладывают из хромомagneзитового, магнезитового и периклазошпинелидного огнеупорного кирпича. Для сохранения футеровки при остановках печи барабан должен вращаться до ее полного охлаждения. Продолжительность работы печи обычно составляет 2—4 года.

2. Тепловой и температурный режимы работы вращающихся печей

При нагреве нейтральных в энергетическом отношении сыпучих материалов тепло в зону технологического процесса трубчатых вращающихся печей поступает за счет одновременного протекания всех трех видов теплообмена: излучением от факела и раскаленной футеровки, конвекцией и теплопроводностью от поверхности кладки, по которой непрерывно перемещается перерабатываемый материал. Помимо этого необходимо учитывать, что в шихту печей для вельцевания кеков вводится в качестве реагента-восстановителя коксовая мелочь. В результате часть используемой на ее нагрев тепловой энергии генерируется непосредственно в зоне технологического процесса во время частичного окисления углерода и образующихся в результате переработки шихты паров металлического цинка.

Поступившее в слой перемещающегося по печи материала тепло распределяется в нем в основном за счет контактной теплопроводности. Однако в процессе энергичного перемешивания шихты, температура по слою быстро выравнивается и его можно принять тонким в тепловом отношении телом, нагрев которого сопровождается многочисленными эндо- и экзотермическими реак-

циями. Ввиду большой сложности и недостаточной изученности механизма теплообменных процессов в трубчатых печах, анализ их тепловой работы базируется в основном на изучении эмпирических данных и оценке тепловых балансов печей.

Температурный режим работы вращающихся печей не изменяется во времени, индивидуален для каждого вида технологического процесса и в значительной степени определяется химическим и фракционным составами перерабатываемых материалов. Обычно его выбирают опытным путем и организуют таким образом, чтобы в печи строго соблюдался график нагрева шихты, задаваемый по технологическим данным.

В качестве примера может быть рассмотрен режим достаточно хорошо изученных печей, применяемых для спекания шихты на глиноземных заводах. В них до температур порядка 550°C происходят общие для всех вращающихся печей процессы сушки и удаление гидратной влаги и далее в интервале температур $550\text{—}1200^{\circ}\text{C}$ — реакции образования растворимых соединений алюминия, свойства которых во многом зависят от температурного режима спекания. В процессе нагрева шихта проходит в печи четыре условно выделенные температурные зоны, постепенно превращаясь в спек.

В первой зоне, длина которой составляет около 30 м, происходит нагрев материала от 20 до 300°C , сопровождающийся его сушкой и обезвоживанием. Температура газов на этом участке печи, если его рассматривать по ходу движения шихты, изменяется соответственно от 200 до 700°C . Длина второй зоны достигает $15\text{—}17$ м. В ней материалы нагреваются до 900°C при полном разложении карбоната кальция и изменении температур топочных газов по длине зоны от 700 до 1400°C . Третья зона расположена в области интенсивного горения топлива (факела). Температура газов здесь максимальна и определяется величиной $1600\text{—}1650^{\circ}\text{C}$. Шихта в этой зоне нагревается до $1200\text{—}1250^{\circ}\text{C}$ и спекается. В четвертой зоне происходит охлаждение спека до 1100°C при температуре газов $1000\text{—}1550^{\circ}\text{C}$.

При неизменном во времени температурном режиме работы печи ее производительность определяется толщиной слоя и физико-химическими свойствами находящегося в ней материала. В среднем по отрасли она составляет величину порядка 12 т/ч спека при расходе $6300\text{—}7300$ кДж/кг получаемого продукта. В отличие от спекания технологические процессы, протекающие в других трубчатых печах, идут без оплавления шихты.

3. Нагревательные печи

В цветной металлургии нагрев в топливных печах с последующей обработкой давлением применяется в большинстве случаев для слитков и заготовок из меди, алюминия и сплавов на их основе. Чаще всего для этой цели на обрабатывающих заводах исполь-

зуют двухзонные методические печи с нижним обогревом (рис. 32-2).

Печи такого типа работают следующим образом. Слитки загружаются в печь с помощью толкателя через торцевое загрузочное

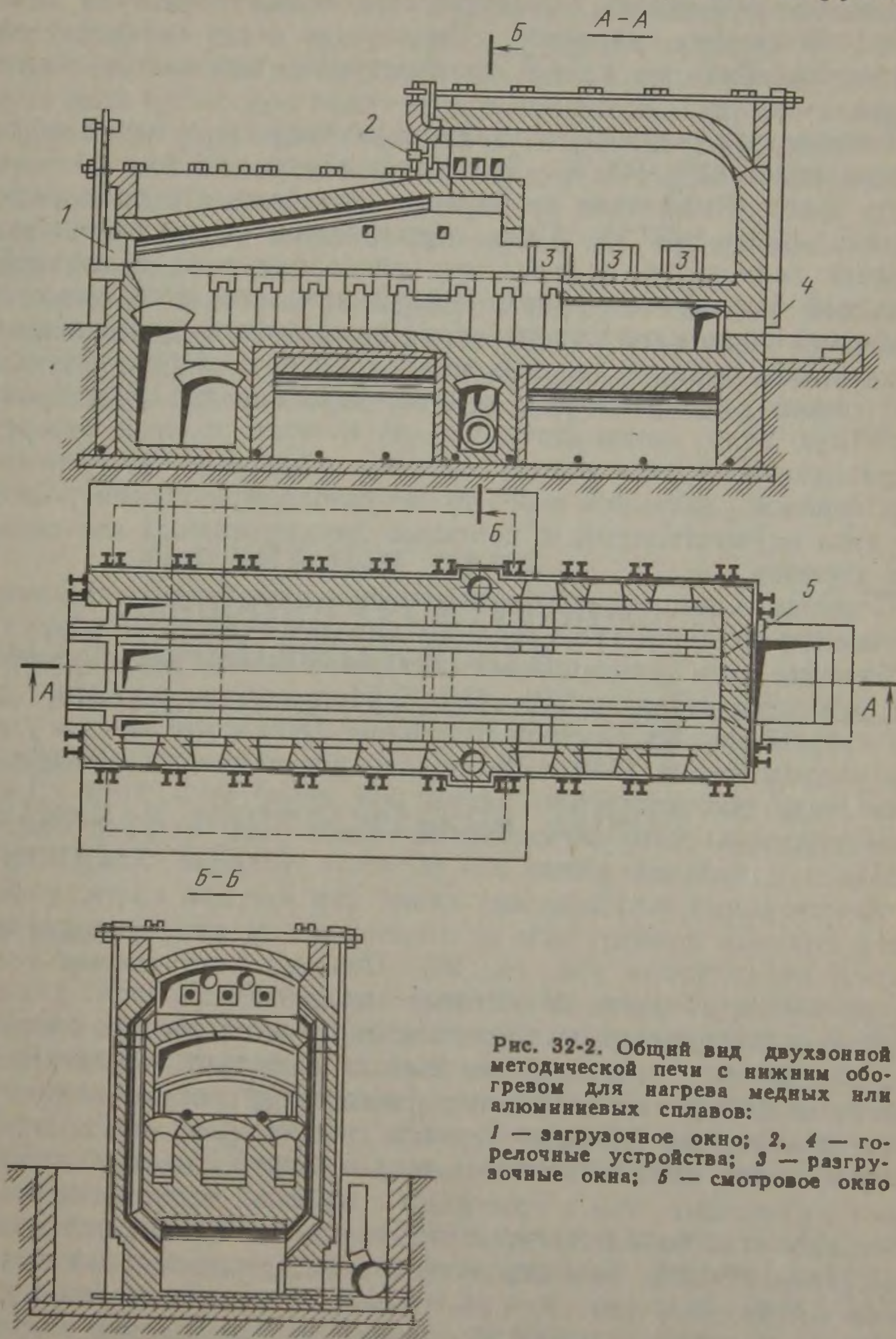


Рис. 32-2. Общий вид двухзонной методической печи с нижним обогревом для нагрева медных или алюминиевых сплавов:

1 — загрузочное окно; 2, 4 — горелочные устройства; 3 — разгрузочные окна; 5 — смотровое окно

окно 1 и далее передвигаются по направляющим брускам из жаропрочной стали к окнам выдачи 3, через которые удаляются из печи специальным выталкивателем. После боковой выдачи

нагретых заготовок все слитки одновременно передвигаются и в печь проталкивается новая заготовка. Металл сначала поступает в зону наиболее низких температур и, продвигаясь навстречу продуктам сгорания топлива, температура которых повышается, постепенно нагреваясь, перемещается в зону высоких температур, именуемую сварочной. Первая (по ходу металла) зона с изменяющейся по длине температурой называется методической.

Температура нагрева металла в методических печах обычно не превышает 850—900 °С. Для нагрева металла до этих температур в сварочной зоне необходимо поддерживать температуру порядка 1000—1050 °С. Печь отапливается природным газом, который подводится к горелкам, расположенным в верхней 2 и нижней 4 сварочных зонах. Иногда для того, чтобы рассредоточить тепловую нагрузку по длине печи горелки устанавливают в шахматном порядке вдоль боковых стен печи. Продукты сгорания топлива, подаваемого в верхние горелки, проходят сначала сварочную зону, затем методическую и через подовые отверстия направляются в газоходную систему. Дымовые газы нижнего ряда горелок удаляются через ту же газоходную систему. Сжигание газа осуществляется с помощью двухпроводных инжекционных горелок.

С целью повышения эффективности использования топлива и улучшения условий его сгорания методические печи оборудуют трубчатыми или игольчатыми металлическими рекуператорами для подогрева дутья до 250—400 °С. Напряжение активного пода при нагреве медных слитков составляет 1600 кг/(м².ч) при удельном расходе тепла 1540 кДж/кг; для алюминиевых слитков эти показатели соответственно равны 500 кг/(м².ч) и 2160 кДж/кг. Производительность методических печей для нагрева цветных металлов и сплавов равна 25—30 т/ч.

Конструкции методических печей для нагрева цветных металлов и сплавов практически не отличаются от аналогичных печей черной металлургии (см. гл. 28). Поэтому остановимся только на особенностях нагрева цветных металлов.

Слитки и заготовки из меди, алюминия и сплавов на их основе по сравнению с черными металлами обладают исключительно высокими коэффициентами теплопроводности и относительно низкими значениями степени черноты нагреваемых поверхностей. Помимо этого слитки из цветных металлов отличаются небольшими габаритами, что в сочетании с высокой теплопроводностью позволяет отнести их к категории тонких в тепловом отношении тел. Нагрев таких слитков может осуществляться значительно более интенсивно, чем изделий из черных металлов, так как отсутствует реальная опасность возникновения высоких термонапряжений, вызываемых большими перепадами температур между центром и поверхностью нагреваемых материалов. Вместе с тем необходимо учитывать, что цветные металлы отличаются повы-

шенной склонностью к окислению, и не допускать, чтобы газовая атмосфера в печи содержала более 0,1 % кислорода.

Технология нагрева цветных металлов и сплавов содержит также ряд специфических требований. Например, при нагреве сплавов на основе алюминия отклонение от заданного режима нагрева допускается в очень узких пределах порядка 5—10 °С. При нагреве слитков из латуни и других медноцинковых сплавов должна быть полностью исключена возможность соприкосновения нагреваемой поверхности с пламенем и местные перегревы из-за склонности цинка к активному «выгоранию». Недопустимо также насыщение нагреваемой меди водородом, так как это ведет к повышению хрупкости металла вследствие так называемой «водородной болезни» меди.

Невысокие конечные температуры нагрева цветных металлов и их сравнительно низкая поглощательная способность являются основной причиной необходимости интенсификации конвективного теплообмена в рабочем пространстве нагревательных печей.

ТОПЛИВНЫЕ ПЕЧИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ Раздел IX ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Глава 33

ВАГРАНКИ И НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ КУЗНЕЧНЫХ ЦЕХОВ

1. Вагранки

Вагранки предназначены для переплава доменного литейного чушкового чугуна и чугунного лома в чугунолитейных цехах. При плавке в качестве шихтовых материалов в незначительных количествах также применяют стальной лом и ферросплавы. Топливом чаще всего служит кокс. Флюсы (известняк, плавиковый шпат, доломит) вводят в виде добавок к шихте для образования легкоплавкого шлака.

Вагранка представляет собой цилиндрическую шахту, состоящую из стального кожуха, футерованного внутри огнеупорным кирпичом толщиной 0,15—0,3 м и засыпкой (рис. 33-1). В верхней части вагранки имеется загрузочное окно, через которое подаются внутрь печи шихтовые материалы. В нижней части вагранки расположены воздушная коробка и фурмы, через которые воздух подается в шахту вагранки от воздуходувной ма-

шины. Внизу шахта закрывается откидным днищем, на которое набивается из огнеупорного порошка подина. Часть шахты между фурмами и подиной называется горном.

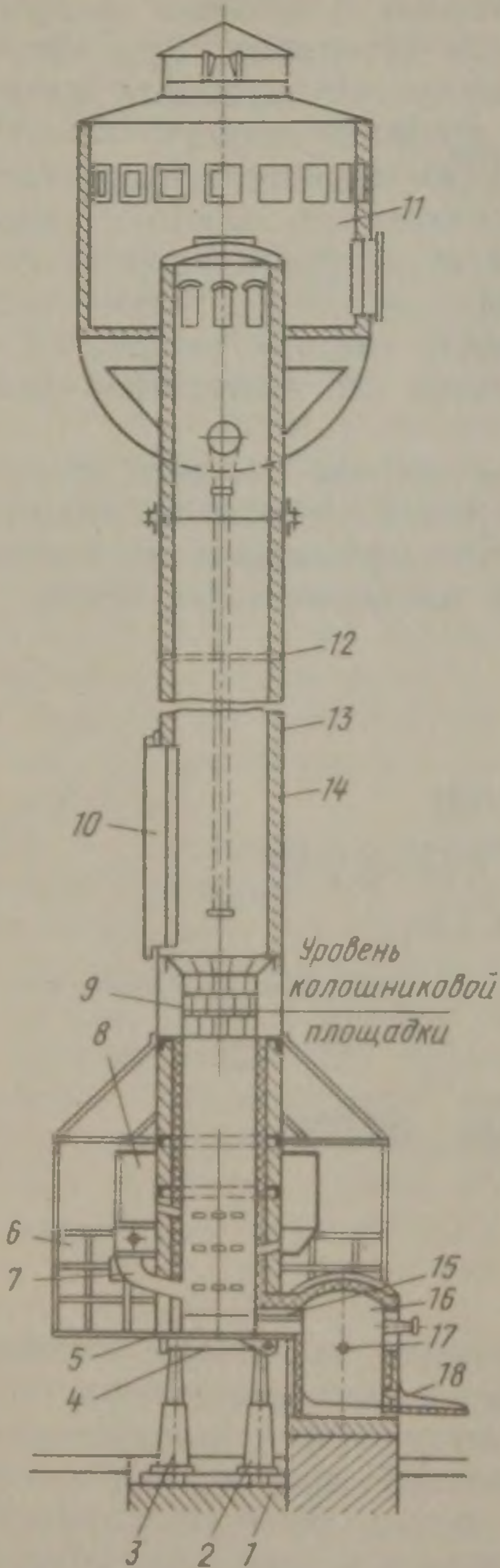


Рис. 33-1. Вагранка с копильником:
 1 — фундамент; 2 — фундаментная плита; 3 — колонны; 4 — откидное днище; 5 — подовая плита; 6 — рабочая площадка; 7 — фурменный рукав; 8 — воздушная коробка; 9 — защитные сегменты колошника; 10 — загрузочное окно; 11 — искрогаситель; 12 — опорное кольцо; 13 — кожух; 14 — футеровка; 15 — переходная летка; 16 — копильник; 17 — выпускное отверстие для шлака; 18 — выпускное отверстие для чугуна

Жидкий металл собирается в горне или через соединительный желоб перетекает в копильник, откуда периодически или непрерывно выпускается через отверстие (летку). Для удаления шлака в горне или копильнике делают специальную шлаковую летку. Шахта в верхней своей части (выше колошникового отверстия) переходит в футерованную трубу, снабженную искрогасителем — устройством для гашения и улавливания мелких твердых частиц, содержащихся в потоке газов. Фурмы по высоте располагают в один, два или три ряда по окружности шахты в шахматном порядке. Кожух и футеровка вагранки опирается на подовую плиту и четыре колонны, которые с помощью фундаментных плит устанавливаются на фундамент.

В последнее время получают распространение вагранки более сложного профиля, в которых шахту выполняют конусной. Наклон стен шахты обеспечивает более равномерное распределение шихты и газов по сечению вагранки.

В современных вагранках для увеличения срока службы футеровки применяют наружное водяное охлаждение. При этом вагранку оборудуют дополнительным кожухом (рубашкой), захватывающим область фурм и распространяющимся вверх на высоту 2—2,5 м. Охлаждение осуществляется либо водяной рубашкой с подводом воды в нижнюю часть и отводом сверху, либо струйным разбрызгиванием воды по поверх-

ности кожуха. Применение водяного охлаждения позволяет увеличить длительность работы вагранки без ремонта футеровки до 5—6 суток.

Плавке в вагранке предшествуют розжиг и загрузка шихты в вагранку. Целью розжига является создание в нижней зоне печи, между подиной и плавильным поясом, очага горения в виде слоя горящего кокса, который называется холостой колошей. Над холостой колошей располагается в виде отдельных чередующихся слоев металлическая шихта и рабочая порция — кокса — топливная колоша. Флюс загружается вместе с коксом.

Плавка начинается с момента начала подачи воздуха. Воздух давлением 5—10 кПа, вдуваемый в вагранку через фурму, вызывает интенсивное горение топлива в пространстве, расположенном над фурмами. В результате этого образовавшиеся продукты сгорания поднимаются вверх и, встречаясь с металлической шихтой, расплавляют ее. Для более полного использования тепла поток газов должен как можно равномернее проникать через слой шихты и возможно полнее отдавать свое тепло. Поэтому слой материалов должен иметь хорошую проницаемость для газов. Для этого требуется равномерная послойная завалка металлической шихты и вполне определенное давление дутья.

В зависимости от температуры и состава газов вагранку условно разделяют на три зоны.

Верхняя зона — зона подогрева материалов. В этой области все материалы находятся в твердом состоянии. Постепенно опускаясь вниз, они нагреваются до температуры 1100—1200 °С. Известняк при температуре 800—900 °С подвергается разложению, кокс теряет влагу и оставшиеся летучие вещества. Ваграночные газы в этой зоне, пройдя столб шихтовых материалов и отдав им тепло, охлаждаются до температуры 350—450 °С и на выходе из слоя шихты содержат 8—10 % CO, 14—16 % CO₂ и пыли 8—10 кг/т.

Средняя зона — зона горения. В верхней области этой зоны происходит плавление металлической шихты и образование шлака, в твердом состоянии находится только кокс. Капли жидкого металла и шлака, стекая вниз по кускам горящего кокса, нагреваются до температуры 1500 °С. Одновременно, проходя через окислительную зону, капли чугуна подвергаются воздействию газов, причем происходит частичное окисление элементов чугуна (10—25 %), что связано с дополнительным выделением тепла. Максимальная температура газов в этой зоне 1600 °С.

Нижняя зона — горновая, расположена ниже воздушных фурм. В этой зоне металл несколько охлаждается и удаляется из печи.

Для интенсификации процесса плавки в современные вагранки подается подогретый до 500 °С воздух. При горячем дутье значительно улучшаются показатели работы вагранки: увеличивается производительность, снижается расход кокса, повышается тем-

пература чугуна. Воздух подогревается в отдельно расположенном радиационно-конвективном рекуператоре с самостоятельным отоплением.

Процесс плавки в вагранке характеризуется следующими показателями: производительность 6—7 т/ч в 1 м² площади поперечного сечения вагранки, расход кокса 7—10 % от массы чугуна и относительно высоким тепловым к. п. д. (40—45 %).

Вагранка является самым распространенным чугуноплавильным агрегатом, но получить чугун для отливок высокого качества в вагранке не представляется возможным из-за колебания по ходу плавки состава и температуры чугуна. В чугунолитейном производстве в настоящее время необходимо получение чугуна с высокой плотностью, прочностью и пластичностью. Для этого требуется подогрев чугуна до 1500—1550 °С в целях возможности его легирования и модифицирования. Поэтому в чугунолитейных цехах, производящих ответственное литье, постепенно вагранки заменяются индукционными электропечами.

2. Нагревательные печи кузнечных цехов

Металл перед ковкой и горячей штамповкой обычно нагревают до 1100—1200 °С. Для этого чаще всего применяют пламенные печи методического и камерного типа. В них нагрев металла осуществляется в атмосфере продуктов сгорания, оказывающих на металл окислительное и обезуглероживающее действие. Образовавшаяся в значительных количествах окалина не позволяет получить чистые поковки и сильно увеличивает износ кузнечного оборудования. В настоящее время в кузнечных цехах широко применяют механические прессы, которые дают возможность уменьшить припуски и тем самым уменьшить затраты труда на механическую обработку поковок, что значительно сократит потери металла в стружку.

Для получения чистовых поковок на механических прессах совершенно необходимо нагревать металл с минимальным окислением. Уменьшение окисления металла в процессе его нагрева возможно за счет ускорения нагрева, а также за счет нагрева металла в неокисляющей или малоокисляющей атмосфере. В связи с этим стремятся применять нагревательные печи малоокислительного нагрева.

Печи с полным сжиганием топлива

В кузнечных цехах нагреву подвергаются заготовки самой разнообразной формы, причем заготовки нагреваются как целиком, так и частично (например, только их концы). В основном все заготовки могут быть подразделены на следующие группы:

1) квадратного или прямоугольного сечения, которые нагреваются целиком и могут проталкиваться сквозь печь;

2) различной сложной формы, которые нагреваются целиком, но из-за сложности формы не могут проталкиваться по поду;

3) круглого и квадратного сечений с частичным нагревом (чаще всего их концов).

В зависимости от формы заготовок для их нагрева применяют печи соответствующих конструкций. Так, для нагрева заготовок квадратного и прямоугольного сечений применяют толкательные методические печи с монолитным подом. Нагрев заготовок сложной формы (в том числе и круглых) осуществляется в печах с дисковым вращающимся подом. Концы заготовок нагревают в щелевых печах.

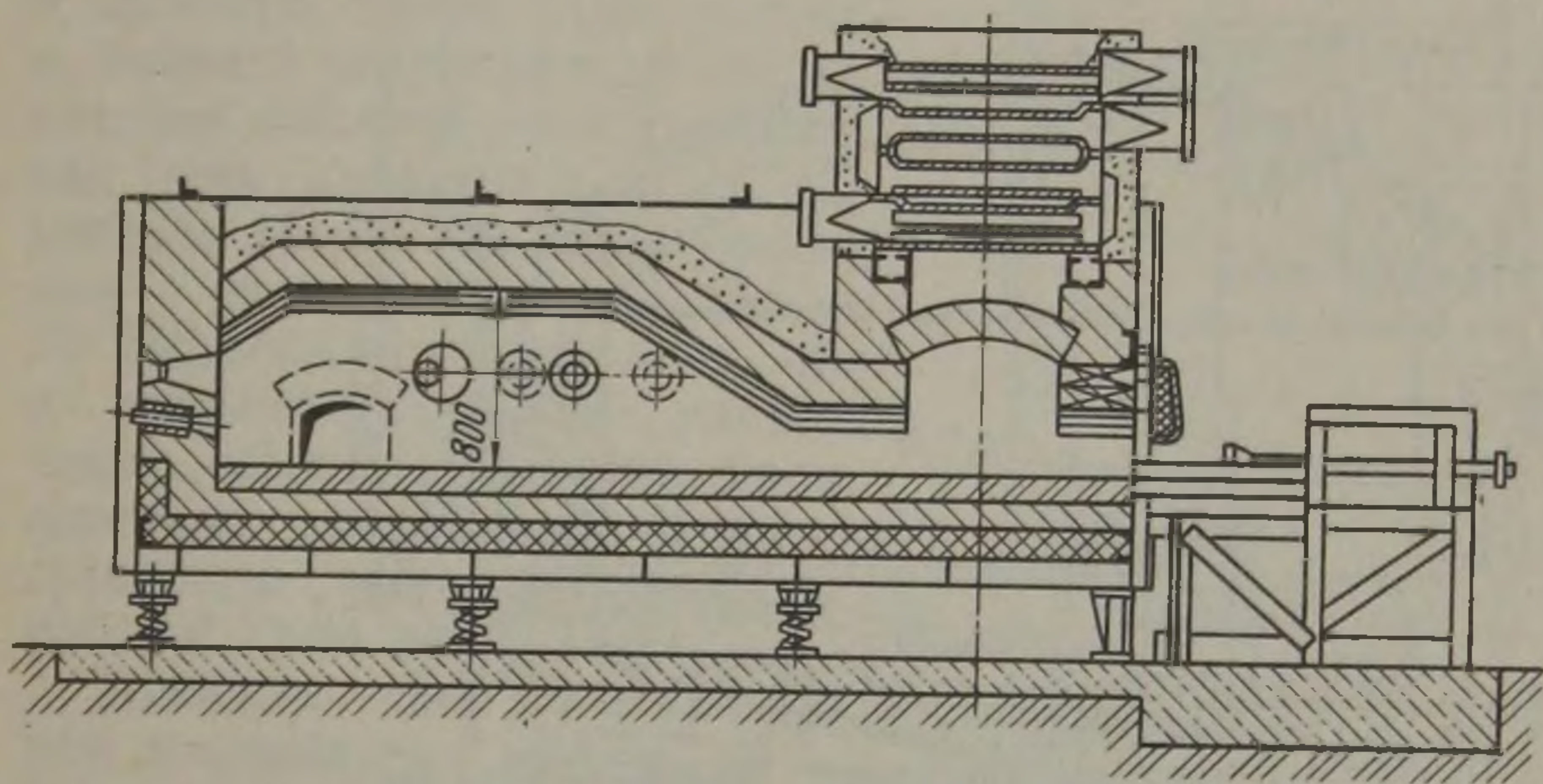


Рис. 33-2. Толкательная кузнечная печь с боковой выдачей

Методические нагревательные печи кузнечных цехов принципиально ничем не отличаются от аналогичных печей для прокатного производства, описанных выше. Характерным для них является наличие монолитного пода и небольшие размеры (рис. 33-2). Методические печи кузнечных цехов работают на газообразном, а также на жидком топливе. Они обеспечивают несколько меньшую, чем у прокатных печей, удельную производительность [250—400 кг/(м².ч)] при повышенном удельном расходе топлива, составляющем 2,6—4 МДж/кг.

Заготовки сложной формы нагревают в печах с дисковым вращающимся подом. На рис. 33-3 представлена одна из таких печей. Заготовки располагают обычно на наклонных частях пода печи, небольшая центральная часть пода печи металлом не заполняется. Заготовки размещают на некотором расстоянии одну от другой во избежание их сваривания. Загрузку и выгрузку металла осуществляют через рабочее окно 1. Вынув одну нагретую заготовку, на ее место кладут другую, холодную. Время одного оборота пода должно быть равно времени нагрева заготовки. Печь может отапливаться не только жидким, но и газообразным топливом. При отоплении мазутом применяют форсунки низкого давления, при отоплении газом — турбулентные или инжекционные го-

релки. Горелки 2 располагают тангенциально, что обеспечивает циркуляцию газов в рабочем пространстве.

Дымовые газы удаляют из печи через три дымоотводящих вертикальных канала при помощи воздушных эжекторов 3 и подают под вытяжной зонт, через который они удаляются из атмосферы цеха. Верхний слой пода печи выполнен из талькового кирпича, инертного по отношению к окалине. Кольцевая щель между стенами и вращающимся подом печи герметизируется при

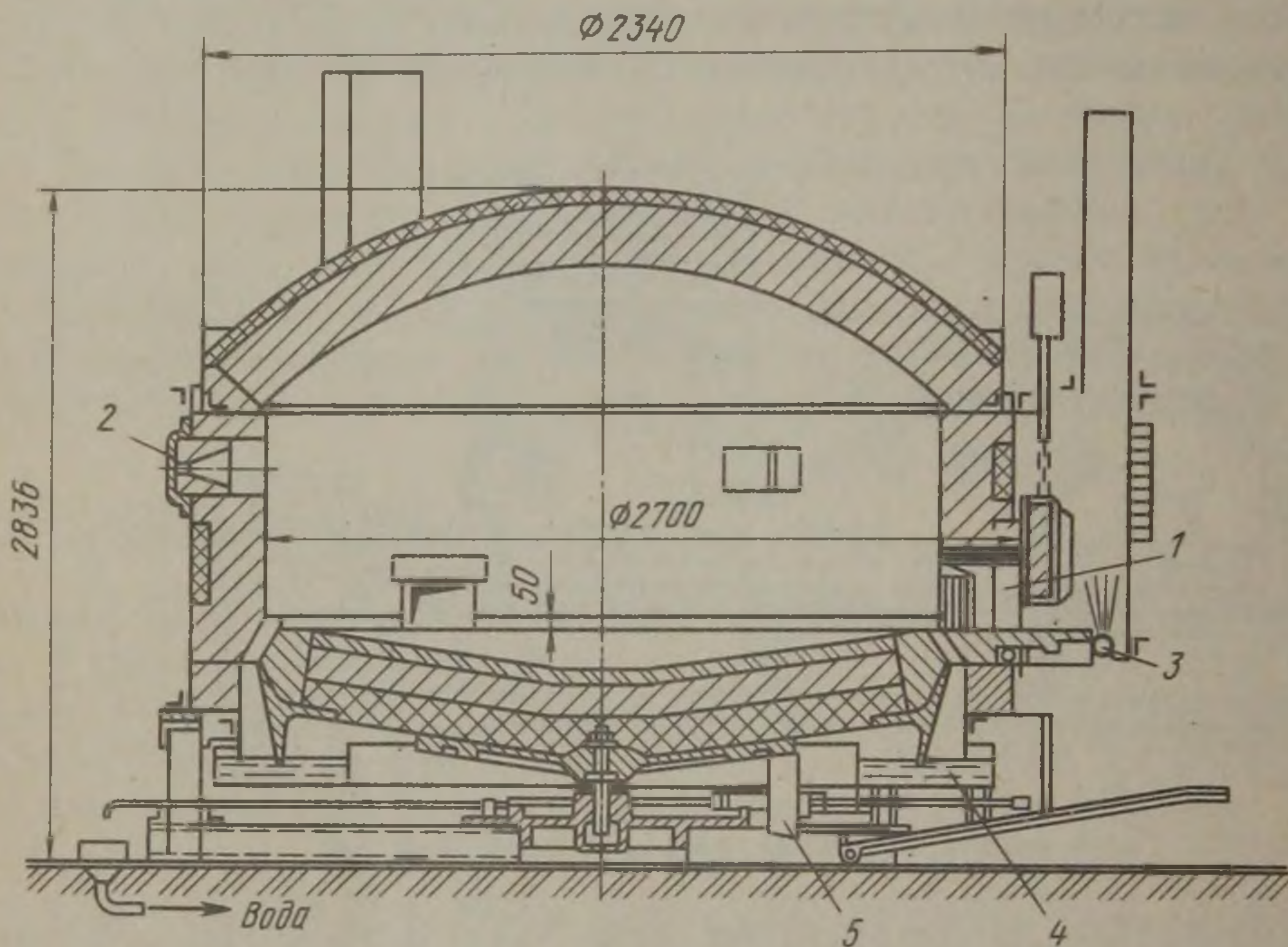


Рис. 33-3. Кузнечная печь с вращающимся тарельчатым подом

помощи гидравлического затвора 4. Под имеет центральную ось и расположен на трех опорных роликах 5. Вращение пода осуществляется толчками при помощи специального гидравлического цилиндра.

Подобные конструкции с дисковым вращающимся подом относятся к камерным печам постоянного действия. В них достигается удельная производительность 500—600 кг/(м²·ч) при удельном расходе тепла 3,8—8 МДж/кг. Нижний предел удельного расхода тепла достигается при рекуперации тепла при высокой удельной производительности; к. п. т. печи составляет 15—20 %.

Для нагрева концов заготовок применяют щелевые печи с ручной или механизированной подачей металла, относящиеся также к типу камерных печей постоянного действия. Щелевая печь с ручной загрузкой и выгрузкой металла представлена на рис. 33-4. Металл располагают на пороге рабочего окна печи. Концы заготовок выдвигаются в рабочее пространство печи через щель 1, у которой для большей стойкости предусмотрена водоох-

лаждаемая коробка 2. Горелки 3 расположены как в нижней, так и в верхней частях рабочего пространства, что обеспечивает двусторонний нагрев металла. Печь может отапливаться жидким и газообразным топливом. Дымовые газы удаляются из рабочего пространства печи через щель 1 и дымоотводящий канал 4, по которому разбавленные подсосанным воздухом дымовые газы поступают в металлический рекуператор 5, а затем по дымовым боровам 6 удаляются в дымовую трубу. Для чистки и ремонта рекуператора предусмотрен съемный свод 7. Щелевая печь работает с к. п. т., равным 12—15 %, при удельном расходе тепла 3,5—10 МДж/кг. Низкий к. п. т. и высокий удельный расход тепла объясняется большими потерями тепла через неподогреваемую часть заготовки и рабочее окно печи.

Щелевая печь с конвейером представлена на рис. 33-5. Металл со стола загрузки 3 подхватывается конвейером 2, транспортируется вдоль печи и выдается на стол 4. Для сжигания топлива используют горелку 1. Дымовые газы через каналы 6 подаются в рекуператоры 5 и удаляются под вытяжной зонт. Применение подобных печей обеспечивает удельную производительность, равную 400—500 кг/(м²·ч) при удельном расходе тепла 2,5—3 МДж/кг.

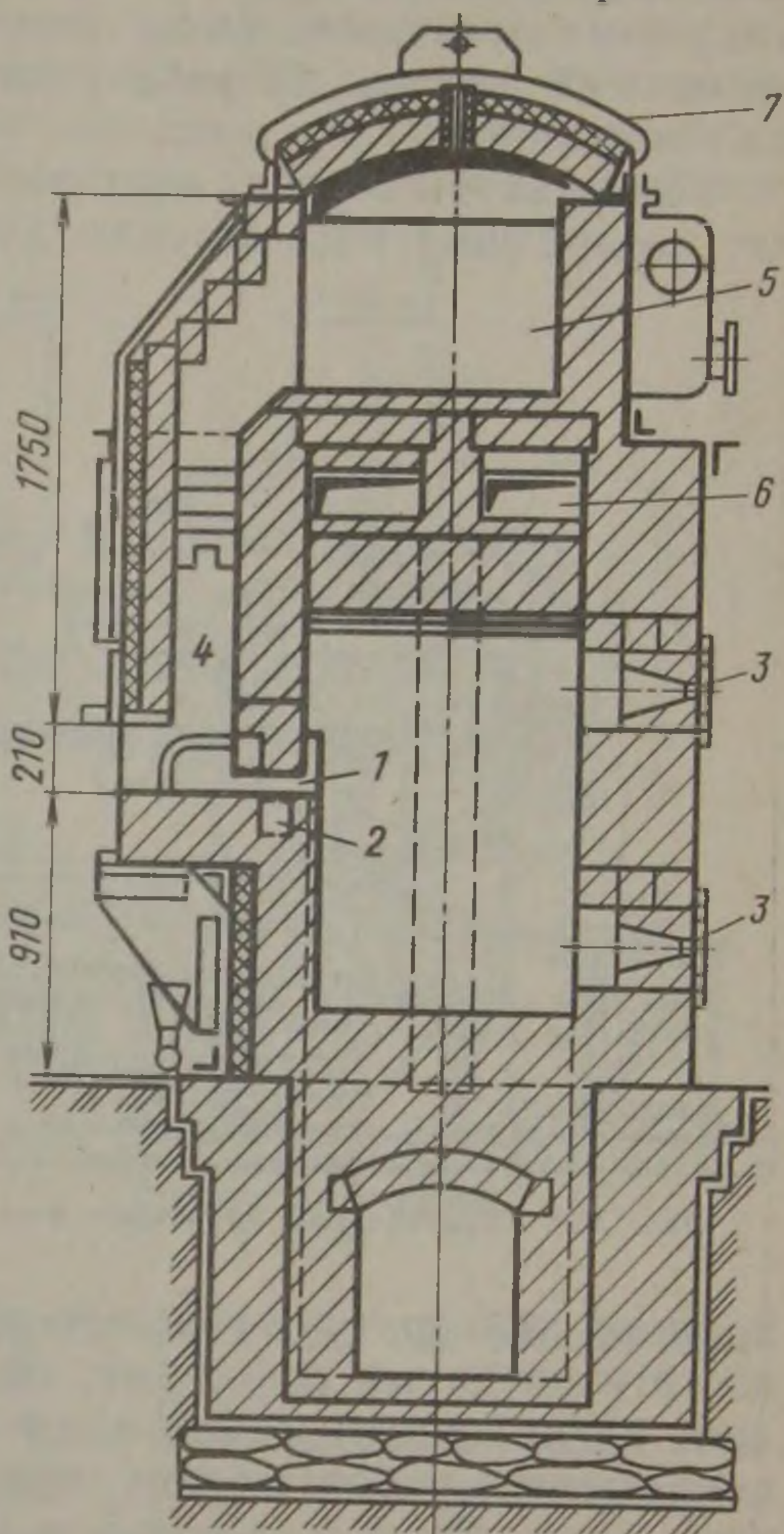
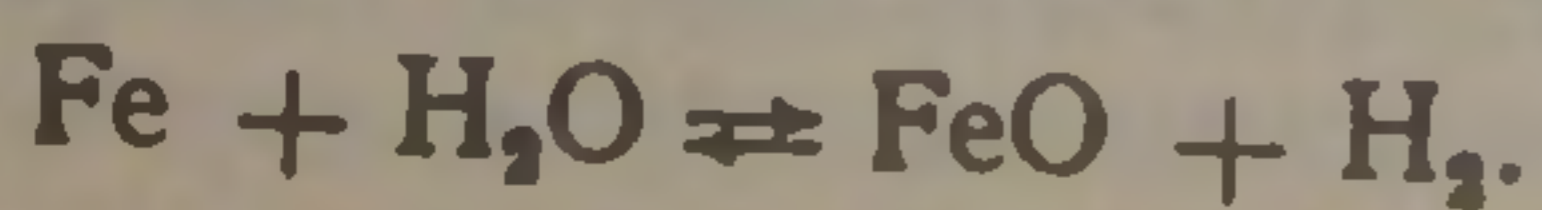
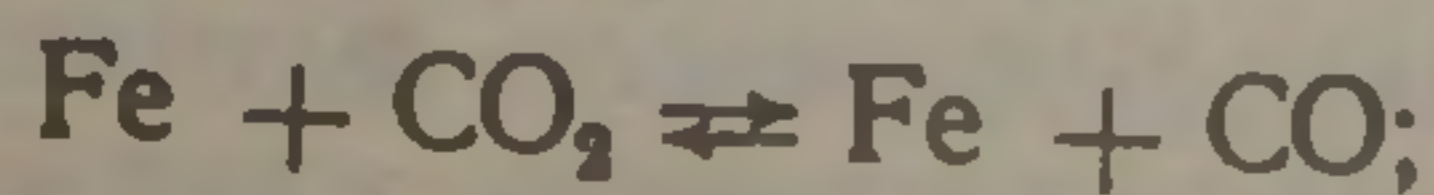


Рис. 33-4. Щелевая кузнечная печь

Печи для малоокислительного нагрева металла

Малоокислительный нагрев металла может быть осуществлен в печах, где происходит неполное сжигание газообразного топлива при большом недостатке воздуха ($n = 0,5$). Напомним, что при сжигании газа с недостатком воздуха окисление может идти по следующим реакциям:



Равновесие этих реакций возможно при определенном соотношении CO/CO_2 и $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$. При температуре $1250\text{--}1300\text{ }^\circ\text{C}$ эти равновесные соотношения равны $\text{CO}/\text{CO}_2 = 3$; $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O} = 1,35$. Следовательно, при составе атмосферы печи, обеспечивающим величину этих отношений выше указанной, будет возможен безокислительный нагрев. Подобная атмосфера может быть получена при $n = 0,5$.

Температура горения при $n = 0,5$ будет около $1350\text{--}1400\text{ }^\circ\text{C}$, что совершенно недостаточно для нагревательных печей. Необ-

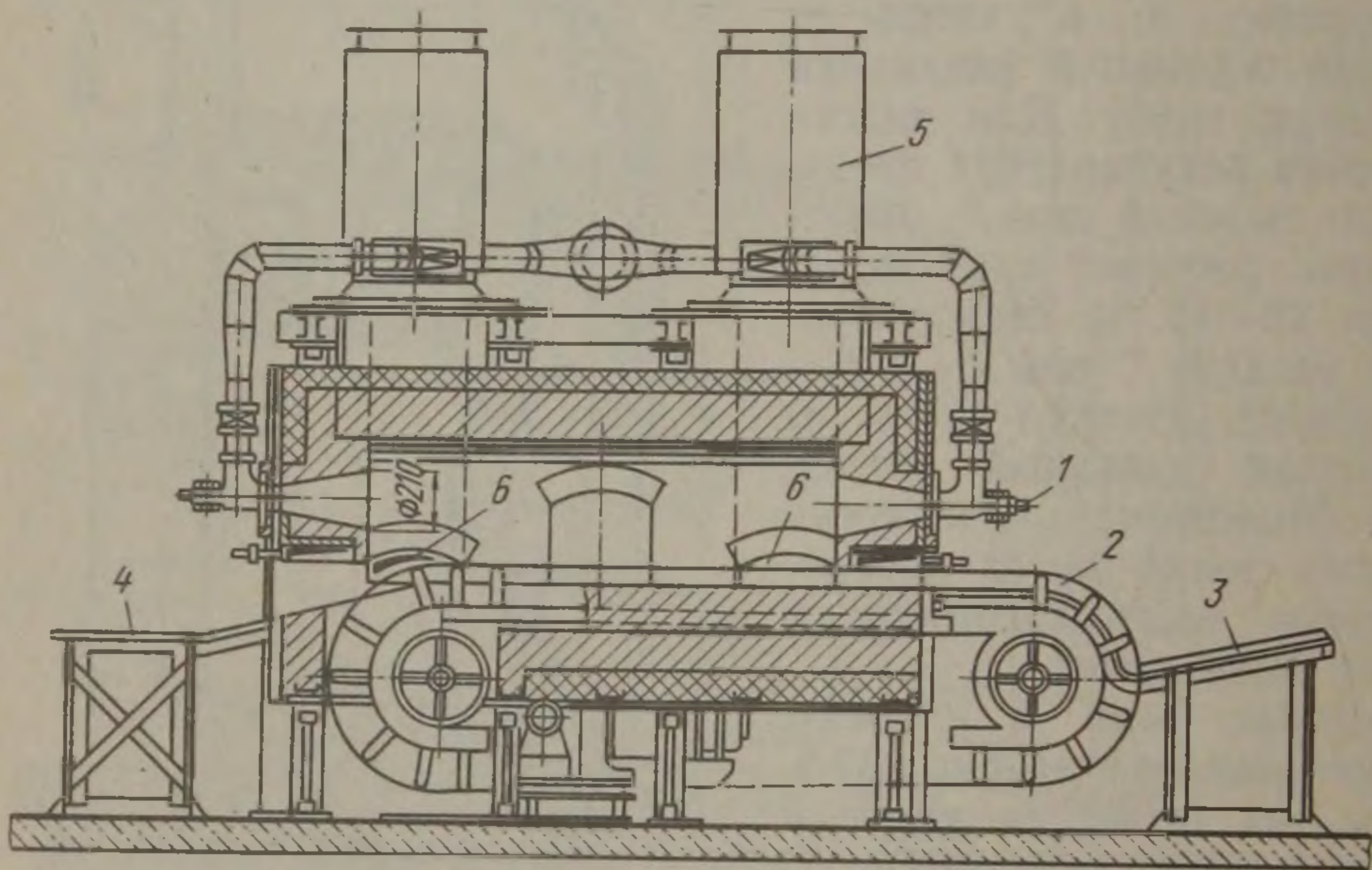


Рис. 33-5. Конвейерная кузнечная печь

ходимая температура горения, равная $1900\text{--}2000\text{ }^\circ\text{C}$, может быть достигнута двумя способами: подогревом воздуха до $800\text{--}900\text{ }^\circ\text{C}$ либо обогащением воздуха кислородом. Печи малоокислительного нагрева работают при двуступенчатом сжигании газа: I ступень — сжигание с $n = 0,5$ и II ступень — дожигание продуктов первичного сгорания с использованием тепла для подогрева воздуха или для нагрева металла при низких температурах в печи.

Схема одной из таких печей с регенеративным подогревом воздуха приведена на рис. 33-6. В этой печи сжигание газа в рабочем пространстве ведется с $n = 0,5$. Температура воздуха, идущего на горение в первой стадии $1000\text{ }^\circ\text{C}$. Воздух подогревается в регенераторах с металлической насадкой из коротких нихромовых трубок. Обогрев регенераторов осуществляется путем дожигания продуктов неполного сгорания, полученных в рабочем пространстве печи.

В целях снижения температуры в насадке регенератора дожигание ведется с $n = 1$ и при разбавлении холодными дымовыми газами (с температурой $200\text{--}300\text{ }^\circ\text{C}$). Переключение клапанов регенераторов производится через короткие интервалы времени

(~30 с) при помощи специального пульсатора. Частые переключения и высокая теплопроводность материала насадки дают возможность получать регенераторы компактных конструкций.

Нагрев заготовок под штамповку до высоких температур возможен в условиях сжигания при $n = 0,5$ при обогащении воздушного дутья кислородом. При этом объем продуктов неполного сгорания становится значительно меньшим, что и обуславливает повышение теоретической температуры горения. Простейшая

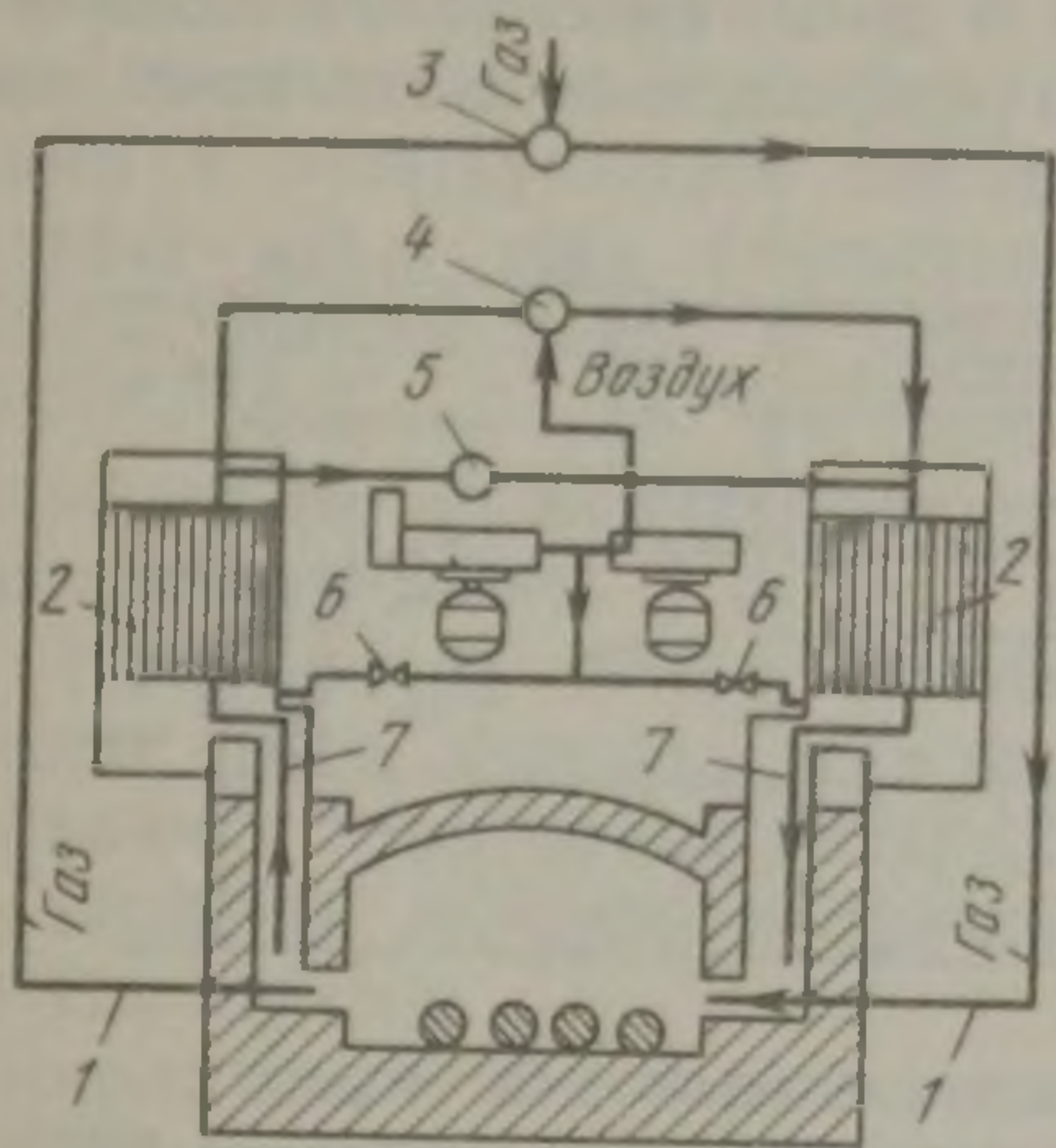


Рис. 33-6. Схема печи малоокислительного нагрева металла с металлическими регенераторами:

1 — подвод газа; 2 — регенераторы; 3—6 — переключающие клапаны; 7 — каналы для отводящих газов и подогретого воздуха

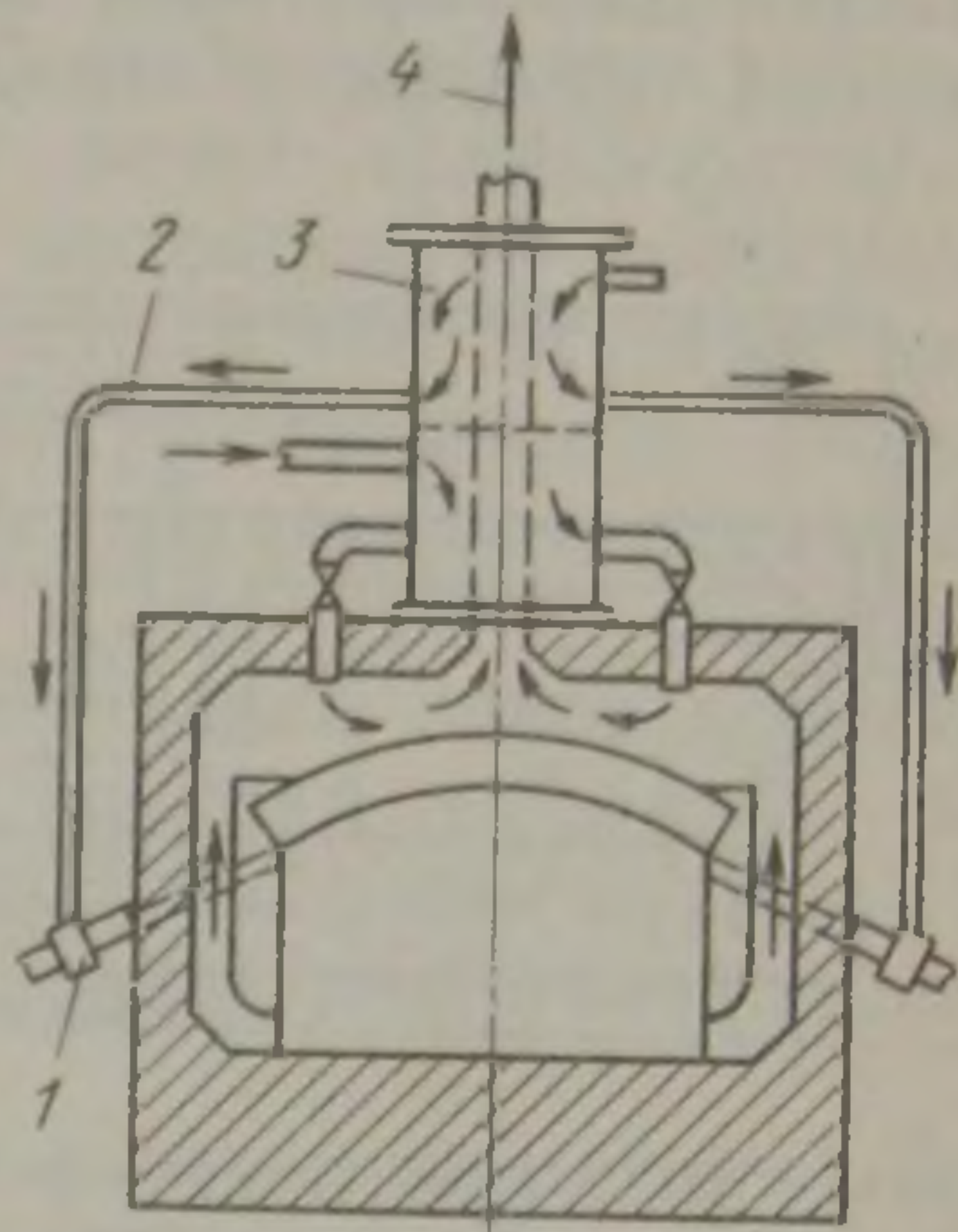


Рис. 33-7. Схема печи малоокислительного нагрева на обогащенном дутье:

1 — горелки; 2 — подогретая кислородно-воздушная смесь; 3 — рекуператор; 4 — отвод продуктов сгорания

схема камерной печи периодического действия, где воздух обогащается кислородом, показана на рис. 33-7.

Значительно больший эффект дает использование тепла вторичного сжигания как для нагрева воздуха и дополнительного количества кислорода, так и для предварительного подогрева заготовок. Идея максимального использования тепла продуктов неполного сгорания находит практическое осуществление в схеме, представленной на рис. 33-8, где показана конструкция методической толкательной печи с торцевыми горелками и боковой выдачей заготовок.

По длине печь разделена на три зоны. В первой зоне газ сжигается с недостатком воздуха ($n = 0,5$). Высокая температура достигается за счет обогащения воздуха кислородом, а также в результате рекуперативного подогрева первичного воздуха и дополнительного кислорода. Далее продукты неполного сгорания разветвляются на два потока (вторая зона), разделяемых карбоундовым полумуфельным сводом. Под ним продукты неполного сгорания продолжают двигаться навстречу нагреваемым заготовкам, а над сводом они дожигаются с подогретым в рекуператоре

воздухом. В третьей зоне все продукты неполного сгорания догорают. Таким образом, в этой части печи нагрев заготовок ведется в атмосфере продуктов полного сгорания газа.

Распределение зон рассчитано так, чтобы металл нагревался: в атмосфере продуктов полного сгорания до 650—700 °С (третья зона); под сводом до 900 °С и в конечной зоне нагрева — от 900 до 1250—1260 °С в атмосфере продуктов неполного сгорания.

Дымовые газы на выходе из печи проходят через рекуператор, служащий для подогрева воздуха и дополнительного количества кислорода, идущих к горелочным устройствам всех трех зон.

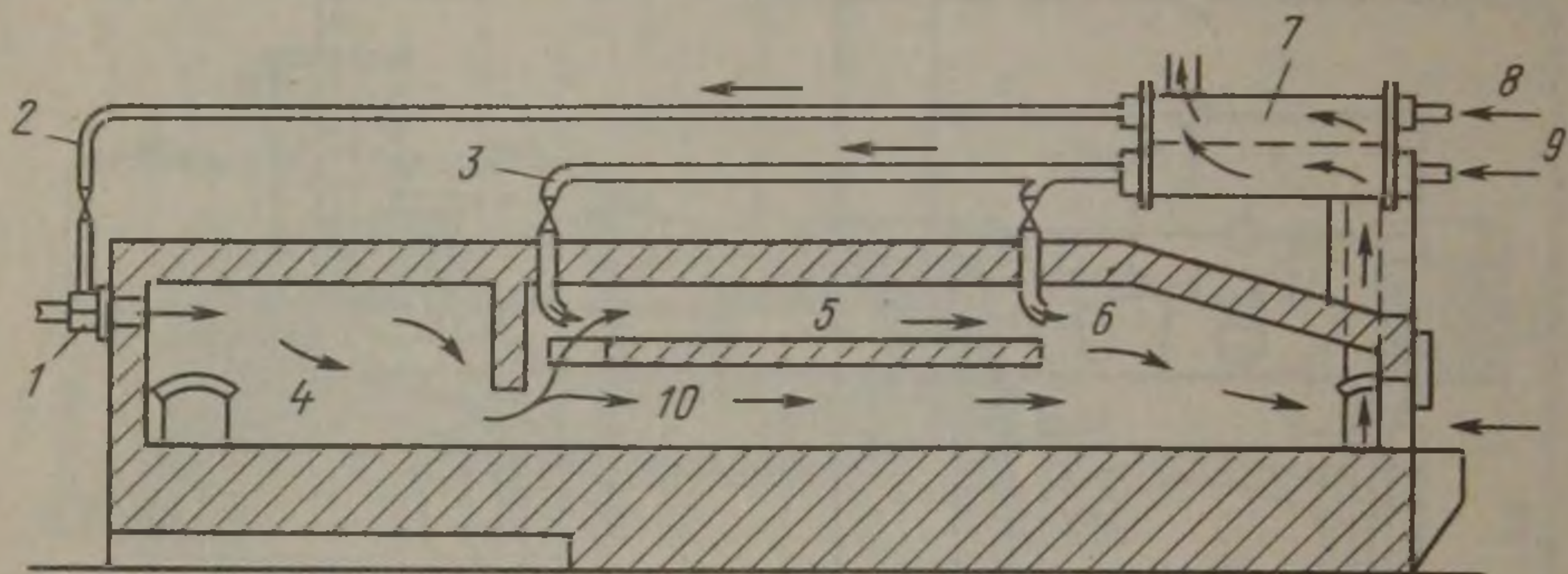


Рис. 33-8. Схема толкательной печи малоокислительного нагрева:
 1 — горелка; 2 — подогретая газо-воздушная смесь; 3 — подогретый воздух для дожигания; 4—6 — первая, вторая и третья зоны горения; 7 — рекуператор; 8 — холодная кислородно-воздушная смесь; 9 — воздух для дожигания; 10 — карборундовый полумуфельный свод

Печи малоокислительного нагрева могут обеспечивать к. п. т., равный 58—65 %, и весьма низкий удельный расход тепла (1350—1600 кДж/кг). Важным является вопрос о степени обогащения воздуха кислородом. Практически малоокислительный нагрев под штамповку и ковку на холодном первичном воздухе возможен при концентрации кислорода до 36—40 %. Расход кислорода составляет 27—30 м³/т нагреваемого металла. Если же предварительно нагревать первичный воздух, то добавка кислорода может быть уменьшена.

Глава 34

ТЕРМИЧЕСКИЕ ПЕЧИ

Термические печи цехов машиностроительной промышленности отличаются большим разнообразием, соответствующим множеству различных видов обрабатываемых изделий. Как и ко всякому печному оборудованию к термическим печам машиностроительных заводов предъявляются требования, связанные с необходимостью обеспечения высокой производительности при требуемой степени механизации и автоматизации, низких энерго-

затрат и высокого качества нагрева. Последнее особенно важно для термических печей, в которых большей частью обрабатывается уже готовая продукция.

Высокое качество нагрева — это прежде всего равномерный нагрев по садке и геометрии изделий, который связан с равномерным распределением температуры по рабочему объему печи. Равномерное распределение температуры обеспечивается как равномерным распределением источников тепла (особенно в электрических печах), так и, в основном, интенсивным движением газов, составляющих атмосферу печи. С этой целью при конструировании и эксплуатации термических печей принимаются специальные меры для осуществления интенсивной циркуляции и рециркуляции газов в рабочем пространстве. К этим мерам относятся такие, как тангенциальное расположение горелок, использование инжектирующих струй, установка специальных вентиляторов и др.

В термических печах машиностроительных цехов обработку проходят такие изделия, как тяжелые поковки и отливки, автомобильные и тракторные детали, режущий и мерительный инструмент, штампы, рессоры и пружины, шарики, роликоподшипники и многое другое.

Выполняется как термическая, так и термохимическая обработка, основными видами которых являются отжиг, нормализация, закалка и отпуск, а также цементация, цианирование и азотирование.

В настоящее время на машиностроительных заводах все более значительное распространение получают электрические термические печи, однако при этом и топливные (чаще всего газовые) печи не теряют своего значения.

1. Печи для термической обработки тяжелых и крупногабаритных изделий

Для термической обработки тяжелых и крупногабаритных изделий чаще всего применяют садочные печи с выкатным подом и вертикальные печи. Печи с выкатным подом бывают самых разных размеров: от мелких до вмещающих 300—400 т металла. На рис. 34-1 представлена одна из таких печей. В боковых стенках печи расположены топки-форкамеры 1, в которых осуществляется первая стадия сжигания топлива при помощи горелок 2 с коэффициентом расхода кислорода 0,6—0,8. В инжекционных устройствах 4 выполняется вторая стадия сжигания за счет струй воздуха 3, создающих циркуляцию. При отоплении природным газом и использовании инжекционных горелок температура в форкамерах находится в пределах 1250—1350 °С. В рабочем пространстве в зависимости от вида термообработки температура изменяется в пределах 600—900 °С, а коэффициент

расхода воздуха от 1,3 до 2,5. При осуществлении технологической выдержки равномерность температуры по садке составляет $\pm 5^\circ\text{C}$.

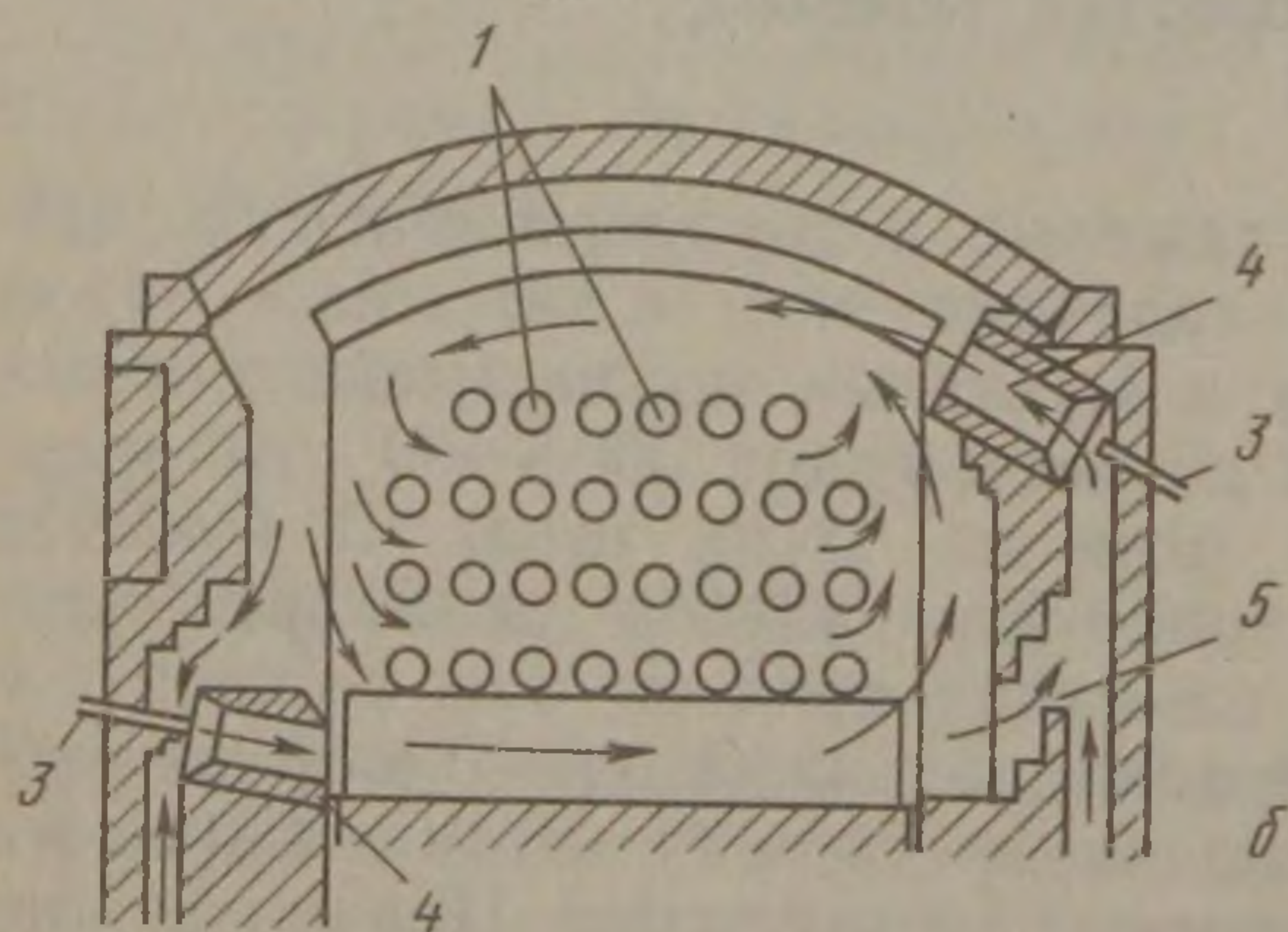
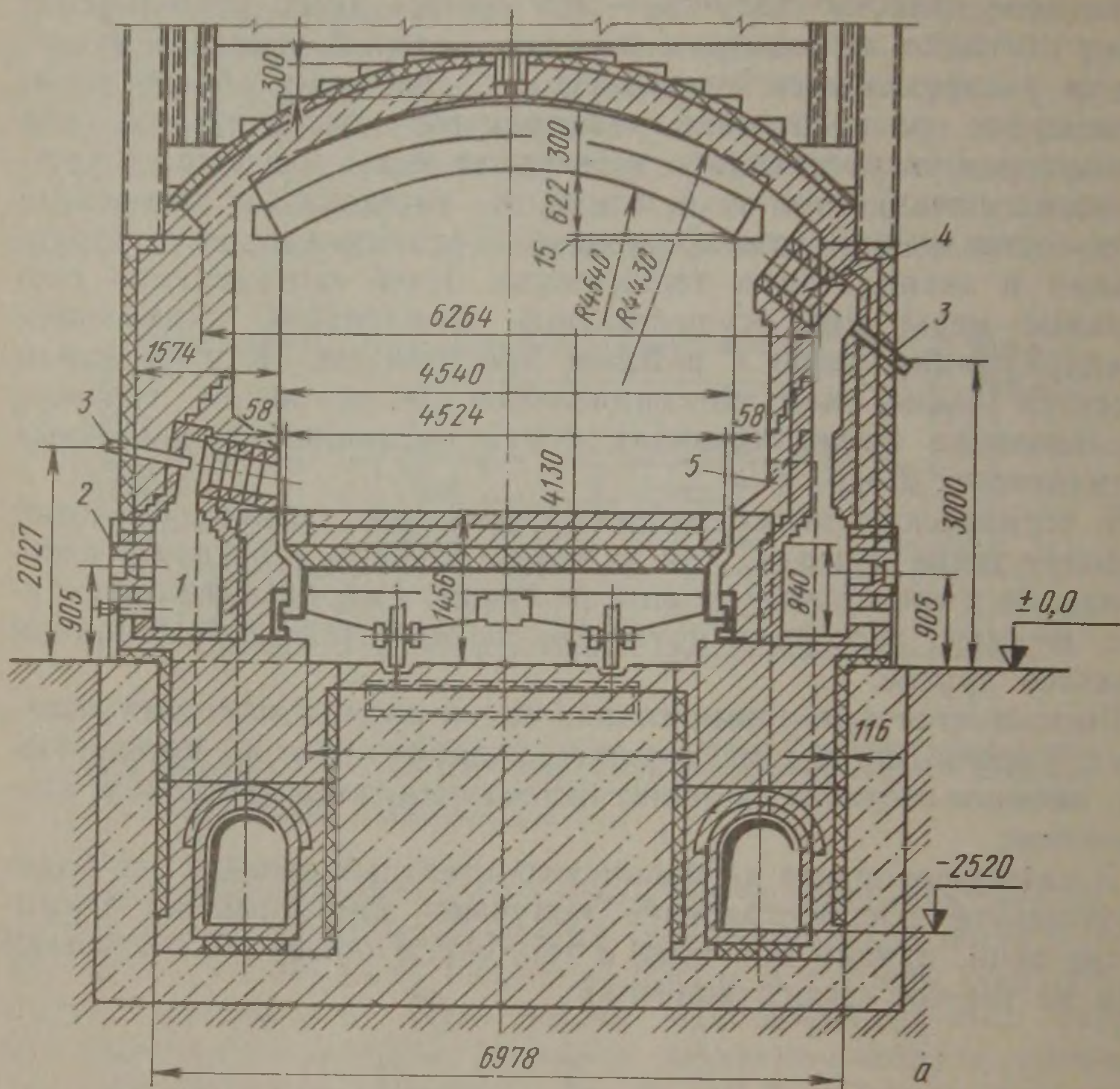


Рис. 34-1. Термическая рециркуляционная печь с выдвижным подом (а) и схема рециркуляции газов в ней (б)

Вертикальные термические печи предназначены для термической обработки крупных, длинных, ответственных изделий, таких как оси, толстостенные трубы, валы и т. п. Применяют их также для термообработки особо крупных и ответственных изделий,

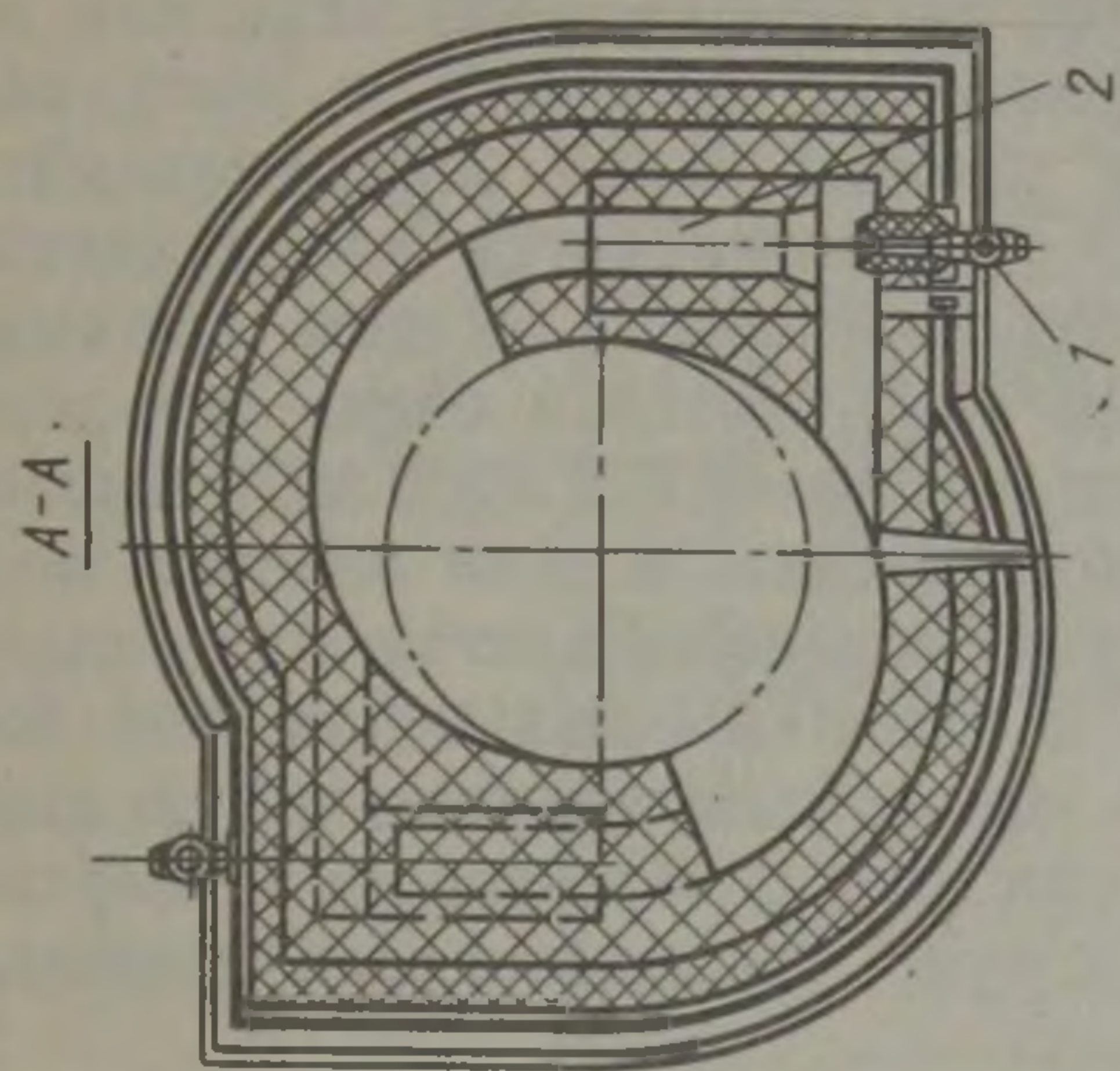
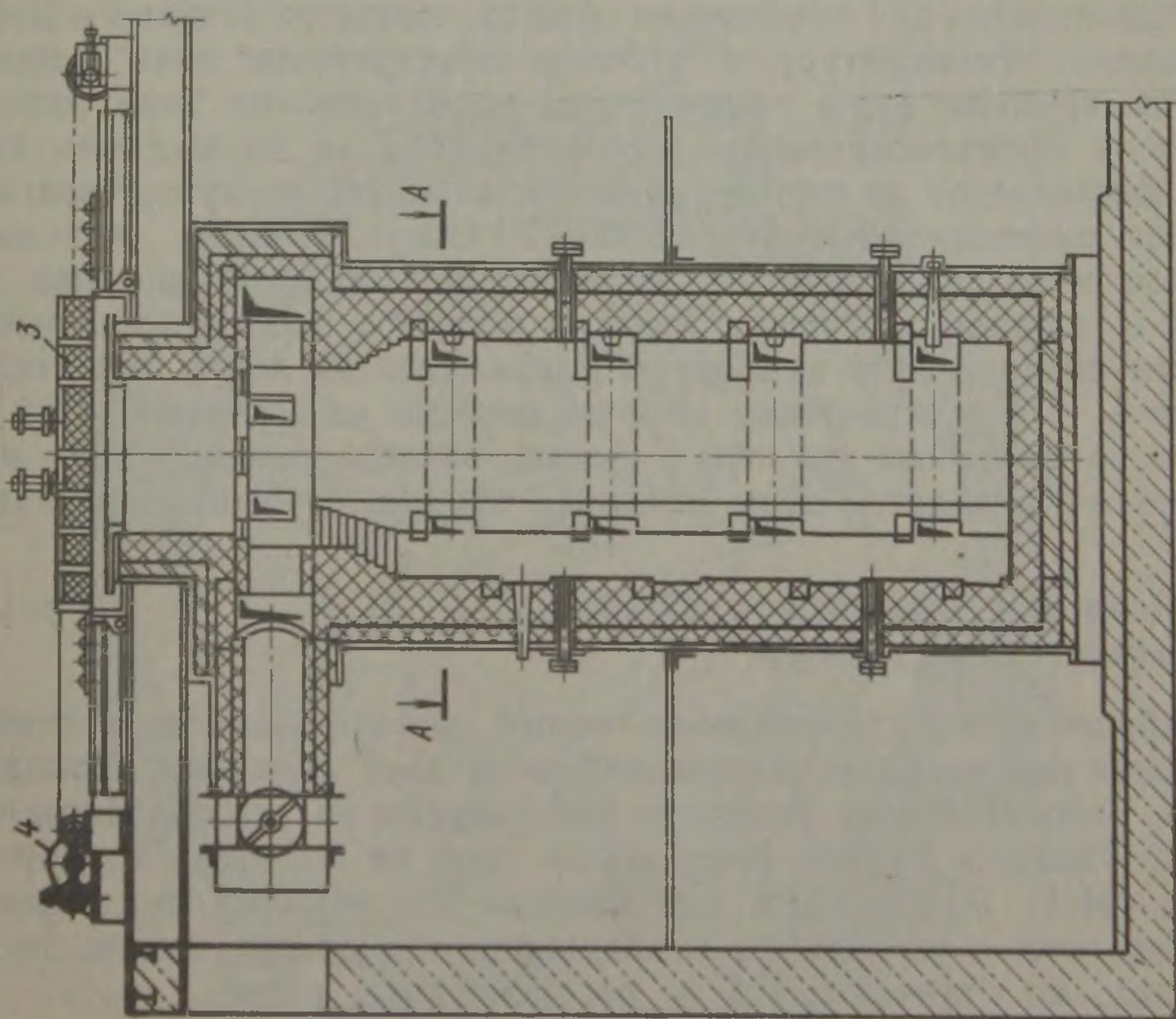


Рис. 34-2. Вертикальная закалочная печь:
 1 — горелка; 2 — нижекционный смеситель; 3 — раздвижная крышка; 4 — механизм перемещения крышки



какими являются, например, рабочие колеса гидротурбин (диаметр 8,65 м, масса 300 т).

На рис. 34-2 представлена вертикальная закалочная печь. Обычно вертикальные печи размещают в специальных приямках, а загрузочное отверстие печи на уровне пола цеха или на уровне специальной рабочей площадки. Загрузку и выгрузку изделий осуществляют мостовым краном через открывающийся верх рабочей камеры. Если печь предназначена для закалки, то закалочные баки обычно устанавливают в общем приямке с печью. Размеры подобных печей изменяются в очень широких пределах: диаметр рабочего пространства от 0,6 до 3 м, а высота от 1,8 до 20 м. Чаще всего обрабатываемые в печи изделия подвешиваются. Подвеска с изделиями устанавливается над крышкой на двух подвижных опорах. В вертикальных печах, так же, как и в печах с выкатным подом, применяют искусственную циркуляцию газов, осуществляемую за счет использования энергии газовоздушной или воздушной струи, подсасывающей дымовые газы.

Пламенная вертикальная термическая печь для термообработки крупных изделий представлена на рис. 34-3. Эта печь предназначена для проведения отжига, высокого отпуска и нормализации. Температура в рабочем пространстве печи большую часть времени ниже температуры воспламенения газа, поэтому в печи предусмотрены закрытые топки 1, а циркуляция газов осуществляется за счет струй вентиляторного воздуха, вводимого через инжекционные устройства 2. Струя воздуха, выходя из сопла со скоростью 80 м/с, увлекает поступающие из топки продукты сгорания, а также газы из рабочего пространства печи и через специальную амбразуру направляет их через смеситель 3 в печь, что обеспечивает первую ступень циркуляции. При выходе из смесителя эта струя в свою очередь увлекает газы в рабочем пространстве печи, создавая вторую ступень циркуляции.

2. Печи для термической обработки автотракторных деталей

Наиболее распространенными печами для нормализации, отжига, нагрева под закалку, сорбитизацию деталей являются проходные печи с подподовыми топками, работающие на газообразном топливе. Изделия продвигаются вдоль печи на поддонах толкателем (рис. 34-4). Кроме того, для нагрева под закалку применяются также печи с роликовым и вращающимся подом, ничем, по существу, не отличающиеся от рассмотренных ранее.

Значительное место в печном хозяйстве термических отделений автотракторных предприятий занимают печи для термохимической обработки: цементации, цианирования, азотирования. Наиболее распространенным процессом является газовая цементация, для которой в настоящее время применяют иногда безму-

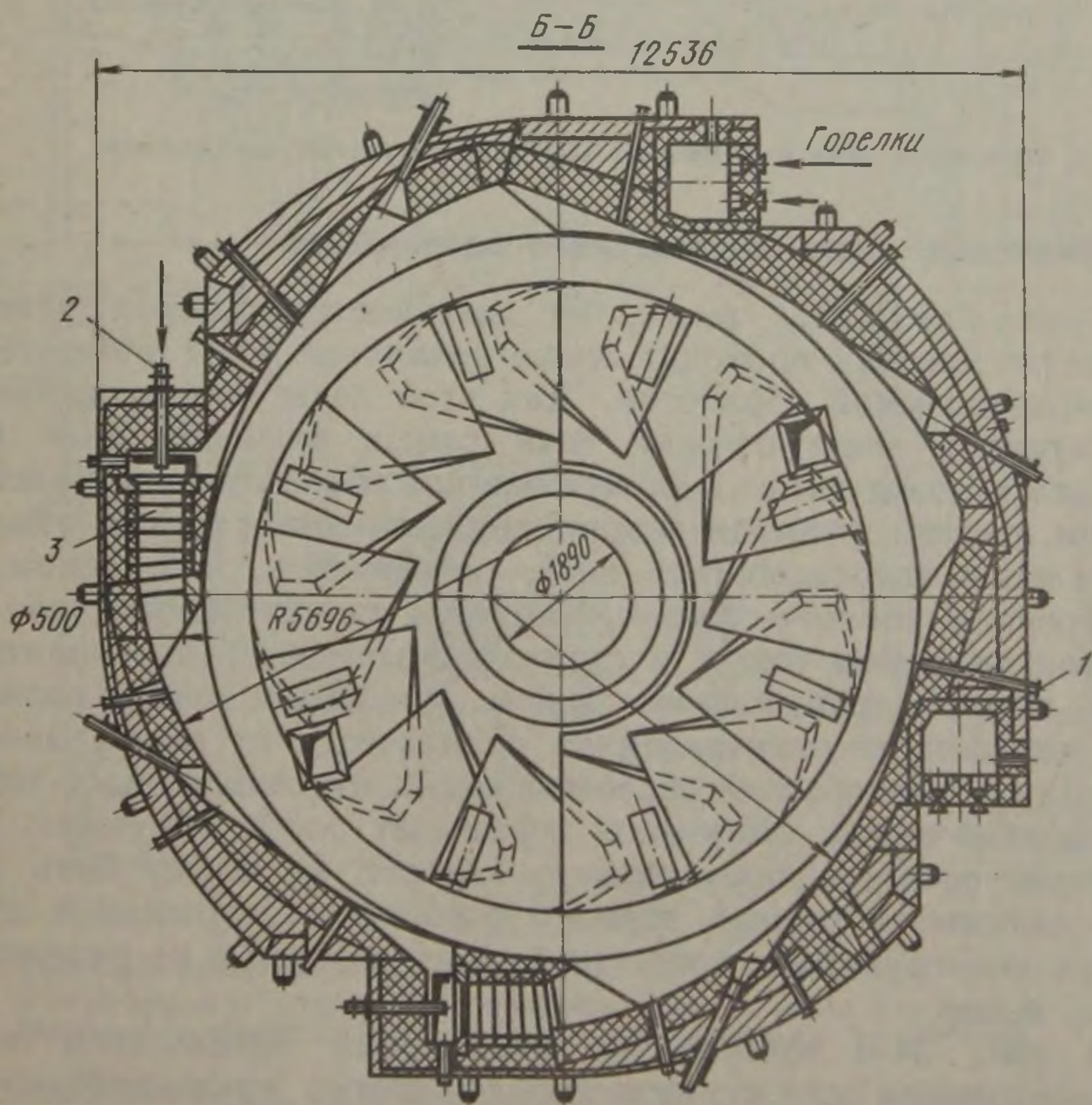
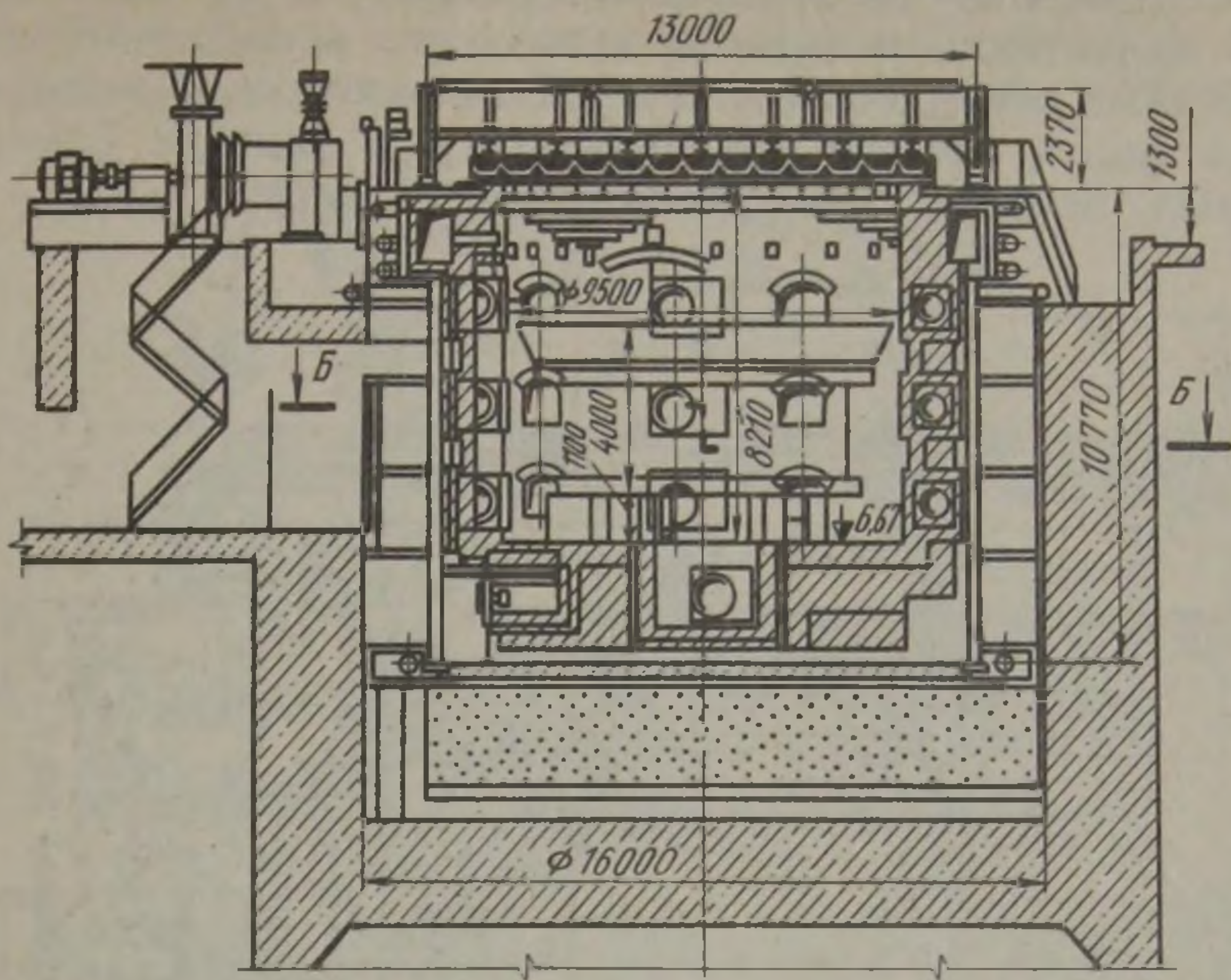


Рис. 34-3. Вертикальная рециркуляционная печь для термообработки рабочих колес гидротурбины массой до 300 т

фельные агрегаты, оборудованные радиантными трубами. Для газовой цементации мелких деталей часто используют шахтные и барабанные электрические печи. Цианирование и азотирование автотракторных деталей осуществляется в ваннах, садочных и проходных печах с электрообогревом.

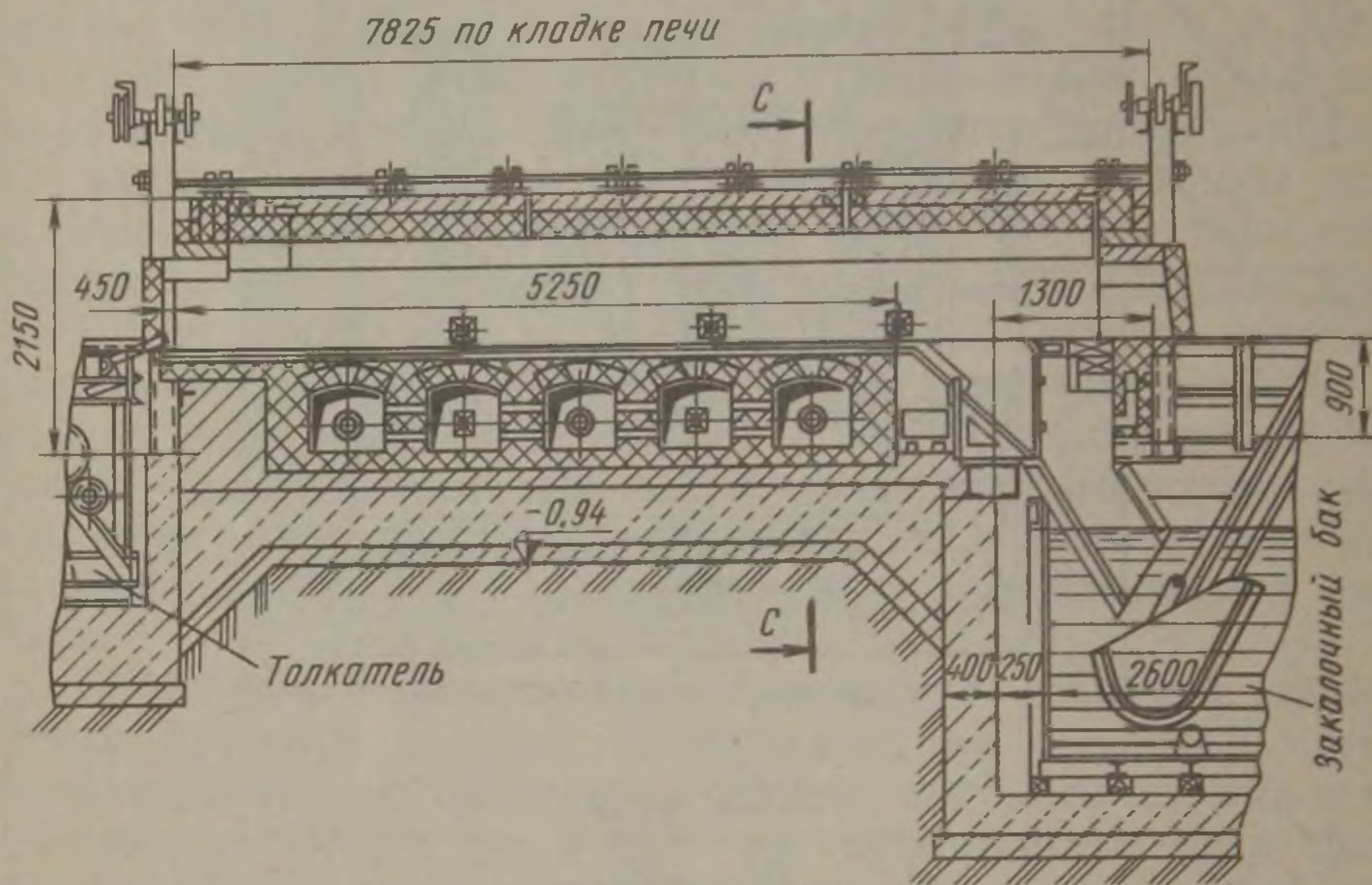


Рис. 34-4. Проходная печь для нагрева под закалку гусеничных звеньев

3. Термические печи специального назначения

Как уже отмечалось выше, на машиностроительных заводах множество изделий проходит самые различные виды термической и термохимической обработки. Для этой цели преимущественно используются электрические печи самых разнообразных конструкций и назначения. Для термической обработки инструмента, пружин, рессор, штампов, шарикоподшипников и других изделий продолжают использоваться печи, работающие, в основном, на газообразном топливе. Эксплуатируется значительное число небольших камерных (одно- и двухкамерных) печей с монолитным подом, печей с вращающимся подом, проходных печей с подподовыми топками, не отличающихся практически от печей, описанных выше. Разнообразие обрабатываемых изделий и видов термо- и термохимической обработки порождает соответствующее разнообразие печного оборудования, которое не может быть подробно описано в рамках данного учебника. Остановимся лишь на двух конструкциях, представляющих интерес и не рассматриваемых выше.

На рис. 34-5 изображена элеваторная термическая печь, предназначенная для термической обработки крупногабаритных изделий или мелких деталей, установленных на этажерках. Элеваторные печи обычно размещают выше пола цеха на колон-

нах, опирающихся на фундамент. Под этих печей подвижный, для подъема и опускания его служит специальный механизм с электромеханическим приводом. Опущенный под печи находится на

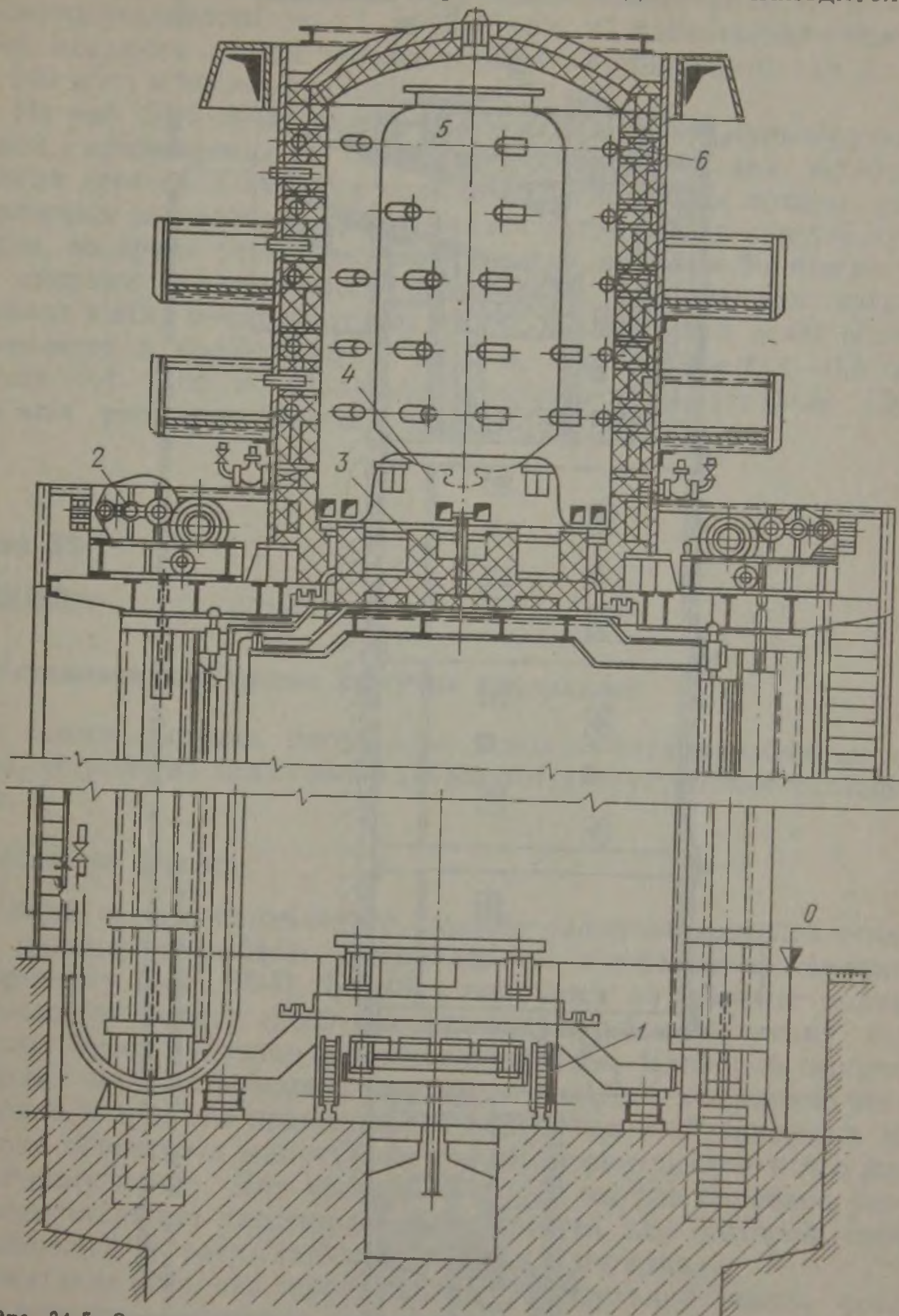


Рис. 34-Б. Элеваторная термическая печь:

1 — загрузочная машина; 2 — механизм подъема пода; 3 — под; 4 — подставка; 5 — обрабатываемые изделия (или этажерка); 6 — горелка

уровне пола цеха. После подъема пода рабочая камера печи герметизируется песочным или гидравлическим затвором. Газовые элеваторные печи применяют для выполнения операций термооб-

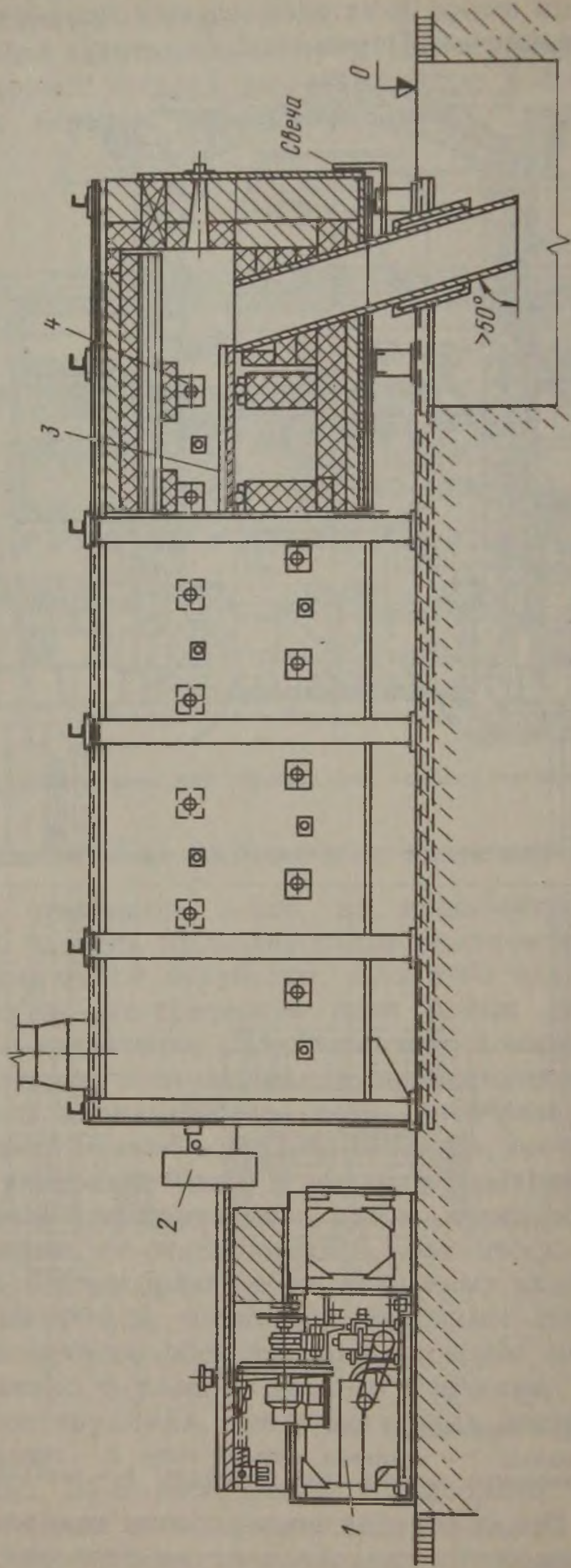


Рис. 34-6. Термическая печь с пульсирующим подом:
 1 — механизм пульсации; 2 — жароупорно-уплотнительное устройство; 3 — жароупорный лоток пульсирующего пода; 4 — горелка

работки при температуре от 900 до 1100 °С. Размеры печей изменяются в широких пределах: диаметр рабочего пространства от 1 до 4 м, высота от 1,5 до 6 м. Масса садки изменяется от 1,5 до 43 т, производительность от 0,1 до 2,15 т/ч. С изменением размеров печи меняются общий расход топлива — природный газ (от 12 до 240 м³/ч) и число горелок (от 4 до 50 шт).

На рис. 34-6 представлена термическая печь с пульсирующим подом, применяемая в серийном производстве для обработки мелких деталей. Печь оборудована пульсирующим лотком, установленным на свободно вращающихся катках. При каждой пульсации, во время резкой остановки лотка, лежащие на нем детали по инерции передвигаются вдоль печи. Температура нагрева металла в этих печах достигает 900 °С. Длина таких печей обычно изменяется в пределах от 2 до 6 м, при ширине 0,4—0,8 м и высоте 0,4—0,65 м. Производительность (при закалке) 130—770 кг/ч, расход природного газа 15—75 м³/ч.

Глава 35

СУШИЛА

1. Установки для сушки сыпучих материалов

Для сушки сыпучих материалов используются барабанные сушила, устройства для сушки в пневмопотоке и установки кипящего слоя

Барабанные сушила

Основной частью барабанного сушила является длинный стальной цилиндр (барабан), установленный с небольшим наклоном к горизонту (рис. 35-1). Барабан опирается на опорные ролики и вращается вокруг своей оси благодаря зубчатому венцу, связанному через редуктор с электроприводом. Влажный сыпучий материал через загрузочное устройство подается в верхнюю часть барабана и при его вращении (обычно с частотой вращения несколько оборотов в минуту) постепенно перемещается к его разгрузочному концу. Для ускорения сушки внутри барабана установлены стальные пластины в виде лопастей или секторов, перемешивающие и разрыхляющие сыпучий материал.

Сжигание топлива производится в отдельной топке, после чего продукты сгорания смешиваются в смесительной камере с воздухом для понижения их температуры до 800—850 °С. При этой температуре сушильный агент поступает в барабан (у его загрузочного конца), покидает барабан при температуре 100—120 °С через газоотвод у разгрузочного конца и направляется в очистительные циклоны.

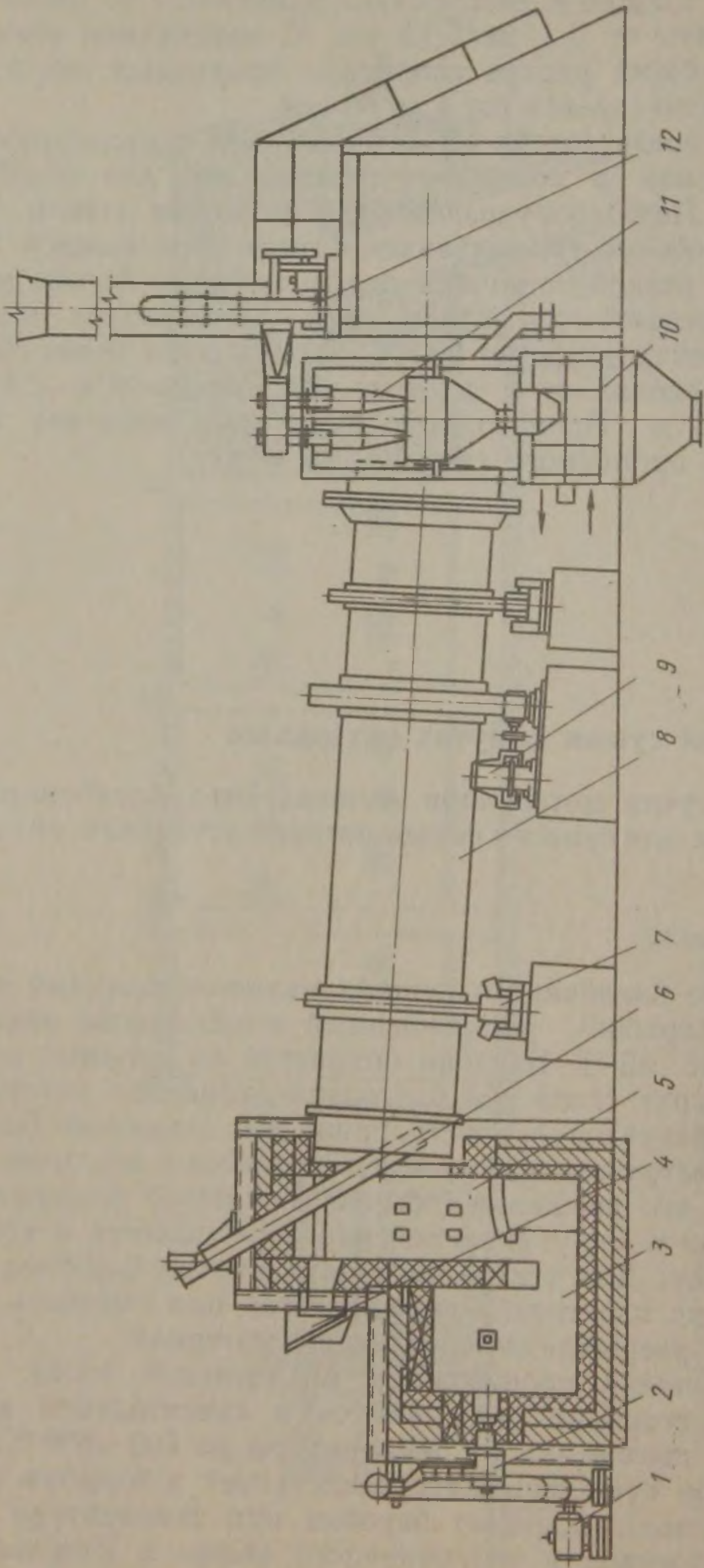


Рис. 3б-1. Барабанное сушило:

1 — вентилятор для подачи воздуха к горелке; 2 — горелка; 3 — топочная камера; 4 — взрывной клапан; 6 — смесительная камера; 6 — труба загрузочного устройства; 7 — опора барабана; 8 — барабан; 9 — привод вращения барабана; 10 — колодильник; 11 — разгрузочная камера; 12 — дымоход

Тепло к высушиваемому материалу передается главным образом за счет конвекции и, несмотря на перемешивающие лопасти, сушка происходит сравнительно медленно.

Удельный расход тепла на удаление 1 кг влаги из материала для барабанных сушил около 4—5 МДж/кг.

Сушила для сушки в пневмопотоке и кипящем слое

Эти сушила имеют высокую удельную производительность благодаря интенсивному протеканию процессов тепло- и массообмена и более быстрому удалению влаги из высушиваемого материала. В установках для сушки в пневмопотоке обеспечиваются условия существования взвешенного слоя, когда скорость потока сушильного агента превышает так называемую скорость витания твердых частиц, в результате чего последние уносятся потоком. В сушилах с кипящим слоем сыпучий материал под динамическим воздействием потока сушильного агента находится в разуплотненном состоянии и энергично перемешивается. Этим обеспечивается как резкое увеличение удельной поверхности нагрева, так и рост коэффициентов тепло- и массоотдачи.

Установка для сушки в пневмопотоке. Она представляет собой вертикальную трубу, изготовленную обычно из чугуна, в нижнюю часть которой из бункера через шлюзовой питатель подается влажный сыпучий материал (рис. 35-2). Здесь частички подхватываются восходящим потоком горячего сушильного агента (обычно это смесь продуктов сгорания и воздуха, поступающая из топки со скоростью от 10 до 40 м/с при температуре около 700 °С) и уносятся вверх по трубе. Пройдя трубу и освободившись от влаги, материал попадает в циклон, где он отделяется от газа-носителя и затем выгружается. Уходящие газы перед выбрасыванием в атмосферу подвергаются дополнительной очистке в циклоне с увлажнением.

Сушило с кипящим слоем. Это сушило (рис. 35-3) представляет собой камеру, дно которой выполнено в виде решетки. На решетку помещают слой подлежащего сушке сыпучего материала, а под решетку подводят горячий (с темпера-

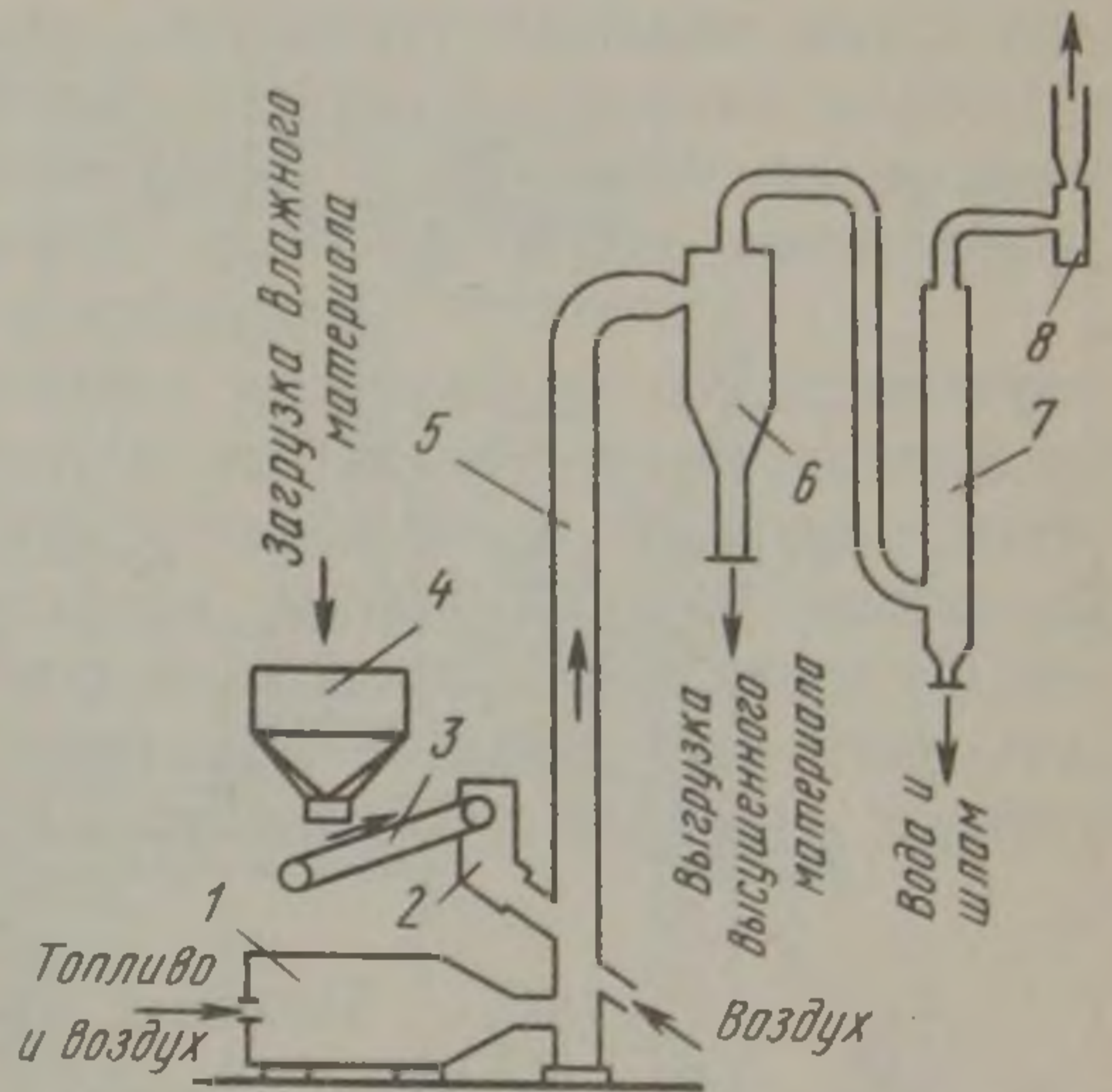


Рис. 35-2. Схема установки для сушки сыпучих материалов в пневмопотоке;

1 — топка; 2 — шлюзовой питатель; 3 — ленточный конвейер; 4 — загрузочный бункер; 5 — вертикальная сушильная труба; 6 — разгрузочный циклон; 7 — циклон для очистки уходящих газов; 8 — вентилятор высокого давления

турой 800—850 °С) сушильный агент из топки и из смесительной камеры с таким давлением, чтобы частицы материала находились во взвешенном состоянии, но не уносились бы потоком газов, как в случае сушки в пневмопотоке. Газы, проходящие через кипящий слой, быстро высушивают материал благодаря высокой интенсивности тепло- и массообмена. Удельная производительность (отнесенная к площади решетки) сушил кипящего слоя высока и достигает 7500 кг/(м²·ч) при удельном расходе тепла

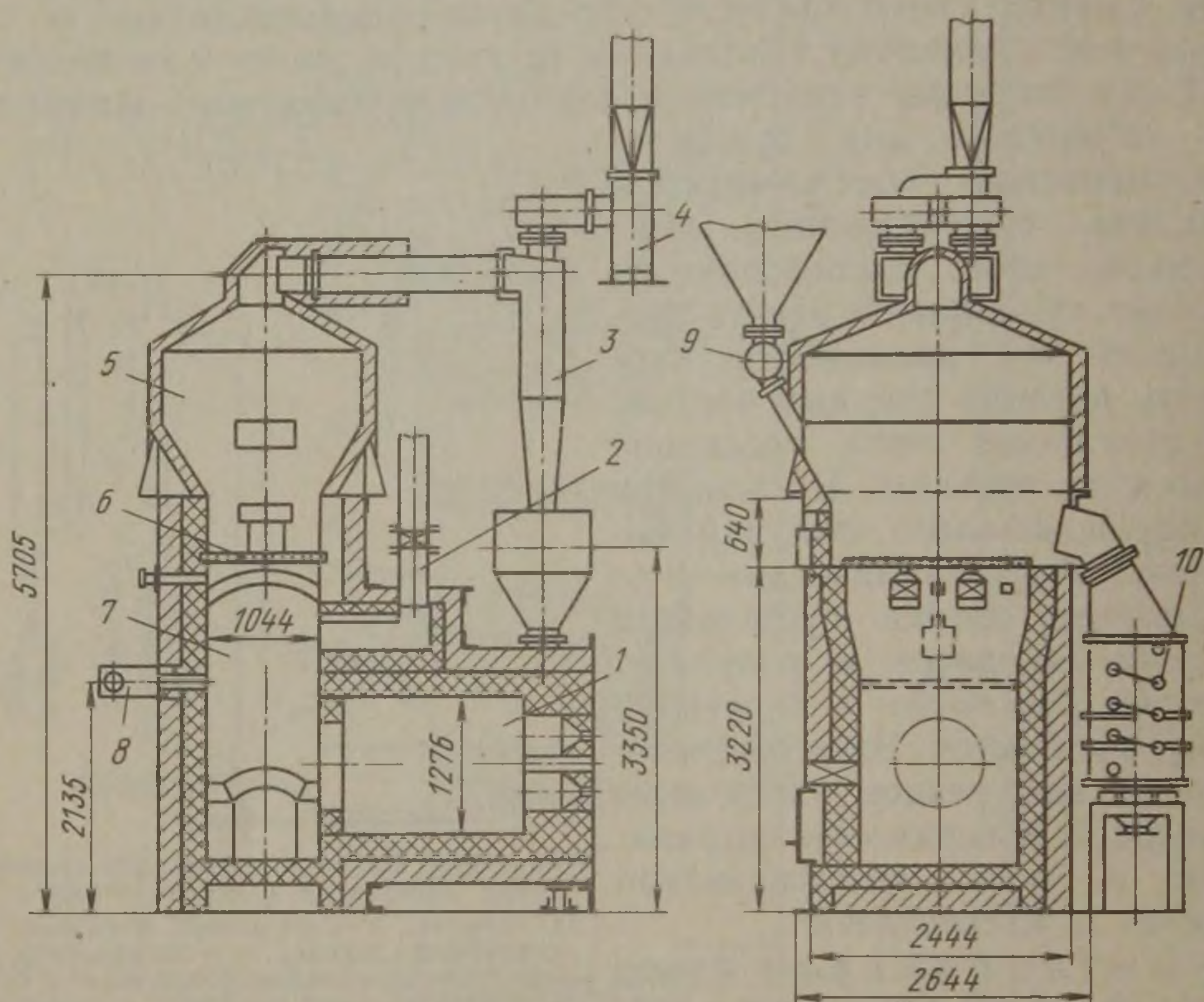


Рис. 35-3. Сушило с кипящим слоем:

1 — топка; 2 — труба для удаления продуктов сгорания при пуске и разогреве сушила; 3 — циклон; 4 — дымосос; 5 — рабочая камера; 6 — решетка; 7 — смесительная камера; 8 — подвод холодного воздуха для разбавления продуктов сгорания; 9 — загрузочное устройство; 10 — холодильник для охлаждения сухого сыпучего материала

на удаление 1 кг влаги из высушиваемого материала около 3,6—4,5 МДж/кг. Высушенный материал поступает из рабочей камеры в холодильник, где остывает до температуры ~50 °С и затем выгружается из установки. Верхняя часть рабочей камеры выполняется с несколько большим поперечным сечением для того, чтобы снизить скорость движения сушильного агента и тем самым уменьшить вынос мелких фракций из рабочей камеры. Уходящие из камеры газы перед выбрасыванием их в атмосферу очищаются от пыли в циклоне.

Сушильные установки с кипящим слоем получают все более широкое распространение благодаря эффективности их работы, возможности автоматизации и простоте регулирования.

2. Установки для сушки изделий

Различные способы подвода тепла к сушимым изделиям (литейным формам, стержням, огнеупорным изделиям и т. д.) определяют в первую очередь особенности конструкции сушильных установок. Так, нагрев может осуществляться либо путем генерации тепла в самом высушиваемом материале (сушила ТВЧ), либо путем передачи тепла к поверхности материала извне как излучением, так и конвекцией. Наибольшее распространение в промышленности получили сушила, в которых тепло к материалу передается конвекцией от продуктов сгорания, смешанных с воздухом или возвратом.

На конструкцию сушила также оказывает влияние масса высушиваемых изделий. Для сушки сравнительно мелких изделий, которые могут быть легко перемещены через рабочую камеру сушильной установки при помощи разного рода конвейеров, применяют сушила непрерывного действия.

Крупные изделия, которые нельзя непрерывно транспортировать через рабочие камеры, сушат в установках периодического действия с выкатными этажерками и тележками. Загрузка изделий при этом облегчается благодаря кран-балкам и мостовым кранам. Особо крупные и громоздкие изделия, для которых потребовался бы очень мощный механизм выдвижения тележки, сушат в ямных сушилах со съемным сводом, а их загрузка ведется с помощью мостового крана.

Сушила с конвективным режимом работы

Сушила периодического действия. К ним относится камерное сушило с выкатной тележкой (платформой). Сушило состоит из рабочей камеры и двух топок, расположенных ниже пода камеры и соединенных с ней дымовыми каналами, играющими одновременно и роль смесительных камер (рис. 35-4). Стены и свод рабочей камеры сушила выполняют обычно из красного кирпича с наружным слоем. Двери камерных сушил представляют собой каркас, с двух сторон обшитый листовым железом; пространство между листами заполнено легковесным кирпичом или шлаковой ватой. Двери, как правило, открываются механизмами с электроприводом или пневмоцилиндром. Тележка с установленными на ней формами или крупными стержнями перемещается по уложенным на поду сушила рельсам с помощью лебедки.

В топках сушила сжигают любое топливо: твердое, жидкое или газообразное. Стены топочных камер футеруют шамотом. Продукты сгорания направляются из топок в дымовые каналы, расположенные под подом сушильной камеры вдоль продольных стен. В этих каналах для снижения температуры дыма его смешивают с воздухом или с уходящими газами (возвратом). Полученная смесь (сушильный агент) поступает в камеру через отверстия

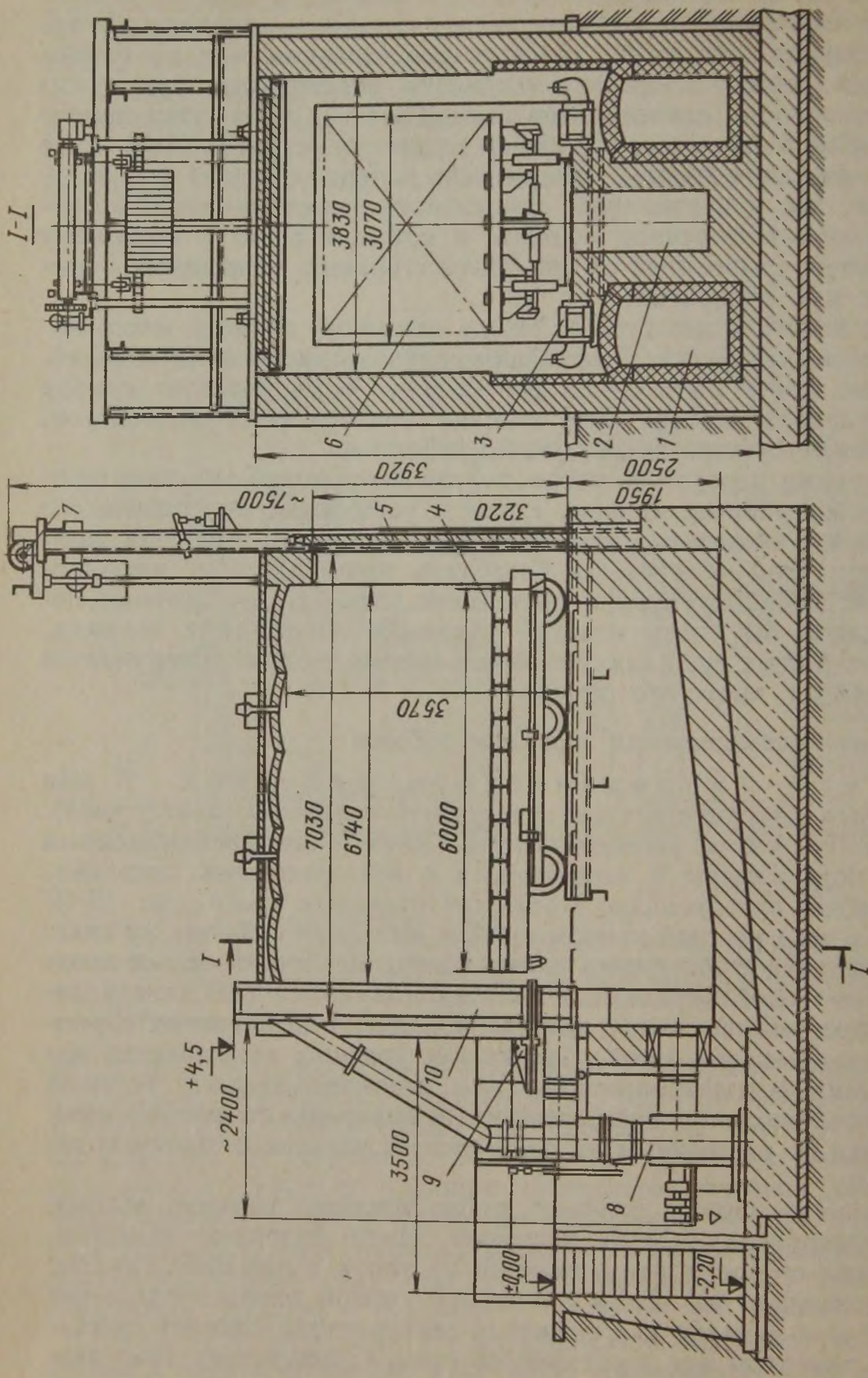


Рис. 35-4. Камерное сушило с выкатной тележкой:

1 — дымовой канал; 2 — дымовой бороз; 3 — короб для подачи и распределения возврата в рабочую камеру; 4 — выкатная платформа; 5 — дверь; 6 — рабочая камера; 7 — механизм подъема двери; 8 — рециркуляционный вентилятор; 9 — шибер; 10 — трубопровод для отвода отработанных газов

в сводах дымовых каналов. Поднимающиеся вверх потоки горячих газов вызывают естественную циркуляцию, способствующую выравниванию температуры по всему объему камеры и ускорению процесса сушки. Дымовые газы удаляются из камеры через боров, расположенный вдоль продольной оси камеры.

Для повышения интенсивности процессов сушки в камерных сушилах широко применяется принудительная циркуляция продуктов сгорания. Для этого часть отработанных продуктов отбирается из борова при помощи дымососа, находящегося вне сушила, и подается в коробки, расположенные по всей длине рабочей

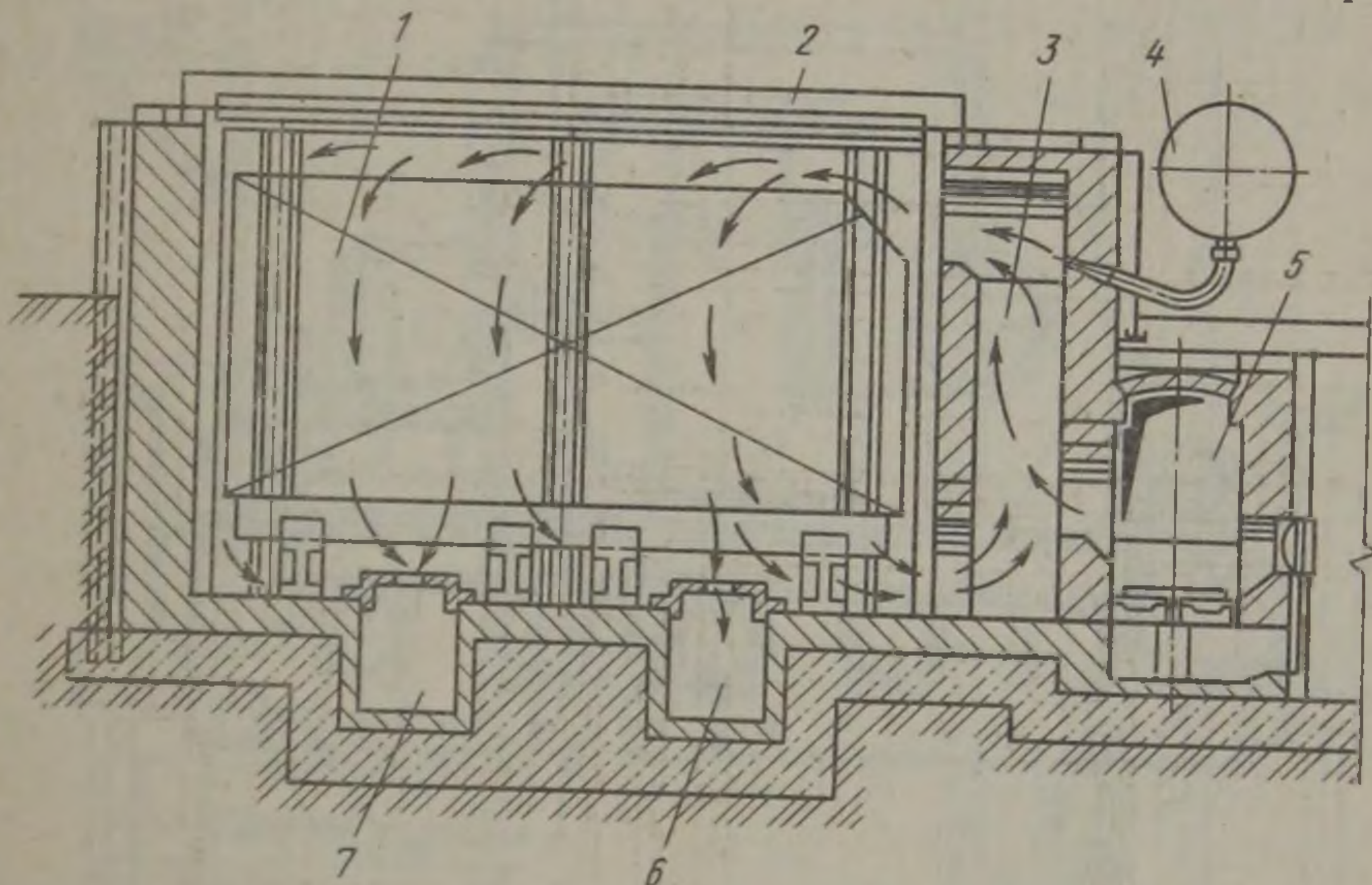


Рис. 35-Б. Ямное сушило

1 — рабочая камера; 2 — съемный свод; 3 — вертикальный канал; 4 — из дымососной установки; 5 — топка; 6 — в дымососную установку; 7 — дымовые борова

камеры сушила (внутри ее с обеих сторон, над сводами дымовых каналов). Выходящие с большой скоростью (15—20 м/с) из сопел коробов отработанные газы усиливают циркуляцию в камере сушила, интенсивно подсасывая свежие дымовые газы из отверстий в сводах дымовых каналов. Введение принудительной циркуляции сокращает продолжительность сушки в 1,3—1,5 раза.

При сушке мелких изделий их размещают на металлических этажерках,двигаемых в рабочую камеру. Для облегчения перемещения этажерки делают сравнительно небольшими: в сушиле, как правило, помещают 2—4 этажерки одновременно.

Ямное сушило (рис. 35-Б) применяют для сушки крупных литейных форм. Рабочая камера ямного сушила располагается ниже уровня пода цеха, и загрузка форм в нее осуществляется через съемный свод мостовым краном. Так как топка в ямном сушиле расположена рядом с рабочей камерой, то для обеспечения движения газов применяют принудительную циркуляцию. Продукты

сгорания поступают из топки в вертикальный канал, в который снизу подсасывается возврат за счет инжектирующего действия струи отработанных дымовых газов, подаваемых дымососной установкой. Дымовые газы поступают в сушильную камеру из вертикальных каналов через отверстия.

В камерных и ямных сушилах расход топлива на удаление 1 кг влаги из высушиваемого материала составляет 13,5—20 МДж/кг.

Для поверхностной подсушки литейных форм применяют переносные установки, устанавливаемые над предназначенными для

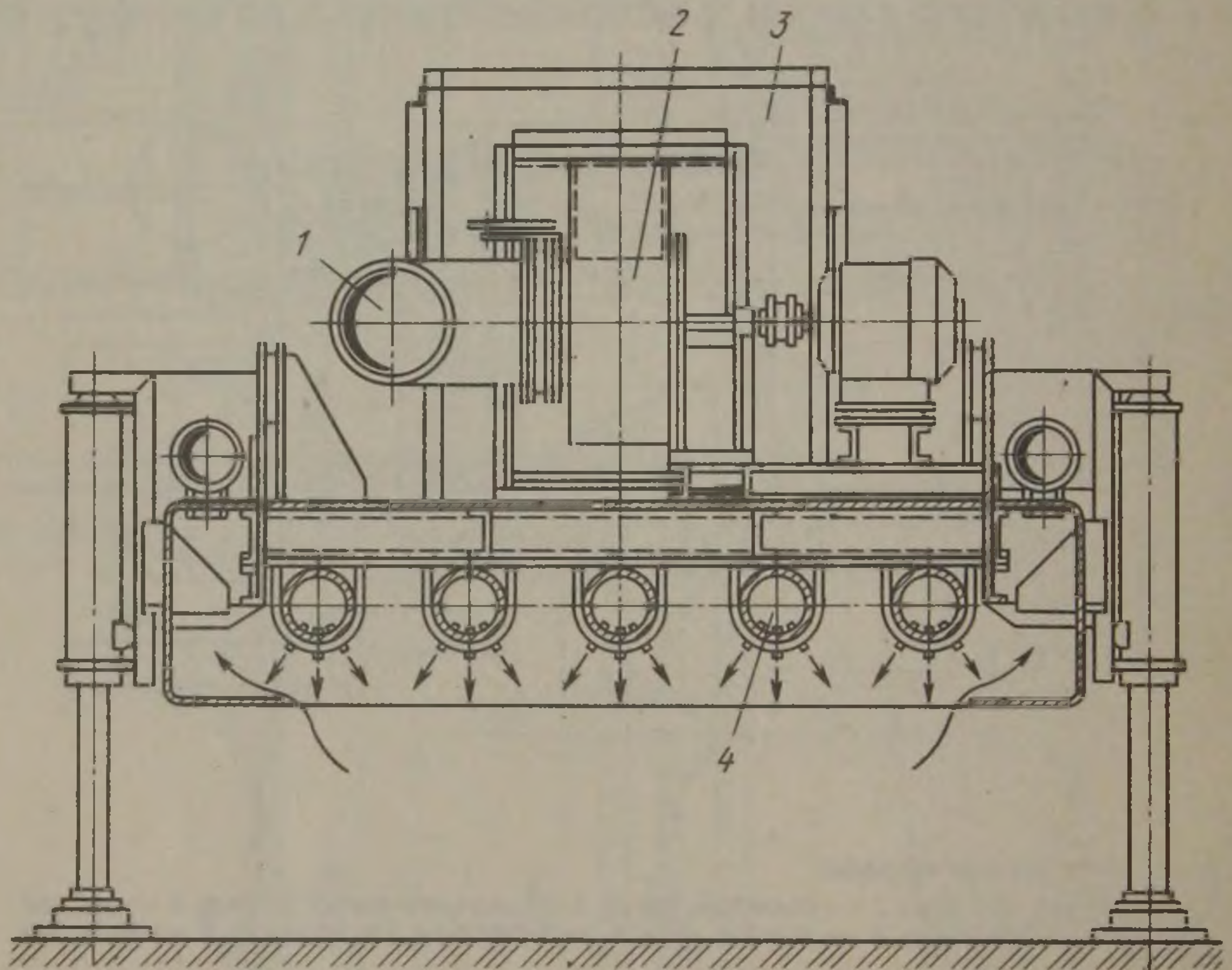


Рис. 35-6. Переносное сушило для поверхностной подсушки форм горячим воздухом:

1 — сборный воздухопровод; 2 — вентилятор; 3 — электрокалорифер; 4 — распределительные воздухопроводы

подсушки полуформами (рис. 35-6). Воздух, забираемый вентилятором из окружающего пространства, направляется в калорифер, представляющий собой теплоизолированную камеру с установленными в ней электрическими нагревателями сопротивления. Нагреватели, обдуваемые воздухом, нагревают его до температуры 300—350 °С, после чего горячий воздух поступает в распределительные воздухопроводы, расположенные внизу рамы. Каждый воздухопровод имеет сопла, через которые горячий воздух с большой скоростью направляется на поверхность литейной формы.

Сушила непрерывного действия. Сушильные установки непрерывного действия представляют собой вытянутые (в высоту или в длину) камеры, внутри которых с помощью конвейеров различных конструкций высушиваемые изделия перемещаются от загрузочного к разгрузочному концу.

Вертикальное конвейерное сушило (рис. 35-7) выполняют в виде башни со стенами рамно-щитовой конструкции. Пространство между внутренним и внешним стальными листами обшивки рам заполняют теплоизоляционным материалом. Внутри сушила

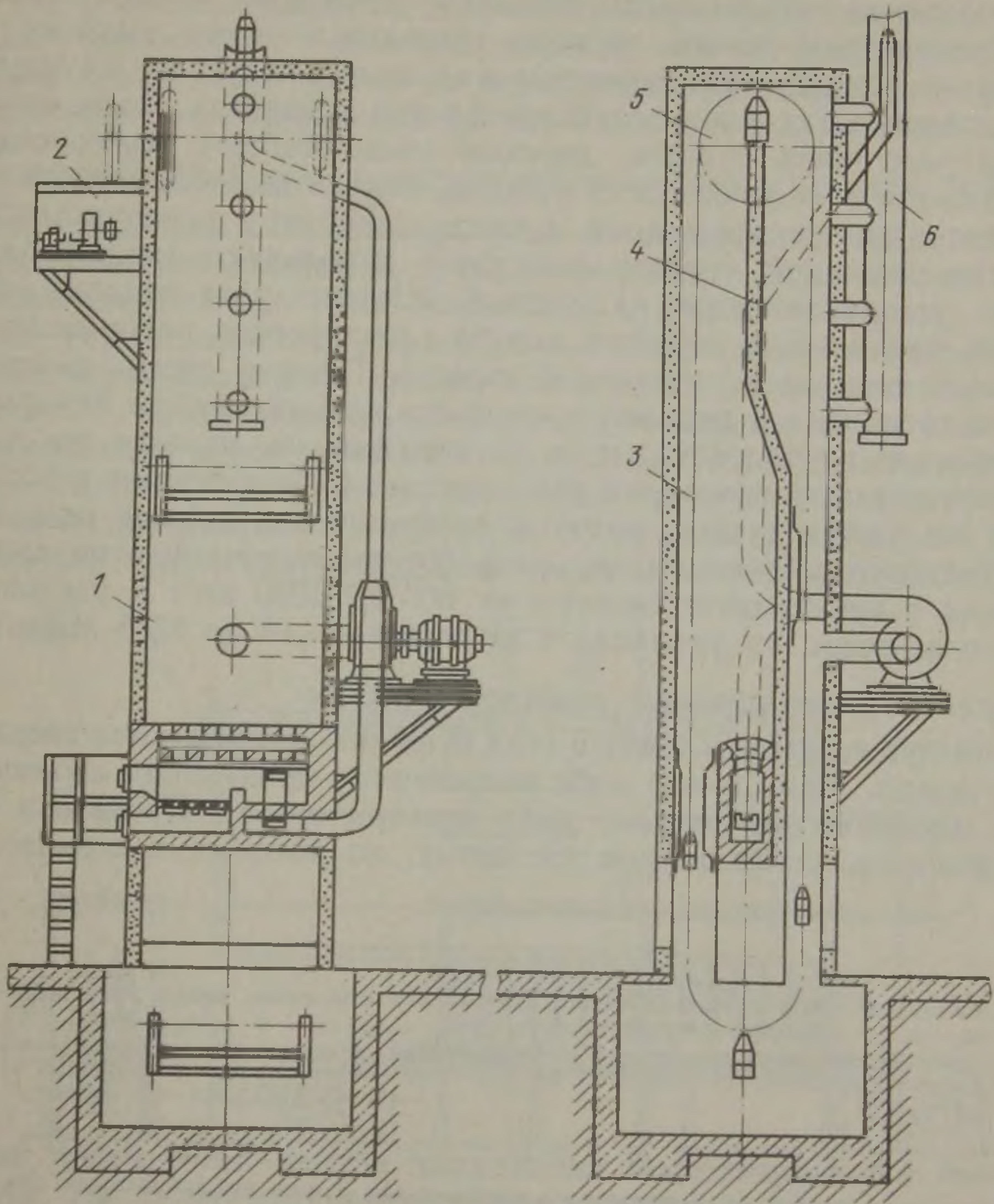


Рис. 35-7. Вертикальное конвейерное сушило:

1 — рабочее пространство; 2 — привод; 3 — цепь конвейера; 4 — продольная перегородка; 5 — ведущее колесо; 6 — дымовая труба

движется вертикальной конвейер, состоящий из двух непрерывных роликовых цепей с подвешенными на них этажерками. На полки этажерок укладывают подвергаемые сушке изделия. Загрузка производится со стороны восходящей ветви конвейера, разгрузка — с противоположной стороны, причем эти операции обычно механизированы.

Топка сушила находится между двумя ветвями конвейера; ее размещают выше уровня загрузочного и разгрузочного окон,

чтобы предотвратить выбивание горячих дымовых газов. Топка расположена внутри смесительной камеры, в которой происходит перемешивание выходящих из топки продуктов сгорания с холодным воздухом или отработанными газами. Наружная камера одновременно играет роль тепловой изоляции кладки топки. Приготовленный таким образом сушильный агент выходит из камеры смешения через отверстия в ее своде и поступает в сушильную камеру со стороны восходящей ветви конвейера. Поднявшись в верхнюю часть сушила, дымовые газы огибают перегородку, опускаются в нижнюю часть сушила, откуда дымососом часть их отводится для рециркуляции, а часть поступает в дымовую трубу. Вместо сплошной перегородки часто используют газоотбойные щиты, устанавливаемые над топкой. Изменяя угол наклона этих щитов при помощи лебедки, можно регулировать распределение газовых потоков в сушильной камере. Помимо этого, дымовая труба соединена с верхней частью сушильной камеры четырьмя короткими трубопроводами с заслонками на каждом из них. Все эти средства позволяют регулировать работу сушила и подбирать тот режим сушки, который требуется для данных изделий.

Институтом «Теплопроект» разработаны типовые вертикальные сушила с производительностью от 800 до 2500 кг/ч и удельным расходом тепла на удаление 1 кг влаги от 18 до 26,5 МДж/кг.

Сушила с радиационным режимом работы

В качестве источника тепла в этих сушилах используются твердые излучатели. Ими служат либо нагреваемые продуктами сжигания газа керамические панели, либо электрические нагреватели сопротивления, размещенные на щитах, из которых и собирается

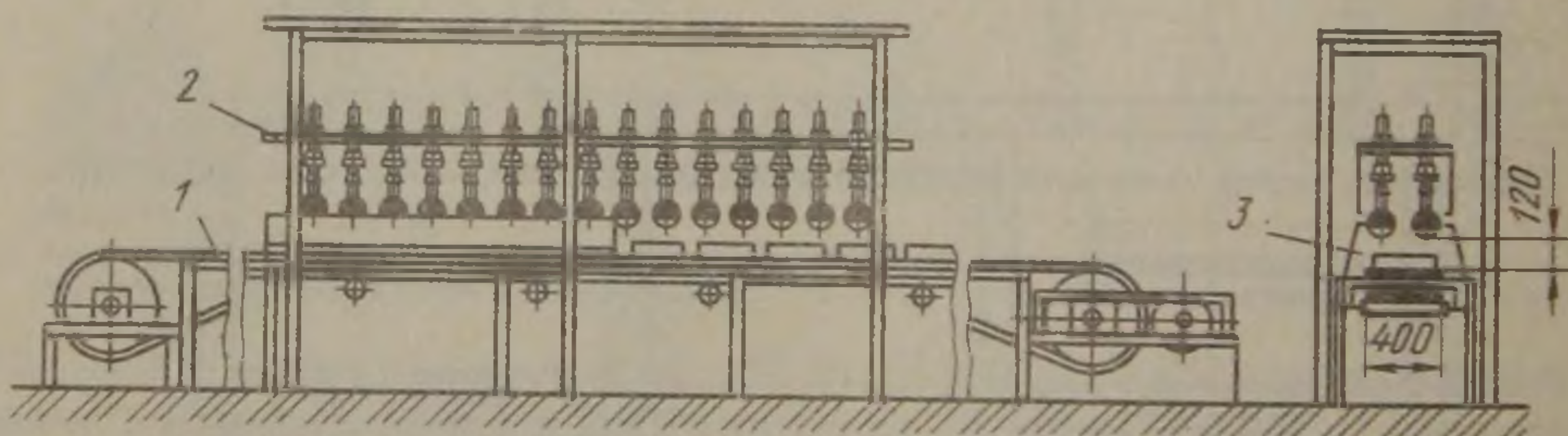


Рис. 35-8. Установка непрерывного действия для сушки инфракрасными лучами:

1 — транспортер; 2 — рама с лампами инфракрасного излучения; 3 — отражатель

рабочая камера сушила, либо специальные инфракрасные лампы накаливания, обеспечивающие плотность теплового потока 0,5—0,8 Вт/м².

Сушила с радиационным режимом работы выполняют как периодического действия (переносные для поверхностной подсушки литейных форм), так и непрерывного действия. В случае использования инфракрасных ламп их устанавливают на рамах с расположенными в них (обычно в шахматном порядке) специальными патронами. На рис. 35-8 показана установка непрерывного

действия для поверхностной подсушки, представляющая собой колпак, внутри которого установлена рама с лампами. Изделия внутри сушила перемещаются при помощи ленточного транспортера.

При использовании электрических нагревателей сопротивления или обогреваемых газом излучающих панелей конструкция сушила аналогична, только на каркасе рабочей камеры устанавливают не рамы с лампами, а панели или щиты с нагревателями.

Установка для сушки в высокочастотном электрическом поле

Эти установки в отличие от всех рассмотренных выше сушил, представляющих собой печи-теплообменники, являются печами — теплогенераторами. Если поместить сушимый материал (являющийся, как правило, диэлектриком) в переменное электрическое поле, в нем возникают механические силы, вызывающие поляризацию, т. е. перемещение электрических зарядов в том или ином направлении в соответствии с их знаком. Переменность электрического поля приводит к изменению поляризации диэлектрика с частотой, равной частоте поля, в которое он помещен. В результате происходит выделение тепла и нагрев материала. При

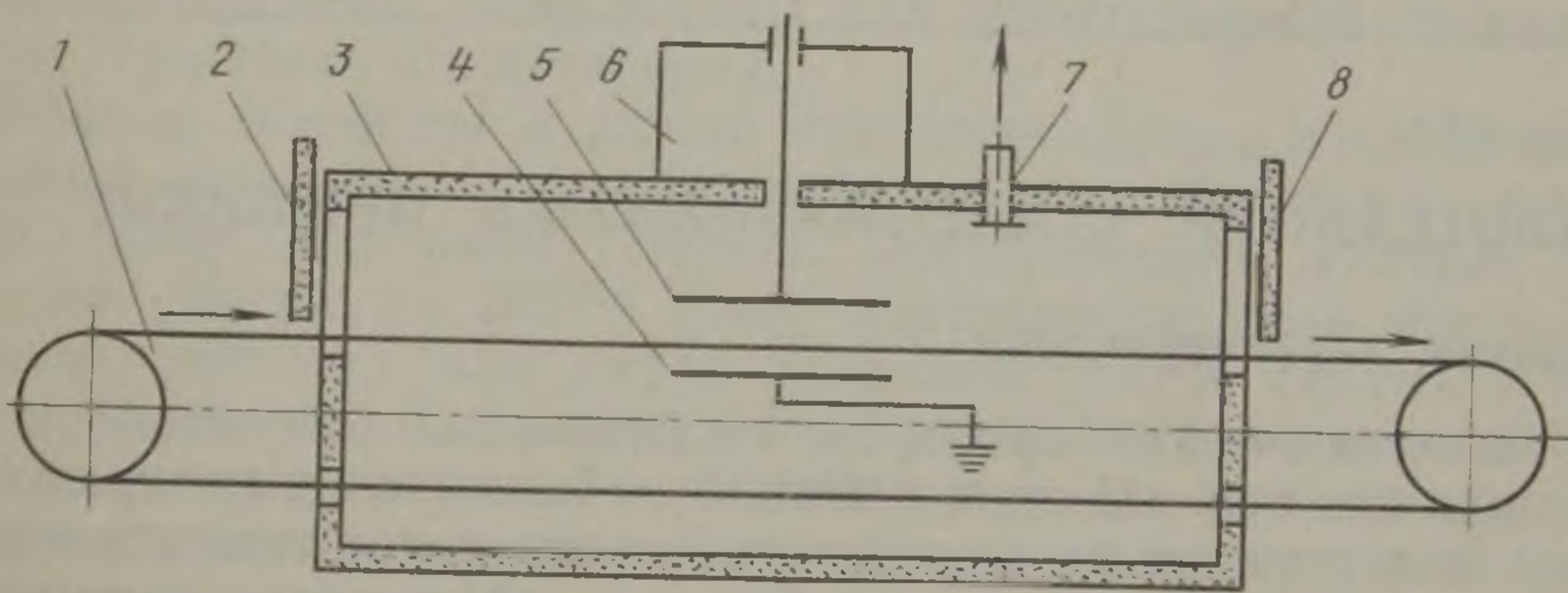


Рис. 35-9. Схема установки для сушки стержней токами высокой частоты:
 1 — транспортер; 2 — входная дверца; 3 — панели с тепловой изоляцией;
 4 — нижний неподвижный электрод; 5 — верхний подвижный электрод;
 6 — механизм подъема электрода и подвод ТВЧ; 7 — отвод паров и газов из сушила; 8 — выходная дверца

этом температура центра тела выше температуры его поверхности, где тепло расходуется на испарение и потери в окружающую среду. В этом случае термовлагопроводность имеет тот же знак, что и влагопроводность, и способствует ускорению процесса сушки.

Схематическое изображение сушила непрерывного действия для сушки в электрическом поле высокой частоты приведено на рис. 35-9. Изделия с помощью транспортера перемещаются от входа до выхода сушильной камеры, стены которой выполнены из металлических панелей с теплоизоляцией. Над транспортером расположен один из электродов в виде металлической пластины, а второй (такой же) помещен под верхней ветвью транспортера. Для изменения расстояния между электродами и высушиваемыми

изделиями (в зависимости от габарита изделия) верхний электрод выполнен подвижным. К электродам подводится ток частотой от 1 до 50 мГц. Образующийся в процессе сушки водяной пар отсасывается вентилятором. Для лучшего удаления влаги из сушильной камеры в нее можно подавать воздух, подогретый до 120—180 °С.

Сушила ТВЧ имеют значительные преимущества перед сушилками с внешним подводом тепла. Продолжительность сушки в них сокращается благодаря совпадению знаков влагопроводности и термовлагопроводности и значительно улучшаются условия труда. Однако эти установки не получили пока широкого распространения в промышленности из-за сложности и высокой стоимости электрооборудования.

Раздел X ПЕЧИ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ С ТЕПЛОГЕНЕРАЦИЕЙ ЗА СЧЕТ ВЫГОРАНИЯ ПРИМЕСЕЙ МЕТАЛЛА

Глава 36

ТЕПЛОТЕХНИКА СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

1. Общая характеристика

Все технологические процессы, свойственные получению стали, совершаются при высоких (1500 °С и более) температурах. При любых конструкциях сталеплавильных агрегатов технологические процессы совершаются в сталеплавильной ванне — части печи, заполненной расплавленным металлом. Для поддержания необходимой температуры сталеплавильную ванну надо снабжать тепловой энергией, которая может поступать в ванну или извне или выделяться непосредственно в расплавленном металле. В первом случае тепло выделяется вне ванны в результате сжигания топлива или использования электрической энергии и передается поверхности ванны излучением и конвекцией. Таким образом работают мартеновские и электрические сталеплавильные печи. В другом случае тепло выделяется в самой сталеплавильной ванне или в результате окисления примесей, содержащихся в расплавленном чугуне, или в результате приложения электромагнитного поля (индукционные электрические печи). С использованием тепловой энергии, выделяющейся при окислении примесей (главным образом углерода), работают конвертеры.

Как следует из вышесказанного (см. гл. 2) положений общей теории печей М. А. Глинкова, сталеплавильные печи первой группы относятся к печам-теплообменникам, второй группы —

к печам-теплогенераторам. Возможны и промежуточные случаи. Так, при работе мартеновской печи без продувки жидкой ванны кислородом тепло, выделяющееся при окислении углерода, уже играет заметную роль в общем тепловом балансе агрегата. Однако в настоящее время, с целью повышения производительности мартеновских печей находит все большее распространение продувка жидкой ванны кислородом, при которой выделение тепла в результате окисления примесей чугуна наряду с теплом, поступающим в ванну извне играет решающую роль. Такие печи, в которых жидкая металлическая ванна получает тепло как извне, так и в результате теплогенерации в жидком металле, занимают промежуточное положение между печами-теплообменниками и печами-теплогенераторами.

Тепловая работа мартеновских печей в огромной степени зависит от метода сжигания топлива, от характеристик факела (см. гл. 4). Факел должен иметь необходимые температуру, теплообменные и массообменные характеристики. Факел должен обладать необходимой настильностью (соприкасаться с возможно большей частью поверхности сталеплавильной ванны), без чего невозможно обеспечить должную интенсивность передачи ванне тепла и кислорода, необходимых для осуществления технологических процессов сталеварения.

Важным моментом в работе сталеплавильных печей-теплообменников является то, что эти печи могут переплавлять практически любое количество скрапа. Электрические дуговые печи работают обычно на 100 % лома, мартеновские печи могут, как известно, работать как скрап-процессом (100 % скрапа и твердого чугуна), так и скрап-рудным процессом, в котором наряду со скрапом используется и жидкий чугун. На заводах с полным металлургическим циклом, обеспечивающим выплавку подавляющего количества стали в нашей стране, мартеновские печи работают скрап-рудным процессом и, что очень важно, переплавляют большое количество скрапа.

Современная промышленность развивается очень бурными темпами, что влечет за собой стремительное изменение ее качественного уровня и, как следствие, частую смену устаревшего оборудования. Все это порождает образование большого количества стального лома (скрапа). Было бы, конечно, неразумно получать сталь из жидкого чугуна, не перерабатывая накапливающийся стальной лом. Поэтому сталеплавильные агрегаты должны обладать способностью использовать в завалку не только жидкий чугун, но и скрап. Мартеновские печи, обеспечивающие питание сталеплавильной ванны теплом извне, в этом отношении практически ограничения не имеют. Иная картина имеет место при работе сталеплавильных конвертеров.

На тепловую работу конвертеров прежде всего большое влияние оказывает вид используемого окислителя, которым в принципе могут быть или кислород воздуха или чистый кислород и

которые имеют совершенно различные тепловые эквиваленты (см. том 1, гл. 24). С использованием воздушного дутья работали и еще иногда работают бессемеровские и томассовские конвертеры; с использованием чистого кислорода — современные кислородные конвертеры. И воздух и кислород подаются в конвертеры холодными. Однако газообразные продукты плавки уходят из сталеплавильного агрегата приблизительно при температуре сталеплавильной ванны. Таким образом азот воздушного дутья¹, поступив в сталеплавильную ванну холодным, уходит из ванны конвертера с температурой около 1600 °С и уносит с собой огромное количество тепла.

В мартеновских печах этого нет, так как азот воздуха, идущего на горение, в сталеплавильную ванну не попадает и не остужает ее. В воздушных конвертерах унос азотом дутья большого количества тепла приводит к тому, что в сталеплавильной ванне не остается запаса тепла, которое могло бы быть израсходовано на нагрев и плавление скрапа. Поэтому воздушные конвертеры работали практически только на жидком чугуна, переплавляя ничтожное количество скрапа. Это обстоятельство и послужило одной из причин того, что воздушные конвертеры не получили распространения. Использование чистого кислорода в конвертерной плавке резко изменило структуру теплового баланса и позволило иметь избыток тепла, который можно использовать для нагрева и плавления скрапа. Использование скрапа в кислородном конвертере выполняет и другую, смежную задачу, связанную с необходимостью использования указанного избытка тепла, так как в противном случае в конвертере разовьется чрезмерная температура и конвертер выйдет из строя.

Однако различные способы использования чистого кислорода в конвертерах, связанные с методом подачи кислорода и конструкцией конвертера, породили дополнительные теплотехнические аспекты этой проблемы. Углерод — как основная примесь чугуна может окисляться как до СО, так и до СО₂. Очевидно, что при окислении углерода до СО₂ выделяется больше тепла, чем при окислении до СО. В кислородных конвертерах с верхней вертикальной подачей кислорода, углерод окисляется, в основном до СО, что влечет за собой возможность использования в завалку 20—25 % скрапа — это приемлемо, но недостаточно. В иных конвертерах, где образовавшееся в ванне СО дожигается до СО₂, количество скрапа в завалке может быть увеличено до 40—45 %.

Повышение количества скрапа в завалку может быть достигнуто также применением предварительного подогрева скрапа или в самом конвертере или вне его. В настоящее время наиболее распространенные кислородные конвертеры с вертикальной

¹ Напомним, что азота в воздухе в 3,76 раза больше, чем кислорода (по объему).

(сверху) подачей кислорода (ЛД-конвертеры) почти повсеместно работают с предварительным подогревом скрапа чаще всего в самом конвертере, для чего используются специальные газо-кислородные фурмы.

Таким образом, из вышеизложенного следует, что развитие и совершенствование сталеплавильных агрегатов связано с теплотехникой процесса, для понимания которой необходимо, прежде всего, тщательное знакомство с тепловым балансом рабочего пространства агрегата.

2. Тепловой баланс рабочего пространства сталеплавильного агрегата

Как справедливо отмечал в своих работах М. А. Глинков, основные различия между сталеплавильными процессами заключаются в разной структуре теплового баланса, которая в значительной степени определяет тип и конструкцию сталеплавильного агрегата. Сталеплавильные агрегаты работают в периодическом режиме, поэтому тепловой баланс обычно составляется на продолжительность периода плавки — t , ч. Уравнение теплового баланса для этих условий может быть записано следующим образом:

$$Q_{x.t} + Q_{ф.т+в} + Q_c + Q_{экз} + Q_{ф.ск} + Q_{ф.ч} = \\ = Q_m + Q_{шл} + Q_{энд} + Q_{ух. пр. гор} + Q_{ух. пр. ок} + Q_{ух N_2} + q_{пот}, \quad (36-1)$$

где $Q_{x.t}$ — химическое тепло топлива, кДж/период; $Q_{ф.т+в}$ — физическое тепло топлива и воздуха, поданного для горения, кДж/период; Q_c — количество тепла, выделившееся при окислении углерода жидкого чугуна, кДж/период; $Q_{экз}$ — тепло экзотермических реакций (кроме окисления углерода), кДж/период; $Q_{ф.ск}$ — физическое тепло скрапа, кДж/период; $Q_{ф.ч}$ — физическое тепло жидкого чугуна, кДж/период; Q_m и $Q_{шл}$ — физическое тепло металла и шлака, кДж/период; $Q_{энд}$ — тепло эндотермических реакций, кДж/период; $Q_{ух. пр. гор}$ — физическое тепло уходящих продуктов сгорания топлива, кДж/период; $Q_{ух. пр. ок}$ — физическое и химическое тепло уходящих продуктов окисления примесей, кДж/период; $Q_{ух N_2}$ — физическое тепло, уносимое азотом дутья, кДж/период; $q_{пот}$ — все виды тепловых потерь за период t ч, кДж/период.

Общее уравнение теплового баланса может видоизменяться в зависимости от типа сталеплавильного агрегата.

Для мартеновской печи $Q_{ух. N_2} = 0$ и обычно $Q_{ф.ск} = 0$.

Для любого конвертера $Q_{x.t} = 0$; $Q_{ф.т+в} = 0$; $Q_{ух. пр. гор} = 0$.

Для кислородного конвертера, кроме того, $Q_{ух N_2} = 0$.

Таким образом уравнение теплового баланса кислородного конвертера будет выглядеть следующим образом

$$Q_C + Q_{\text{экс}} + Q_{\text{ф. ск}} + Q_{\text{ф. ч}} = Q_M + Q_{\text{шл}} + Q_{\text{энд}} + Q_{\text{ух. пр. ок}} + q_{\text{пот}} \quad (36-2)$$

Следует отметить, что величина Q_C может быть представлена как состоящая из двух слагаемых $Q_C = Q_{C \rightarrow CO} + Q_{CO \rightarrow CO_2}$. Конечно, нельзя абсолютно точно утверждать, что углерод, содержащийся в расплавленном металле, окисляется только до CO. Однако экспериментальными работами установлено, что окисление углерода до CO носит преобладающий характер. Следовательно,

$$Q_{C \rightarrow CO} + Q_{CO \rightarrow CO_2} + Q_{\text{экс}} = Q_M + Q_{\text{шл}} + Q_{\text{энд}} + Q_{\text{ух. пр. ок}} + q_{\text{пот}} - Q_{\text{ф. ск}} - Q_{\text{ф. ч}} \quad (36-3)$$

Поскольку масса выпускаемой стали складывается практически из массы скрапа и массы чугуна, постольку $Q_M = Q_{\text{ск}} + Q_{\text{ч}}$, где $Q_{\text{ск}}$ — тепло, которое уносит часть выпускаемой стали, полученная за счет скрапа, кДж/период; $Q_{\text{ч}}$ — то же, за счет чугуна, кДж/период.

Таким образом разница $\Delta Q_{\text{ск}} = Q_{\text{ск}} - Q_{\text{ф. ск}}$ определяет количество тепла, пошедшее на нагрев скрапа до температуры плавления $T_{\text{пл}}$, на его плавление и догрев расплавленного скрапа до температуры выпускаемой стали $T_{\text{ст}}$. Величина $\Delta Q_{\text{ск}}$ может быть выражена следующим образом:

$$\Delta Q_{\text{ск}} = G_{\text{ск}} (c_{\text{с2}} T_{\text{пл}} - c_{\text{с1}} T_{\text{нач. ск}}) + G_{\text{ок}} q_{\text{пл}} + G_{\text{ск}} (c_{\text{с3}} T_{\text{ст}} - c_{\text{с2}} T_{\text{пл}}), \quad (36-4)$$

где $G_{\text{ск}}$ — масса скрапа, кг/период; $T_{\text{ст}}$ — температура готовой стали, К; $T_{\text{пл}}$ — температура плавления скрапа, К; $T_{\text{нач. ск}}$ — начальная температура скрапа, К; $c_{\text{с1}}$; $c_{\text{с2}}$; $c_{\text{с3}}$ — теплоемкость скрапа соответственно при температурах $T_{\text{нач. ск}}$, $T_{\text{пл}}$ и $T_{\text{ст}}$, кДж/(кг·К); $q_{\text{пл}}$ — теплота плавления скрапа, кДж/кг. Сделав преобразования, получим

$$\Delta Q_{\text{ск}} = G_{\text{ск}} \{ (c_{\text{с3}} T_{\text{ст}} - c_{\text{с1}} T_{\text{нач. ск}}) + q_{\text{пл}} \}.$$

Если скрап холодный ($T_{\text{нач. ск}} = 0$), то

$$\Delta Q_{\text{ск}} = G_{\text{ск}} (c_{\text{с3}} T_{\text{ст}} + q_{\text{пл}}).$$

Тепло, уносимое шлаком, приближенно можно выразить следующим равенством

$$Q_{\text{шл}} = G_{\text{ч}} Q'_{\text{шл}},$$

в котором $G_{\text{ч}}$ — масса чугуна, кг/период; $Q'_{\text{шл}}$ — тепло, уносимое шлаком в течение периода плавки в расчете на 1 кг чугуна, кДж/кг.

Так же, как и скрап, залитый жидкий чугун необходимо догреть до $T_{ст}$. На это расходуется следующее количество тепла

$$\Delta Q_{ч} = Q_{ч} - Q_{ф.ч}$$

или

$$\Delta Q_{ч} = G_{ч} (c_{ч2} T_{ст} - c_{ч1} T_{нач.ч}),$$

где $T_{нач.ч}$ — начальная температура чугуна, К; $c_{ч1}$ и $c_{ч2}$ — теплоемкость чугуна соответственно при $T_{нач.ч}$ и при $T_{ст}$.

Если перейти к использованию величин тепловых эквивалентов и обозначить: A — процентное содержание выгорающего углерода в чугуне и Π_i — процентное содержание каждой i -той примеси (кроме углерода), содержащейся в чугуне и окислившейся в процессе плавки, то можно приближенно¹ написать

$$\begin{aligned} G_{ч} \frac{A}{100} (Q_{эквСО} + Q_{эквСО_2}) + G_{ч} \sum \frac{\Pi_i}{100} Q_{экв i} = \\ = G_{ск} [(c_{с3} T_{см} - c_{с1} T_{нач.ск}) + q_{пл}] + G_{ч} (c_{ч2} T_{ст} - \\ - c_{ч1} T_{нач.ч}) + G_{ч} Q'_{шл} + Q_{энд} + Q_{ух. пр. ок} + q_{пот}, \end{aligned} \quad (36-5)$$

где $Q_{эквСО}$ — тепловой эквивалент окисления углерода до СО в расчете на 1 кг углерода, кДж/кг углерода; $Q_{эквСО_2}$ — тепловой эквивалент окисления СО в СО₂ также в расчете на 1 кг углерода, кДж/кг углерода; $Q_{экв i}$ — тепловой эквивалент каждой (кроме углерода) i -той примеси, окисляющейся в ванне в расчете на 1 кг окисляющегося элемента, кДж/кг i -той примеси.

Если все члены уравнения (36-5) поделить на величину массы чугуна $G_{ч}$, то получим

$$\begin{aligned} \frac{A}{100} (Q_{эквСО} + Q_{эквСО_2}) + \sum \frac{\Pi_i}{100} Q_{экв i} = \frac{G_{ск}}{G_{ч}} [(c_{с3} T_{см} - \\ - c_{с1} T_{нач.ск}) + q_{пл}] + (c_{ч2} T_{ст} - c_{ч1} T_{нач.ч}) + Q'_{шт} + \\ + \frac{Q_{энд} + Q_{ух. пр. ок} + q_{пот}}{G_{ч}}, \end{aligned} \quad (36-6)$$

откуда

$$\begin{aligned} \frac{A}{100} (Q_{эквСО} + Q_{эквСО_2}) + \sum \frac{\Pi_i}{100} Q_{экв i} - (c_{ч2} T_{ст} - \\ - c_{ч1} T_{нач.ч}) - Q'_{шт} - \frac{Q_{энд} + Q_{ух. пр. ок} + q_{пот}}{G_{ч}} \\ \frac{G_{ск}}{G_{ч}} = \frac{(c_{с3} T_{см} - c_{с1} T_{нач.ск}) + q_{пл}}{G_{ч}}. \end{aligned} \quad (36-7)$$

Если рассматривать работу конвертера определенного размера, работающего на чугуне определенного состава и по определенной технологии, что на практике бывает очень часто, то разность

¹ Не учтены углерод и другие примеси, содержащиеся в скрапе.

$\sum \frac{P_i}{100} Q_{\text{экв } i} - Q'_{\text{шл}}$ и частное $(Q_{\text{эвд}} + Q_{\text{ух. пр. ок}} + q_{\text{пот}})/G_{\text{ч}}$ изменяются мало.

Кроме того, изменение энтальпии единицы массы жидкого чугуна $(c_{\text{ч2}}T_{\text{ст}} - c_{\text{ч1}}T_{\text{нач. ч}})$ также достаточно постоянно.

И наконец, если скрап приблизительно одинакового состава и имеет $T_{\text{нач. ск}} = \text{const}$ (например, холодный), то знаменатель — величина, меняющаяся незначительно, и соотношение между массами скрапа и чугуна будет определяться в большой степени характером окисления углерода, так как

$$\frac{G_{\text{ск}}}{G_{\text{ч}}} = f \left[\frac{A}{100} (Q_{\text{экв CO}} + Q_{\text{экв CO}_2}) \right].$$

Необходимо подчеркнуть, что тепловой эквивалент $Q_{\text{экв CO}_2}$ существенно больше $Q_{\text{экв CO}}$ (приблизительно в три раза). Однако это не значит, что соответственно может быть увеличено соотношение $G_{\text{ск}}/G_{\text{ч}}$, поскольку дожигание CO в CO₂ производится вне металлической ванны и связано с соответствующими тепловыми потерями. Обычно конвертеры с дожиганием CO в пределах их рабочего пространства перерабатывают скрапа приблизительно вдвое больше, чем конвертеры без дожигания CO. Дожигание CO позволяет обеспечить передачу расплавленному металлу дополнительного количества тепла за счет повышения температуры в рабочем пространстве над металлом, излучательной способности газового объема, температуры кладки конвертера, что обеспечивает передачу дополнительного количества тепла металлу как излучением, так и в результате контакта металла с раскаленной кладкой при вращении конвертера.

3. Продувка сталеплавильной ванны кислородом

Цели и назначение продувки

В сталеплавильном производстве важнейшими являются процессы удаления примесей, в основе которых лежат реакции окисления. Именно окисление примесей является тем процессом, который в решающей степени определяет продолжительность плавки и производительность агрегата. В традиционном мартеновском скрап-рудном процессе (без продувки ванны) необходимый для окисления примесей кислород поступал в расплавленный металл из атмосферы печи через шлак и из железной руды, добавляемой в ванну с целью ускорения процесса удаления примесей. Процесс передачи кислорода через шлак определяется законами диффузии и осуществляется весьма медленно. Значительно ускорить процессы окисления примесей можно, обеспечив непосредственный контакт между газообразным кислородом и расплавленным металлом, применив продувку расплавленного металла газообраз-

ным кислородом. Применение продувки возможно как в течение всей плавки, так и в течение только определенного периода плавки.

Кислородное дутье в течение всей плавки используется в кислородных конвертерах, где как указывалось выше, питание агрегата теплом осуществляется за счет тепла, выделяющегося при окислении примесей. В отдельные периоды плавки кислородное дутье используется в мартеновских печах, работающих скрап-рудным процессом, в которых основная часть тепла поступает от сжигания топлива. При использовании кислородного дутья важнейшими являются процессы взаимодействия кислородной струи с расплавленным металлом, так как именно они определяют такие важные параметры как давление кислорода, его расход и скорость истечения, расположение кислородной формы над поверхностью металла. Все это, в свою очередь, определяет глубину проникновения кислорода в расплавленный металл, величину поверхности взаимодействия кислорода с расплавленным металлом, развитие барботажных процессов в сталеплавильной ванне.

Скорость истечения кислородной струи является важнейшим фактором процесса продувки (см. том 1, гл. 30). Увеличение скорости истечения усиливает проникновение газовой струи в расплавленный металл, значительно ускоряет окисление примесей. Однако увеличение скорости истечения кислорода влечет за собой повышенный угар железа и вызывает интенсивное разбрызгивание металла и шлака, что может привести к чрезмерному износу футеровки сталеплавильного агрегата.

Все это требует тщательного изучения особенностей взаимодействия кислородной (газокислородной) струи с расплавленным металлом.

Взаимодействие кислородной струи с металлом

Теоретические основы взаимодействия газовой струи с жидким металлом выше были достаточно подробно рассмотрены (см. том 1, гл. 30). Здесь кратко остановимся на тех особенностях этого взаимодействия, которые присущи взаимодействию кислородной струи с расплавленным металлом, осуществляемому в сталеплавильных процессах. Продувка кислородом в настоящее время осуществляется как в конвертерах, так и в подовых (мартеновских и двухванных) сталеплавильных печах.

В конвертерах, в зависимости от типа агрегата, продувка осуществляется сверху перпендикулярно (чаще всего) и под углом к поверхности расплавленного металла и снизу, в подовых печах только вертикально сверху. Таким образом наиболее распространенной в производстве стали является верхняя продувка расплавленного металла кислородом. Кислородное дутье подается через специальные устройства называемые фурмами. В кислородных конвертерах с верхним дутьем фурмы размещаются над металлом в начале и в конце плавки. В процессе интенсивного

окисления углерода под действием пузырей СО ванна вспенивается и средний, наиболее продолжительный по времени (приблизительно $\frac{3}{4}$ времени плавки) период плавки фурма работает в погруженном состоянии.

При продувке кислородом мартеновской плавки фурмы также в некоторых случаях размещаются над металлом и шлаком, хотя в настоящее время признано наиболее целесообразным размещать фурмы на границе шлак—металл. С положением фурм связана не только интенсивность окисления примесей чугуна, но и такое нежелательное явление, как разбрызгивание. Разбрызгивание шлака и металла является причиной износа, а иногда и преждевременного выхода футеровки сталеплавильного агрегата из строя.

Изучение взаимодействия кислородной струи с расплавленным металлом в промышленных условиях, практически, невозможно, поэтому подобные исследования выполнялись и выполняются на моделях с использованием положений теории подобия. При воздействии кислородной струи, выходящей из фурмы (расположенной над металлом) чаще всего со сверхзвуковой скоростью, в металле образуется впадина (кратер) с определенными глубиной и диаметром, которые и определяют величину поверхности реакционной зоны. Многочисленными наблюдениями установлено, что глубина и диаметр реакционной зоны зависят от величины критерия Архимеда, представляющего собой соотношение инерционных сил струи к выталкивающим (архимедовым) силам, препятствующим проникновению струи в жидкость

$$A_r = \frac{\rho_r \omega_r^2}{g \rho_{ж} d} \quad \text{или} \quad A_{r0} = \frac{\rho_{r0} \omega_{r0}^2}{g \rho_{ж} d_0},$$

где ρ_r и ρ_{r0} — соответственно плотность газа в месте встречи с поверхностью струи и на выходе из сопла, кг/м³; ω_r и ω_{r0} — скорость струи в тех же сечениях, м/с; d_0 — диаметр сопла, м; d — диаметр струи в месте встречи с поверхностью жидкости, м; $\rho_{ж}$ — плотность жидкости, кг/м³.

Было получено много эмпирических уравнений, устанавливающих связь между глубиной реакционной зоны h и величиной критерия Архимеда при определенных значениях H — расстояния от среза сопла до поверхности жидкости. Впервые подобное исследование было проведено проф. И. Г. Казанцевым, который получил следующую зависимость для $H/d_0 > 0$ величина $h = 0,23 \lambda A_r H$. В этом выражении λ — коэффициент (названный И. Г. Казанцевым коэффициентом проникновения), равный $\lambda = (\rho_{ж} g h) / (\rho_r \omega_r^2 / 2)$ и представляющий собой отношение гидростатического давления в основании реакционной зоны к скоростному напору струи в месте встречи струи с зеркалом жидкости.

Сечение сопла, давление дутья перед соплом и скорость истечения — величины, тесно связанные между собой (см. том I, гл. 30). Поэтому весьма полезны выражения для определения

глубины реакционной зоны, в которые входят величина давления перед соплом и его диаметр. Подобное выражение, полученное В. И. Бабтизманским для $H/d_0 > 0$, выглядит следующим образом

$$h = K \frac{\rho^{0.5} d_0^{0.6}}{\rho_{\text{ж}}^{0.4} \left(1 + \frac{H}{d_0 B}\right)},$$

где ρ — давление дутья перед соплом; B и K — опытные коэффициенты.

Рассмотрение полученных выражений указывает на решающее влияние на глубину реакционной зоны таких величин, как скорость истечения (давление перед соплом), расстояния от среза сопла до поверхности жидкости, плотности жидкости.

Для случая погружения фурмы в расплавленный металл ($H/d_0 = 0$) получены следующие выражения

$$\frac{h}{d_0} = \frac{1}{2} n A \Gamma_0; \quad h = K \frac{\rho^{0.5} d_0^{0.6}}{\rho_{\text{ж}}^{0.4}},$$

показывающие, что при погружении фурмы в ванну достигается максимальная глубина проникновения. Здесь уместно подчеркнуть зависимость глубины проникновения от диаметра сопла d_0 , которая объясняет уменьшение глубины проникновения кислородной струи при использовании многосопловых фурм, в которых диаметр каждого сопла меньше, чем у односопловой фурмы. При этом снижение величины h не уменьшает общей реакционной поверхности, так как диаметр кратера у многосопловых фурм больше.

Изучение зависимости диаметра реакционной зоны D от характеристик продувки также привело к эмпирическим зависимостям типа $D/d_0 = f(A \Gamma_0)$ для различных значений $H/d_0 > 0$, позволяющим установить влияние скорости истечения, диаметра сопла фурмы и ее расположения относительно поверхности ванны на диаметр реакционной зоны.

В последнее время начинают применяться кислородные конвертеры с донным дутьем. В соответствии с прогрессивной технологией основной шлакообразующий материал — порошкообразная известь — вдувается в металлическую ванну вместе с кислородом. Через фурмы, расположенные в днище конвертера, вдувается таким образом двухфазная смесь, распространение которой подчиняется своим специфическим законам. Глубина проникновения струи в этом случае может определяться из выражения

$$h = w_{\text{см}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{см}} d}{g (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{см}})}},$$

где $w_{\text{см}}$ — скорость смеси кислорода и извести на выходе из сопла, м/с; $\rho_{\text{см}}$ и $\rho_{\text{ж}}$ — плотность смеси и расплавленного металла, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с²; d — диаметр сопла, м.

Перемешивание сталеплавильной ванны является важнейшим теплотехническим и технологическим фактором, во многом определяющим весь ход плавки.

Перемешивание способствует ускорению прогрева расплавленного металла, выравниванию его температуры; благоприятно влияет на развитие процессов окисления примесей, так как обеспечивает доставку кислорода в различные зоны и объемы ванны; снижает возможность возникновения выбросов в конвертерной плавке из-за неодинаковой интенсивности окисления углерода и газовыделения по ходу плавки. От перемещения объемов металла возникают конвективные потоки, которые способствуют расплавлению скрапа. Не случайно, что в конвертерах с донным кислородным дутьем, металлическая ванна в которых интенсивно перемешивается, могут расплавляться более крупные куски скрапа чем в конвертерах ЛД, где перемешивание развито слабее.

На перемешивание влияют очень многие факторы, главными из которых являются воздействие на металл газовых струй и газовых пузырей CO и CO_2 , возникших при окислении углерода, содержащегося в металле. Размер и количество газовых пузырей, место и интенсивность их возникновения, траектории их движения в расплавленном металле — все это важные для теории и практики вопросы, ответы на которые носят крайне индивидуальный характер. Совершенно очевидно, что анализ процесса перемешивания расплавленного металла под воздействием пузырей CO и CO_2 не может обойтись без серьезных допущений. Если рассмотреть различные методы сталеварения, то можно сделать вывод о том, что наиболее представительными являются два случая:

1) перемешивание осуществляется пузырями, возникающими в толще расплавленного металла за счет кислорода, продифундировавшего в металл из атмосферы печи через шлак без продувки металла кислородом. Этот простейший случай встречается в мартеновской практике непрерывно и носит название чистого кипа;

2) перемешивание возникает как под действием пузырей, так и под действием струй кислорода одновременно. Этот случай широко представлен как в конвертерной практике, так и при продувке мартеновской ванны кислородом.

Рассмотрим подробнее перемешивание ванны под действием потока пузырей равномерно распределенных и проходящих через толщу металла. Такой поток обладает подъемной силой, под действием которой возникает и поддерживается движение металла.

Для того, чтобы определить мощность потока пузырей (мощность перемешивания) необходимо сделать следующие допущения:

мощность потока пузырей можно определить как простую сумму мощностей отдельных пузырей;

пузыри не обладают начальной кинетической энергией и начинают свое движение из состояния покоя;

влияние сил поверхностного натяжения отсутствует;
изменение объема газа в пузырях по высоте ванны — линейно.
Мощность, затрачиваемая одним пузырем на перемешивание
металла, кг·м/с

$$M = v_0 \rho_0 \frac{T}{273} \ln \left(1 + \frac{H \rho_m g}{\rho_0} \right).$$

Если всего образуется n пузырей в секунду и $v_0 n = V_0$, то для потока пузырей

$$M_{\text{общ}} = V_0 \rho_0 \frac{T}{273} \left[1 - \ln \left(1 + \frac{H \rho_m g}{\rho_0} \right)^{\frac{\rho_0}{H \rho_m g}} \right].$$

В этих выражениях: v_0 — объем одного пузыря, м³; V_0 — объем всех пузырей, м³; ρ_0 — атмосферное давление; ρ_m — плотность металла, кг/м³; H — путь, пройденный пузырями (глубина ванны), м; T — температура металла в ванне, К.

Рассмотрение этих выражений позволяет сделать следующие выводы:

мощность потока не зависит от объема одного пузыря;

при уменьшении глубины ванны мощность одного пузыря падает (при $H \rightarrow 0$ и $M \rightarrow 0$);

чем больше емкость печи, т. е. чем больше глубина ванны, тем мощнее развивается процесс перемешивания.

Взаимодействие газовой струи с расплавленной ванной было достаточно подробно рассмотрено выше. Здесь лишь отметим, что мощность перемешивания расплавленного металла газовой струей может быть определена из выражения, кг·м/с

$$M_{\text{стр}} = 0,5 \rho_r \omega_{\text{осв}}^3 \frac{\pi d^3}{4},$$

где ρ_r — плотность газового потока, кг/м³; d — диаметр струи, м; $\omega_{\text{осв}}$ — скорость на оси струи, м/с.

Совместное влияние струй и пузырей в значительной степени определяется методом подачи кислорода. При верхнем дутье значительная часть углерода окисляется в подфурменной зоне и величина H невелика. При донном дутье окисление углерода происходит в нижних горизонтах ванны, H больше и перемешивание интенсивнее.

Фурмы и их работа

Фурма — очень ответственный элемент сталеплавильного агрегата. Фурмы должны обеспечивать должную интенсивность окислительных процессов, иметь необходимую стойкость и долговечность, не вызывать чрезмерного разбрызгивания.

Фурмы работают в крайне тяжелых температурных условиях, находясь под воздействием расплавленного металла и шлака. В таких условиях может работать только водоохлаждаемая конструкция, да и то выполненная из металла с высоким значением

коэффициента теплопроводности. В настоящее время наконечники фурм чаще всего выполняют из меди, что обеспечивает их удовлетворительную стойкость.

Разбрызгивание шлака и металла при продувке ванны кислородом обязательно сопутствующее продувке и крайне нежелательное явление, приводящее к износу футеровки сталеплавильного агрегата. Избежать разбрызгивания, практически, невозможно; надо стараться всемерно его уменьшить. Для уменьшения разбрызгивания надо поднимать фурму и уменьшать скорость истечения кислорода, что, как ясно из вышеизложенного, влечет за собой уменьшение глубины проникновения, снижение интенсивности окислительных процессов и, как следствие, падение производительности.

Таким образом, при конструировании фурм приходится учитывать весьма противоположные требования к ним и, как это часто бывает в технике, решать задачу на оптимум, не удовлетворяющий в полной мере ни одному из предъявляемых требований. Процесс разработки фурм требует обязательно экспериментальной проверки качества их работы, так как установить влияние на характер продувки числа сопел и угла их наклона по отношению к вертикали возможно лишь опытным путем. Теоретически можно рассчитать лишь истечение из каждого отдельного сопла, которое в связи с необходимостью получить сверхзвуковые скорости представляет собой обычно сопло Лаваля (см. том 1).

Любая фурма обычно состоит из двух частей: собственно фурмы и головки или наконечника. Наконечник может меняться по мере необходимости. Фурма представляет собой водоохлаждаемую конструкцию, в которую вмонтированы кислородопроводы. Сама фурма выполняется из стали, наконечник из меди. В наконечнике может быть одно или несколько сопел Лаваля. Вся фурма, но особенно наконечник, должны хорошо охлаждаться водой.

На начальной стадии развития кислородно-конвертерного производства использовались односопловые фурмы, которые в силу ряда недостатков распространения не получили. Большая масса кислорода, выходящая из одного сопла с высокой скоростью, вызывала сильные выбросы металла и шлака, давала очень большое разбрызгивание, способствовала большому угару железа и, как следствие, уменьшению выхода годной стали.

В настоящее время повсеместно (в том числе и при продувке мартеновской ванны) используют многосопловые фурмы, в которых обеспечивается рассредоточенное дутье, при котором через каждое сопло (при той же высокой скорости) проходит меньшая масса кислорода, что и обеспечивает более спокойный ход плавки. Многосопловые фурмы при некотором снижении глубины кратера обеспечивают увеличение поверхности реакционной зоны, способствуют более равномерному газовыделению из ванны, более организованному перемешиванию металла. При этом снижается разбрызгивание, повышается выход годного. В настоящее время при-

меняются фурмы, имеющие чаще всего от 3 до 8 сопел. Наиболее распространены четырехсопловые и шестисопловые фурмы.

Конструкции фурм многообразны. На рис. 36-1 и 36-2 в качестве примера приведена конструкция четырехсопловой фурмы и схема движения жидкости и газа при продувке с помощью шестисопловой фурмы. Выбор числа сопел и угла их наклона к вертикали связан прежде всего с допустимыми размерами диаметра реакционной зоны, т. е. в конечном счете с размерами конвертера. При малом расстоянии между соплами и при малом угле (до $5-6^\circ$) наклона их осей к вертикали индивидуальные струи сливаются, практически, в одну струю, что резко снижает эффективность применения многосопловых фурм. При слишком большом угле наклона сопел заметно уменьшается глубина проникновения и увеличивается периферийное разбрызгивание на уровне установки фурмы, что способствует чрезмерному износу футеровки. Существуют установленные практикой оптимальные углы наклона к вертикали сопел в многосопловых фурмах: в малых конвертерах (до 30 т) 6° ; в больших конвертерах (100 т и более) $8-10^\circ$.

В каждом кислородном конвертере используется одна фурма. Иное дело в мартеновских и двухванных печах, имеющих большое рабочее пространство вытянутой формы. Для этих печей целесообразно использовать 2—3 фурмы. Большое количество фурм использовать нецелесообразно, так как выигрыш от их использования не компенсирует дополнительные расходы на ремонт, изготовление, эксплуатацию.

Для подовых сталеплавильных печей из-за уязвимости свода печи крайне важно снижение разбрызгивания металла и шлака без потерь в интенсивности окисления примесей чугуна и в первую очередь углерода. Целесообразно подчеркнуть еще раз, что разбрызгивание зависит от положения фурм. При опускании фурмы к шлаку разбрызгивание начинает увеличиваться, достигая максимального значения на расстоянии 200—300 мм от поверхности шлака. Когда сопло находится в шлаке разбрызгивание незначительно. Вблизи границы шлак—металл оно вторично достигает максимума, а затем снова убывает. Однако это не значит, что стремясь уменьшить разбрызгивание целесообразно фурму

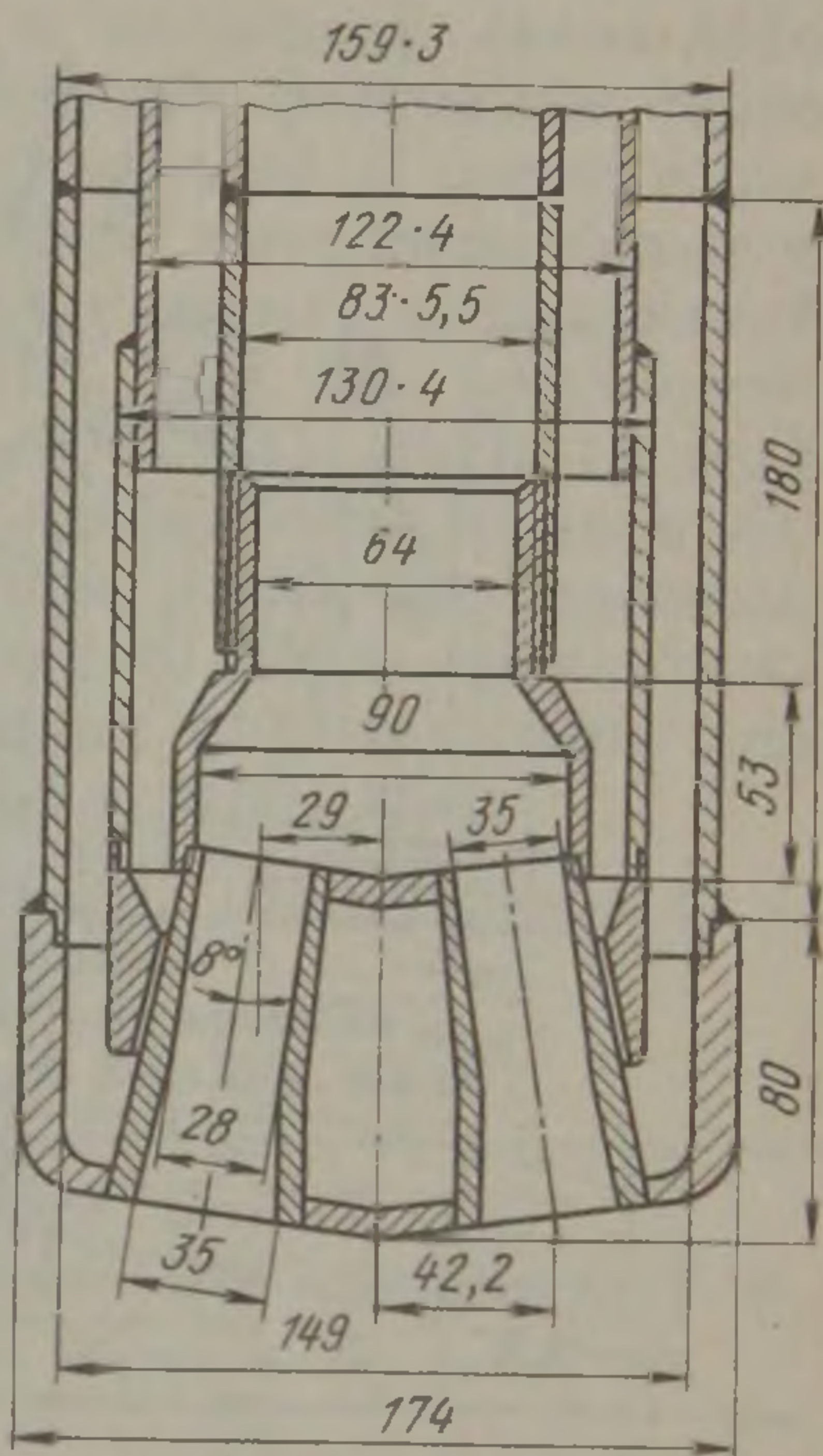


Рис. 36-1. Четырехсопловая кислородная фурма

как можно больше заглублять в металл, поскольку скорость окисления углерода при чрезмерном заглублении фурмы в металл начинает уменьшаться. Как показали промышленные эксперименты, оптимальным является небольшое (100—150 мм) заглубление фурмы в металлическую ванну.

Заканчивая рассмотрение вопросов, относящихся к продувке сталеплавильной ванны кислородом, следует особо отметить, что

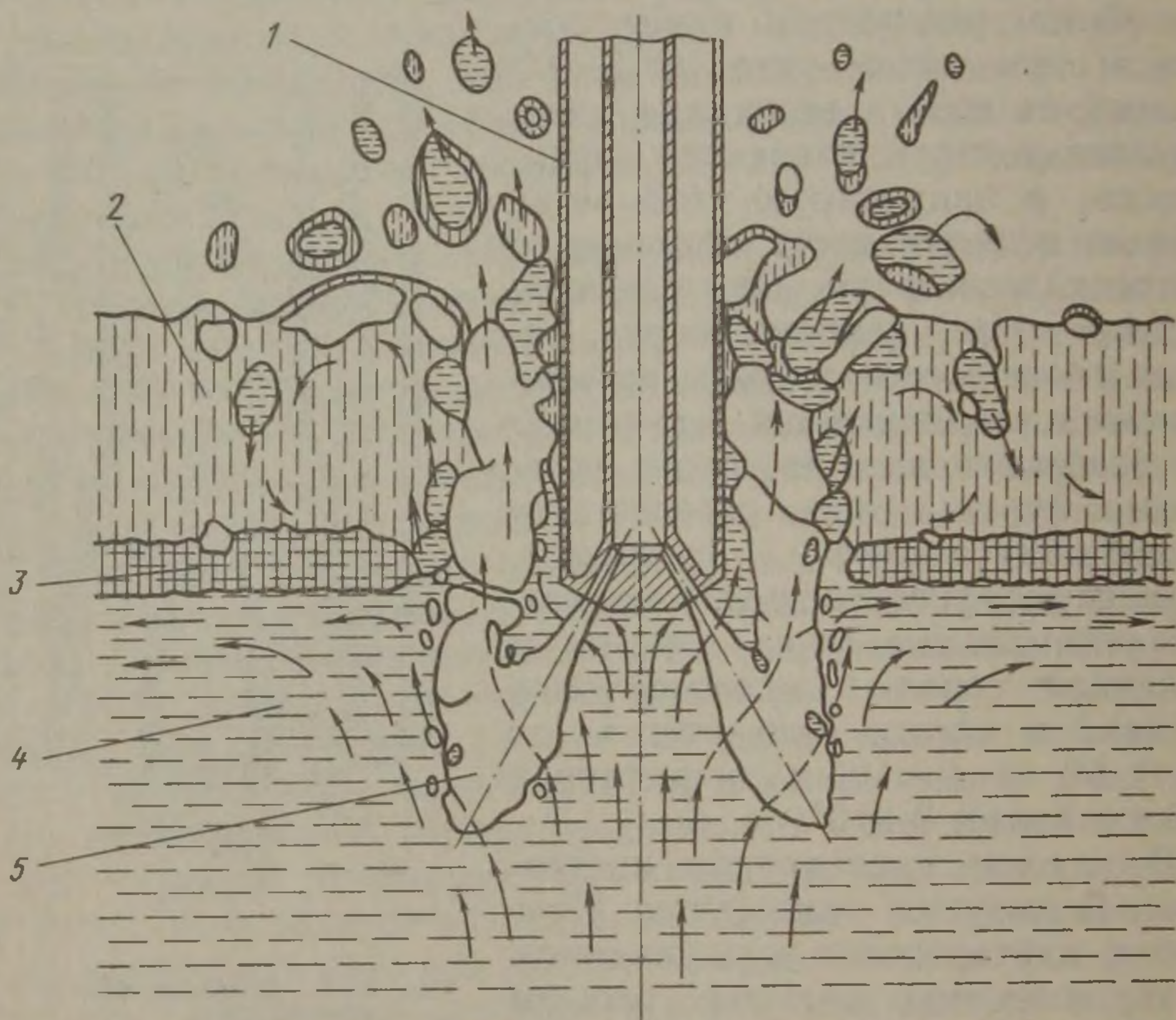


Рис. 36-2. Схема движения жидкости и газа при продувке с помощью шести-сопловой фурмы:

1 — фурма; 2 — шлак; 3 — промежуточный слой; 4 — металл; 5 — газ

кислородное дутье вызывает интенсивное дымо- и пылеобразование, снижающее выход годного металла (из-за угара железа) и требующее неременной очистки отходящих газов. Дожигание CO в конвертерах с верхней продувкой и очистка отходящих из всех сталеплавильных агрегатов с кислородной продувкой газов требуют специальных достаточно крупных и дорогостоящих котлов-утилизаторов и очистных сооружений. Размеры и стоимость очистных сооружений находятся в прямой зависимости от количества и степени запыленности отходящих газов. По этой причине ведутся работы, направленные на поиски путей снижения дымо- и пылеобразования. Одним из таких путей является газокислородная продувка.

4. Газокислородная продувка

Дымообразование (образование бурого дыма) есть результат испарения железа и его оксидов вследствие влияния весьма высоких температур, развивающихся в локальных объемах жидкого металла при использовании в качестве дутья чистого кислорода. Дымообразование значительно снижает выход годного металла, очень серьезно засоряет отходящие газы. Снижение дымообразования может быть достигнуто добавкой к кислороду каких-либо газов, уносящих из зоны реакций окисления физическое тепло и тем самым снижающих температуру в этой зоне. С целью выяснения закономерностей этого процесса было выполнено большое число лабораторных и теоретических (расчетных) исследований с добавкой к кислороду нейтральных (N_2 , He, Ar), восстановительных (CO, H_2 , CH_4) и окислительных газов (CO_2 , H_2O). Из этих газов для практического использования наиболее пригодны водяной пар и метан, так как другие газы или дороги или ядовиты. Термодинамические расчеты, выполненные с целью сравнительного анализа эффективности использования водяного пара или метана, дали результаты, представленные в табл. 36-1.

Т а б л и ц а 36-1. Состав газовой фазы и теоретическая температура при взаимодействии железо-углеродистого расплава (0,8 % C) с кислородом и его смесями с метаном и водяным паром

Реагенты	Компоненты газовой фазы, %						Т, К
	CO	CO ₂	Fe _{газ}	FeO _{газ}	H ₂	H ₂ O	
Кислород	12,0	0,9	78,9	8,2	0	0	4300
Кислород + метан	26,2	2,3	18,3	1,4	32,0	19,4	3726
Кислород + водяной пар	8,3	0,6	42,5	4,0	28,2	16,4	2882

Данные табл. 36-1, подтвержденные лабораторными опытами, не оставляют сомнения в предпочтительности добавок метана. С практической точки зрения метан также является очень доступной и недорогой добавкой, поскольку природный газ на 95—98 % состоит из метана. Благоприятное влияние добавок метана на дымообразование объясняется тем, что при его добавке сильно увеличивается количество газовой фазы, уносящей значительное количество физического тепла. Однако использованию добавок метана (природного газа) присущи следующие побочные отрицательные явления:

кислород расходуется на окисление метана, что влечет за собой снижение скорости окисления углерода;

образование значительного количества газовой фазы приводит к увеличению разбрызгивания шлака и металла.

В силу этих причин при создании газокислородных фурм необходимо исходить из использования минимального количества метана и предусматривать специальные меры, направленные на снижение разбрызгивания.

Газокислородные фурмы, в принципе, могут быть двух типов: с внешним (вне фурмы) смешением кислорода и природного газа и с внутренним смешением. Фурмы с внешним смешением оказа-

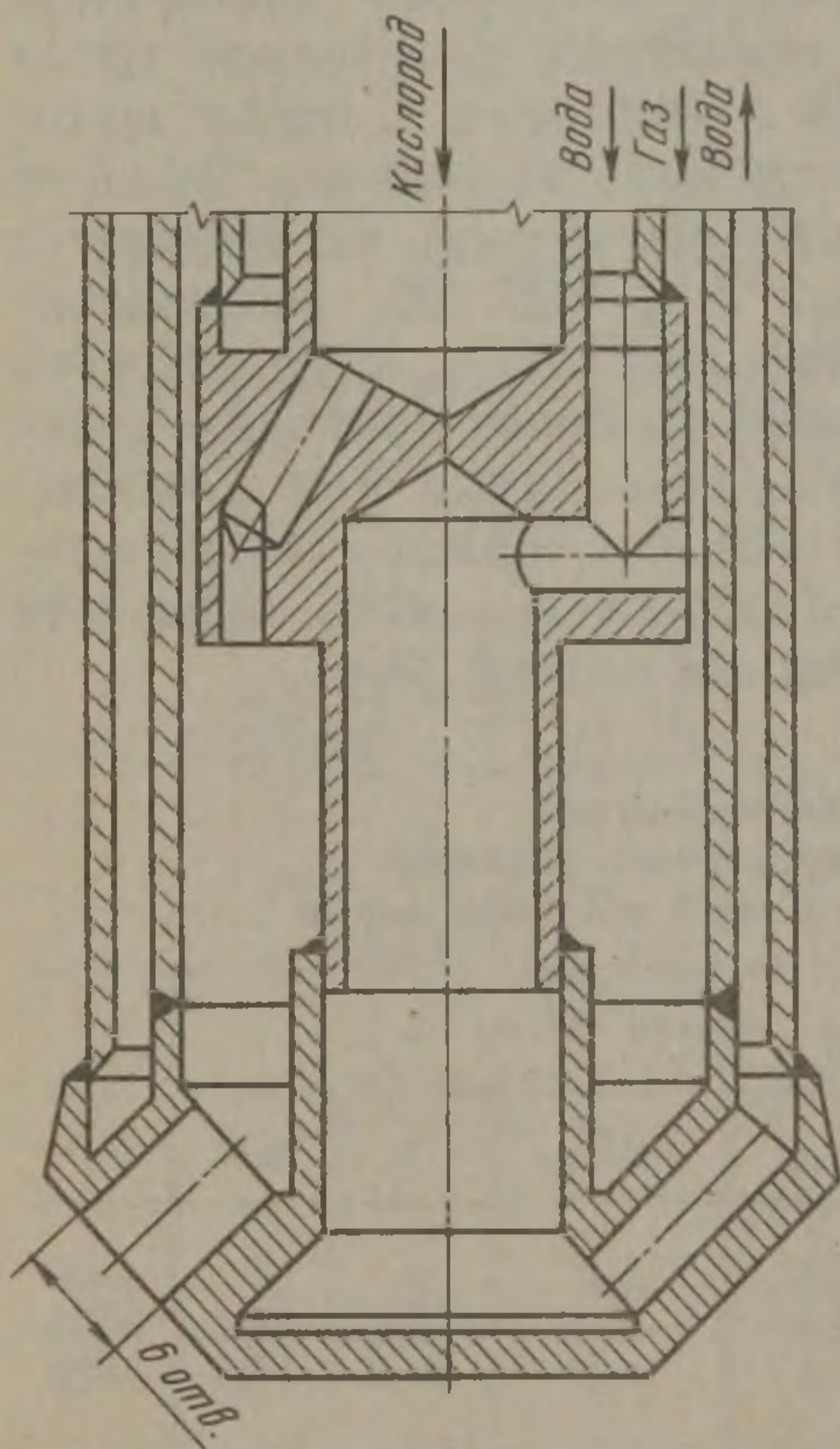


Рис. 36-3. Газокислородная фурма с внутренним смешением

лись мало пригодными, так как смешение кислорода и природного газа было неудовлетворительным и дымообразование практически не уменьшалось. К тому же, в таких фурмах невозможно отключать газ, что иногда бывает нужно делать в практических условиях.

Фурмы с внутренним смешением необходимо выполнять таким образом, чтобы исключить возможность забрызгивания газового или кислородного сопла. Одна из таких фурм представлена на рис. 36-3. Промышленные исследования газокислородной продувки на мартеновских и двухванных печах различной емкости показали, что при этом можно снизить вынос пыли в 2—4 раза по сравнению с применением чистого кислорода и повысить выход годного приблизительно на 1%. Подобное снижение дымообразования не обеспечивает достижения санитарных норм, но заметно улучшает санитарное состояние цеха и снижает затраты на газоочистку. Вместе с тем, при газо-

кислородной продувке несколько снижается скорость окисления углерода и производительность печи в целом, усложняется устройство и обслуживание фурм, усложняется управление плавкой.

Таким образом, газокислородная продувка расплавленной ванны подовых сталеплавильных печей — процесс, таящий в себе большие возможности и требующий дальнейшего изучения.

5. Предварительный подогрев скрапа и его значение

Необходимость использования все увеличивающегося в каждой стране количества скрапа требует повышения его доли в металлической завалке современных конвертеров и двухванных печей.

Из анализа теплового баланса конвертера следует, что одним из методов повышения доли скрапа является обеспечение его предварительного подогрева. Предварительный подогрев скрапа целесообразно применять и в электрических плавильных печах, что позволяет экономить дорогую электрическую энергию. В предельном случае целесообразно использовать расплавленный скрап.

Предварительный подогрев скрапа для использования его в кислородных конвертерах может осуществляться как непосред-

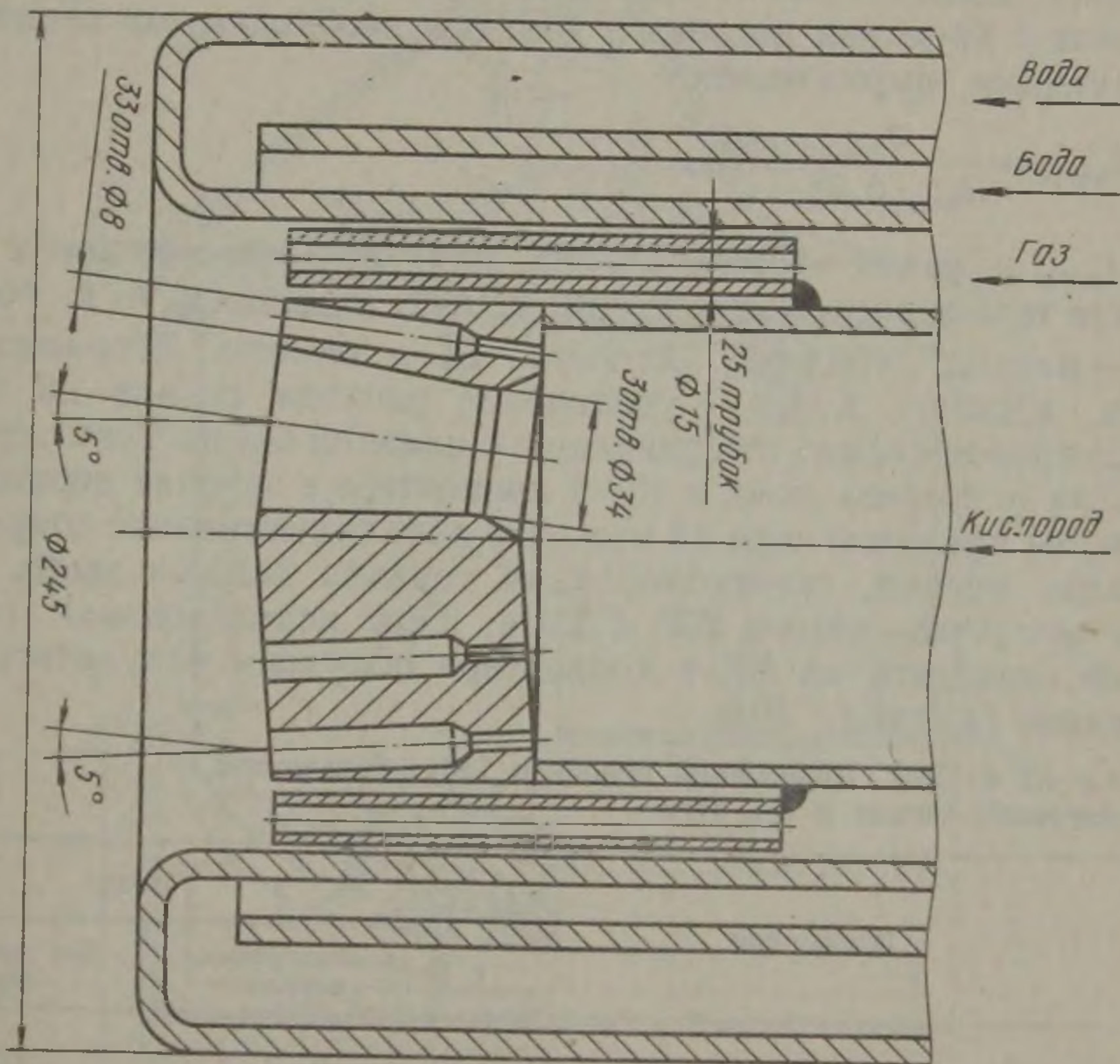


Рис. 36-4. Газо-кислородная горелка

ственно в конвертере, так и в специальных загрузочных емкостях. Подогрев лома в конвертерах осуществляется с использованием газокислородных горелок, в которых чаще всего сжигается природный газ в атмосфере кислорода. Одна из таких горелок представлена на рис. 36-4. Газ в этой горелке подается по заполненной трубками диаметром 15 мм кольцевой щели между кислородной трубой и водяной рубашкой. Большая часть кислорода поступает по трем расширяющимся соплам со сверхзвуковой скоростью, что обеспечивает высокую скорость факела в месте встречи его с ломом. Остальной кислород подается с дозвуковой скоростью по 33 мелким отверстиям двойного диаметра, расположенным по периферии головки, что способствует стабилизации горения и уменьшению

шума. Сжигание газа в чистом кислороде обеспечивает температуру факела, превышающую 2000 °С. В этих условиях для быстрого нагрева скрапа необходимо топливо сжигать в непосредственной близости от металла, обеспечивая тем самым высокий уровень теплоотдачи излучением и конвекцией. Учитывая высокую производительность конвертеров, подогрев скрапа должен производиться быстро, во избежание снижения общей производительности конвертера и цеха. По этой причине газокислородная горелка должна иметь высокую тепловую мощность, которая связана с временем нагрева и другими необходимыми величинами следующим выражением:

$$t_{\text{нагр}} = \frac{Q_{\text{ч}}}{\eta_{\text{нагр}} G_{\text{т}} Q_{\text{н}}^{\text{р}}} \Delta M_{\text{ск}},$$

где $t_{\text{нагр}}$ — время нагрева скрапа, мин; $Q_{\text{ч}}$ — физическое и химическое тепло, вносимое чугуном, кДж/т; $\eta_{\text{нагр}}$ — к. п. д. горелки; $G_{\text{т}}$ — расход топлива, кг/мин; $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ — теплота сгорания топлива, кДж/кг; $\Delta M_{\text{ск}}$ — увеличение расхода скрапа на плавку с подогревом скрапа по сравнению с плавкой без нагрева скрапа, т.

Для подогрева лома в 130-т конвертере в течение периода времени, не превышающем 15 мин, что дает существенное сокращение расхода чугуна, газокислородная горелка должна иметь тепловую мощность около 200 ГДж/ч. При использовании горелки такой мощности на 130-т конвертере получены результаты, приведенные в табл. 36-2.

Т а б л и ц а 36-2. Показатели плавки в 130-т конвертере с подогревом скрапа и без него

Показатели	Плавка	
	с подогревом скрапа	без подогрева скрапа
Залито чугуна, т	97,3	104,8
Завалено лома, т	43,9	36,2
Удельный расход чугуна на 1 т готового металла, кг/т	791,1	852,0
Продолжительность подогрева лома, мин	8,7	—
Средняя температура нагрева, °С	610	—
К. п. д. нагрева	48	—

Таким образом предварительный подогрев скрапа в самом конвертере дает весьма существенное увеличение количества скрапа в завалку. Обычно подогрев скрапа в конвертере производится до температуры, не превышающей 700—800 °С, так как при более высоких температурах развиваются процессы окисления железа.

Как для конвертеров, так и для электроплавильных печей предварительный подогрев скрапа может осуществляться в спе-

циальных устройствах, одно из которых представлено на рис. 36-5. Установка состоит из футерованной загрузочной корзины, которая после помещения в нее металла устанавливается на вытяжной колодец, соединенный с дымососом и трубой, и накрывается крышкой, в которой вмонтирована горелка. Крышки с горелкой

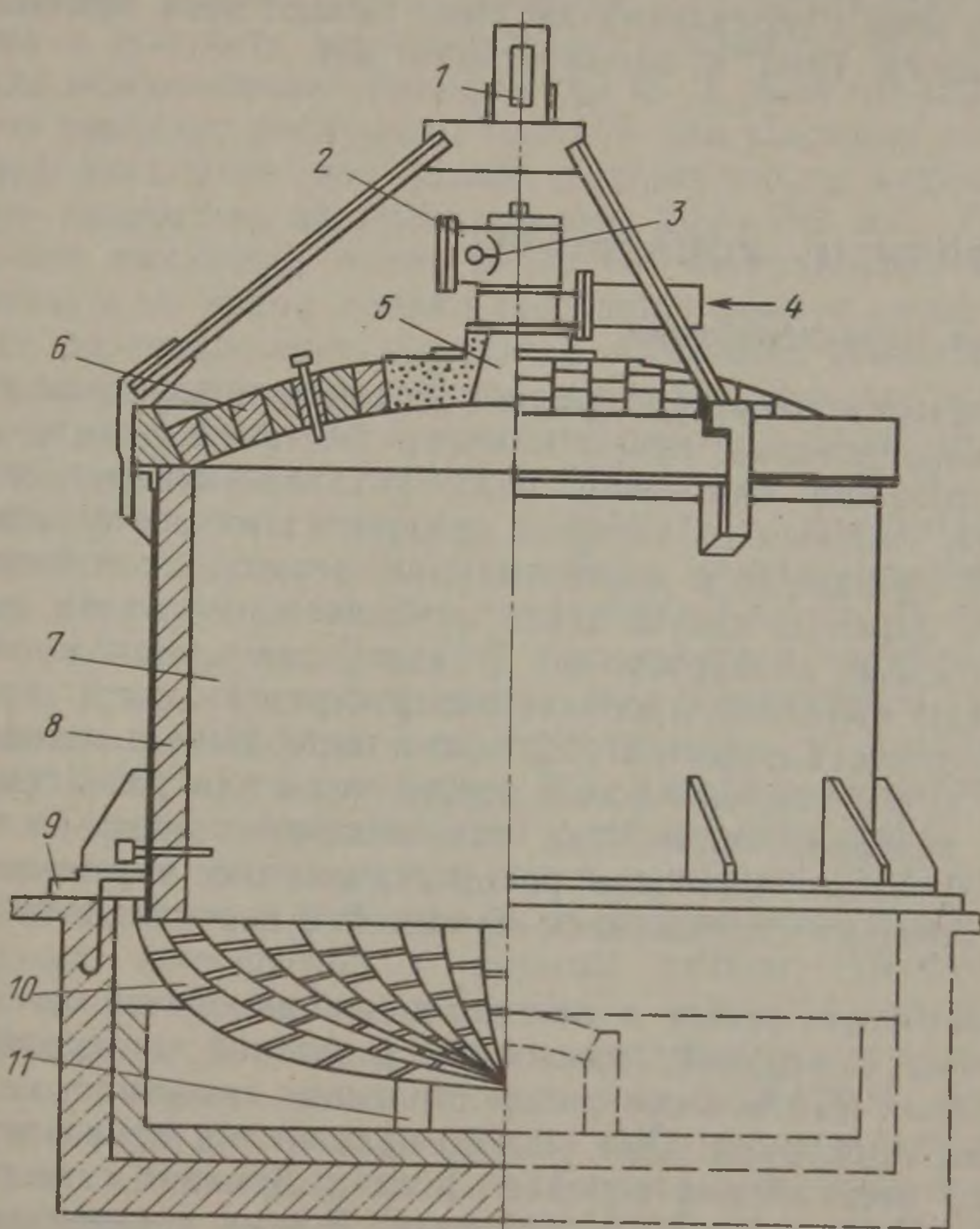


Рис. 36-б. Установка для подогрева шихты:

1 — устройство для подвески крышки; 2 — газовая горелка; 3 — природный газ; 4 — воздух; 5 — камера предварительного сжигания; 6 — крышка; 7 — завалочная корзина; 8 — шамотная футеровка; 9 — песочный затвор; 10 — фартук с замком; 11 — канал для отходящих газов

смонтированы на поворотной консоли и обслуживают поочередно один из двух подогревательных стенов. Установка отапливается природным газом, для сжигания которого подается воздух от вентилятора, установленного на крышке. Расход природного газа составляет 16—12 м³ на тонну садки. Температура подогрева скрапа по высоте слоя различна и максимальное ее значение достигает 1100—1200 °С в верхних слоях, а в нижней части до 400 °С. Предварительный подогрев скрапа для электропечей позволил сократить продолжительность плавления на 23—30 мин,

повысить производительность печей на 15—18 %, сократить расход электроэнергии на 78—85 кВт-ч на тонну стали.

Весьма перспективным является процесс предварительного расплавления скрапа в жидкий полупродукт в высокоэкономичных топливных печах с последующей доводкой в электропечах. Работы в этом направлении ведутся, однако пока промышленных печей такого типа в эксплуатации нет.

Глава 37

КИСЛОРОДНЫЕ КОНВЕРТЕРЫ

1. Общая характеристика

Кислородные конвертеры пришли на смену воздушным конвертерам и мартеновским печам и очень быстро получили широкое распространение благодаря ряду технико-экономических преимуществ, главным из которых являются высокая производительность по сравнению с мартеновскими печами, способность переплавлять скрап и давать сталь лучшего качества по сравнению с воздушными конвертерами. В настоящее время кислородные конвертеры являются наиболее распространенными и перспективными сталеплавильными агрегатами в мире. Использование кислородного дутья открыло новые перспективы для развития конвертерного передела стали, так как позволило использовать для конвертирования наиболее распространенные мартеновские чугуны с меньшим содержанием примесей и переплавлять стальной скрап.

В настоящее время в эксплуатации находятся кислородные конвертеры с верхней, наклонной и донной продувкой ванны кислородом. Наибольшее распространение получили конвертеры с верхней продувкой. Они обычно называются конвертерами ЛД по имени австрийских городов Линц и Донавиц, где они были впервые построены в 1952—53 годах. В этих конвертерах, работающих на мартеновских чугунах, получают сталь достаточно хорошего качества. Они способны переплавлять около 25 % стального скрапа в металлическую завалку. Скорость выхода кислорода из фурм в этих конвертерах в 2—2,5 раза превышает скорость звука. Увеличение доли скрапа сверх ~25 % невозможно, так как оксид углерода, образующийся при окислении углерода, дожигается вне предела рабочего пространства конвертера. Это является существенным недостатком этих конвертеров, так как требует специальных, весьма крупных и дорогостоящих устройств для дожигания СО и улавливания выделившегося при этом тепла. Эти устройства, среди которых главным является большой котел-утилизатор, располагаются над конвертером, что требует строительства специальных цехов большой высоты. Это обстоятельство несколько сдерживает распространение конверте-

ров ЛД, так как они не могут быть размещены в существующих и подлежащих реконструкции мартеновских цехах. Тем не менее конвертеры ЛД в настоящее время являются наиболее распространенными: по данным на январь 1981 г. в них в мире выплавляется около 525 млн. т стали.

Стремление дожечь оксид углерода в пределах рабочего пространства и получить дополнительное количество тепла, необходимое для использования большей чем 25 % доли скрапа в металлическую завалку, послужило толчком для создания конвертера с подачей кислорода под углом к поверхности металлической ванны со скоростью, не превышающей 200—250 м/с. Конвертер расположен наклонно, имеет развитую поверхность металлической ванны и во время плавки вращается вокруг своей оси, что улучшает перемешивание металла и позволяет полезно использовать тепло, аккумулированное кладкой. Все это позволило обеспечить дожигание СО в пределах рабочего пространства конвертера и поднять долю скрапа в завалку до ~45 %. Впервые такой конвертер был построен в 1956 г. в шведском городе Домнарвете по предложению известного металлурга профессора Каллинга и получил название конвертера Кал-До. В настоящее время в конвертерах Кал-До выплавляется приблизительно 35 млн. т стали. Распространение этих конвертеров несколько сдерживается сложностью их строительства и эксплуатации. Конвертер Кал-До, так же как и ЛД, работает на мартеновских чугунах и требует строительства специального цеха, так как в существующих мартеновских цехах размещен быть не может.

В 1966—1967 гг. за рубежом было осуществлено строительство кислородных конвертеров с донным дутьем. Необходимость создания такого конвертера возникла, в основном, по двум причинам. Во-первых, необходимостью переработки чугунов с повышенным содержанием марганца, кремния и фосфора, поскольку передел такого чугуна в конвертерах ЛД сопровождается выбросами металла в ходе продувки и не обеспечивает должной стабильности химического состава готовой стали. Вторая причина заключается в том, что конвертер с донной продувкой является наиболее приемлемой конструкцией, позволяющей осуществить реконструкцию существующих бессемеровских и томассовских цехов, и вписывается в здание существующих мартеновских цехов. Этому конвертеру свойственно наличие большого числа реакционных зон, интенсивное окисление углерода с первых минут плавки, низкое содержание оксидов железа в шлаке. В силу специфики работы сталеплавильной ванны при данной продувке в конвертерах подобного типа выход годного несколько выше, чем в конвертерах ЛД и Кал-До, а запыленность отходящих газов ниже. В 1979 г. в мире работало 79 конвертеров с донным дутьем, общая производительность которых достигала 37—38 млн. т стали, т. е. около 7 % мирового производства кислородно-конвертерной стали. Оценивая динамику распространения конвертеров следует отме-

титель, что преимущественное развитие получит кислородно-конвертерный процесс с верхним дутьем, прирост мощностей конвертеров с донным дутьем будет значительно (на порядок) меньше и будет связан с реконструкцией существующих мартеновских цехов. Интересно отметить, что делаются попытки использовать одновременно и верхнее и донное дутье. В последнее время появилось два основных варианта такого процесса, когда снизу подают кислород (10—12 % от общего расхода) или инертные газы (N_2 или Ar) с целью обеспечить интенсивное перемешивание ванны и ускорить процесс удаления примесей. При этом, как и при донной продувке, снизу вместе с газами может подаваться пылевидная известь.

2. Кислородные конвертеры с верхней продувкой

Устройство кислородного конвертера и его размещение в цехе представлено на рис. 37-1 и 37-2. Средняя часть корпуса конвертера цилиндрической формы, стены ванны сферической формы,

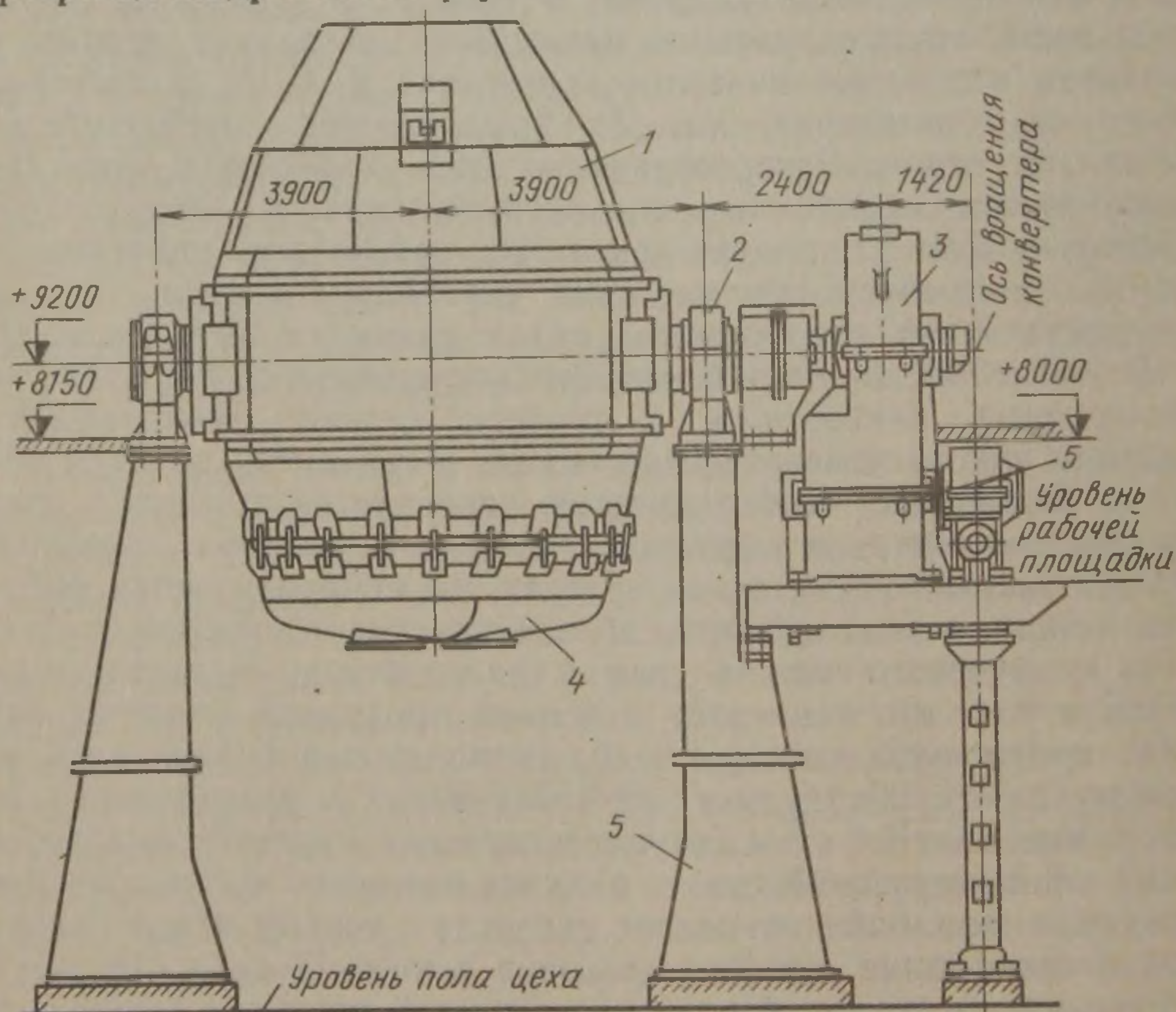


Рис. 37-1. Кислородный конвертер с верхней продувкой емкостью 100 т:
1 — корпус; 2 — опорный подшипник; 3 — механизм поворота; 4 — днище;
5 — станина

днище — плоское. Верхняя, шлемная часть конической формы. Кожух конвертера выполняют из стальных листов толщиной 30—90 мм. В конвертерах садкой до 150 т днище выполняют отъем-

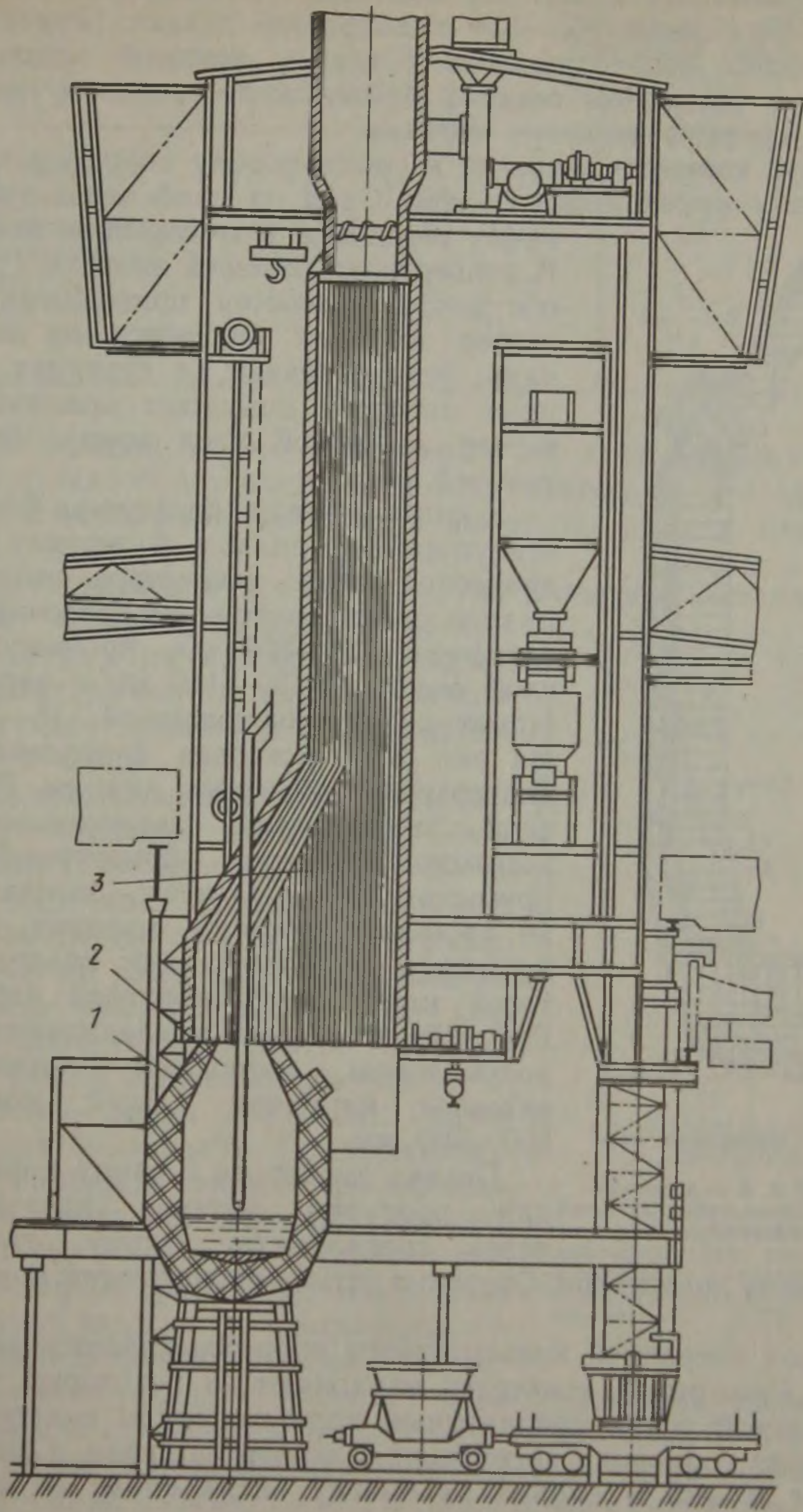


Рис. 37-2. Размещение конвертера в цехе:
1 — конвертер; 2 — фурма; 3 — камин

рым и крепят его к корпусу болтами, что облегчает ремонтные работы. При садке 250—350 т конвертер делают глуходонным, что вызвано необходимостью создания жесткой конструкции корпуса и условиями техники безопасности, гарантирующей от случаев прорыва жидкого металла.

Корпус конвертера крепят к специальному опорному кольцу, к которому приваривают цапфы. Одна из цапф через зубчатую муфту соединена с механизмом поворота.

В конвертерах большой емкости (>250 т) обе цапфы являются приводными. Конвертер цапфами опирается на подшипники, установленные на станинах. Механизм поворота позволяет вращать конвертер на любой угол вокруг горизонтальной оси.

Корпус и днище конвертера футеруют огнеупорным кирпичом. Футеровку цилиндрической части конвертера выполняют из трех слоев: внутренний (рабочий) слой толщиной 600—800 мм, промежуточный слой толщиной 50—150 мм и наружный (арматурный) слой толщиной 115—350 мм. На рис. 37-3 показана футеровка 100-т конвертера с отъемным днищем. Рабочий слой выкладывают смолодоломитомagneзитовым кирпичом. Арматурный слой, примыкающий к кожуху, выкладывают из хромомагнезитового кирпича. Промежуточный слой заполняют смолодоломитовой или смоломagneзитовой набивкой. Рабочий слой днища выкладывают смолодоломитовым, наружный — хромомагнезитовым кирпичом общей толщиной 800—900 мм.

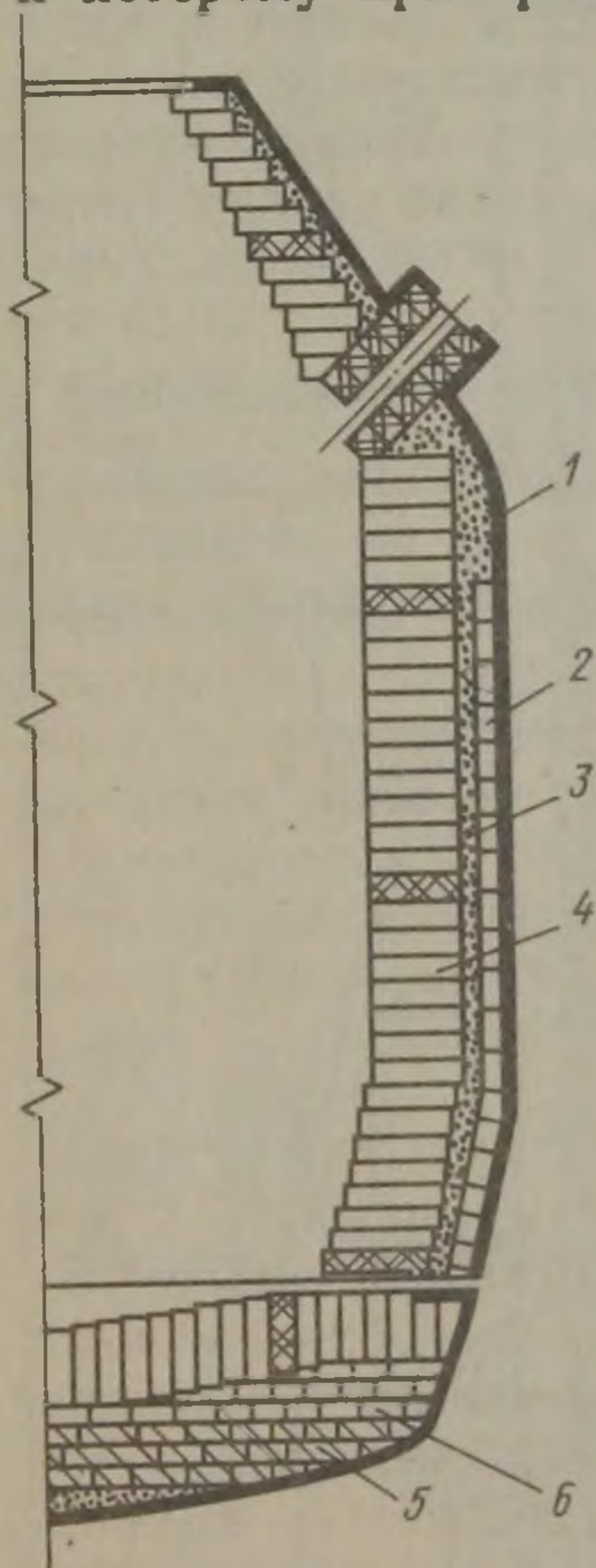


Рис. 37-3. Футеровка конвертера:

1 — кожух; 2, 6 — арматурный слой; 3 — набивка; 4, 5 — рабочий слой

Подача кислорода в ванну конвертера для продувки металла производится через специальную фурму, вводимую в горловину конвертера. Основные размеры конвертеров приведены в табл. 37-1.

Первой операцией конвертерного процесса является загрузка скрапа. Разогретый конвертер наклоняют на некоторый угол от вертикальной оси и специальным коробом-совком емкостью 8—10 м³ через горловину загружают в конвертер скрап. Обычно загружают 20—25 % скрапа на плавку. Если скрап не подогревают в конвертере, то затем сразу же заливают жидкий чугун. После этого конвертер устанавливают в вертикальное положение, через горловину в конвертер вводят кислородную фурму.

Т а б л и ц а 37-1. Основные размеры конвертеров

Параметры	Основные размеры конвертеров садкой, т		
	50	100	200
Полная высота, м	7,9	8,7	9,7
Диаметр кожуха, м	5,2	5,7	8,3
Диаметр горловины, м	1,6	1,7	2,6
Размеры ванны, м:			
диаметр	3,6	4,0	6,5
глубина	1,1—1,2	1,5—1,6	1,6—1,8
Удельный объем, м ³ /т	1,0	0,8	0,72

Для наводки шлака в конвертер по специальному желобу вводят шлакообразующие материалы: известь в количестве 5—7 % и в небольшом количестве железную руду и плавиковый шпат.

После окисления примесей чугуна и нагрева металла до заданных величин продувку прекращают, фурму из конвертера удаляют и сливают металл и шлак в ковши. Легирующие добавки и раскислители вводят в ковш.

Продолжительность плавки в хорошо работающих конвертерах почти не зависит от их емкости и составляет ~45 мин, продолжительность продувки 15—25 мин. Каждый конвертер в месяц дает 800—1000 плавок. Стойкость конвертера 600—800 плавок. Расход огнеупоров 3—3,5 кг/т стали. Выход жидкой стали 89—91 %. Количество шлака 10—12 %. Расход кислорода 50—55 м³/т. Продолжительность продувки ванны кислородом, которая определяет производительность конвертера, зависит от удельного расхода кислорода (рис. 37-4). Чрезмерное увеличение удельного расхода кислорода не целесообразно, так как увеличивает разбрызгивание и ускоряет износ футеровки конвертеров. Практически интенсивность продувки составляет 3,5—4 м³ О₂/мин на 1 т стали. Длина водоохлаждаемой фурмы для подачи кислорода 13—18 м. Обычно бывает 4 или 6 сопел с диаметром каждого сопла 30—55 мм и углом наклона к вертикали 8—12°. Слишком низкое расположение фурмы приводит к ее быстрому износу, поэтому фурму обычно располагают на расстоянии 1—2 м от

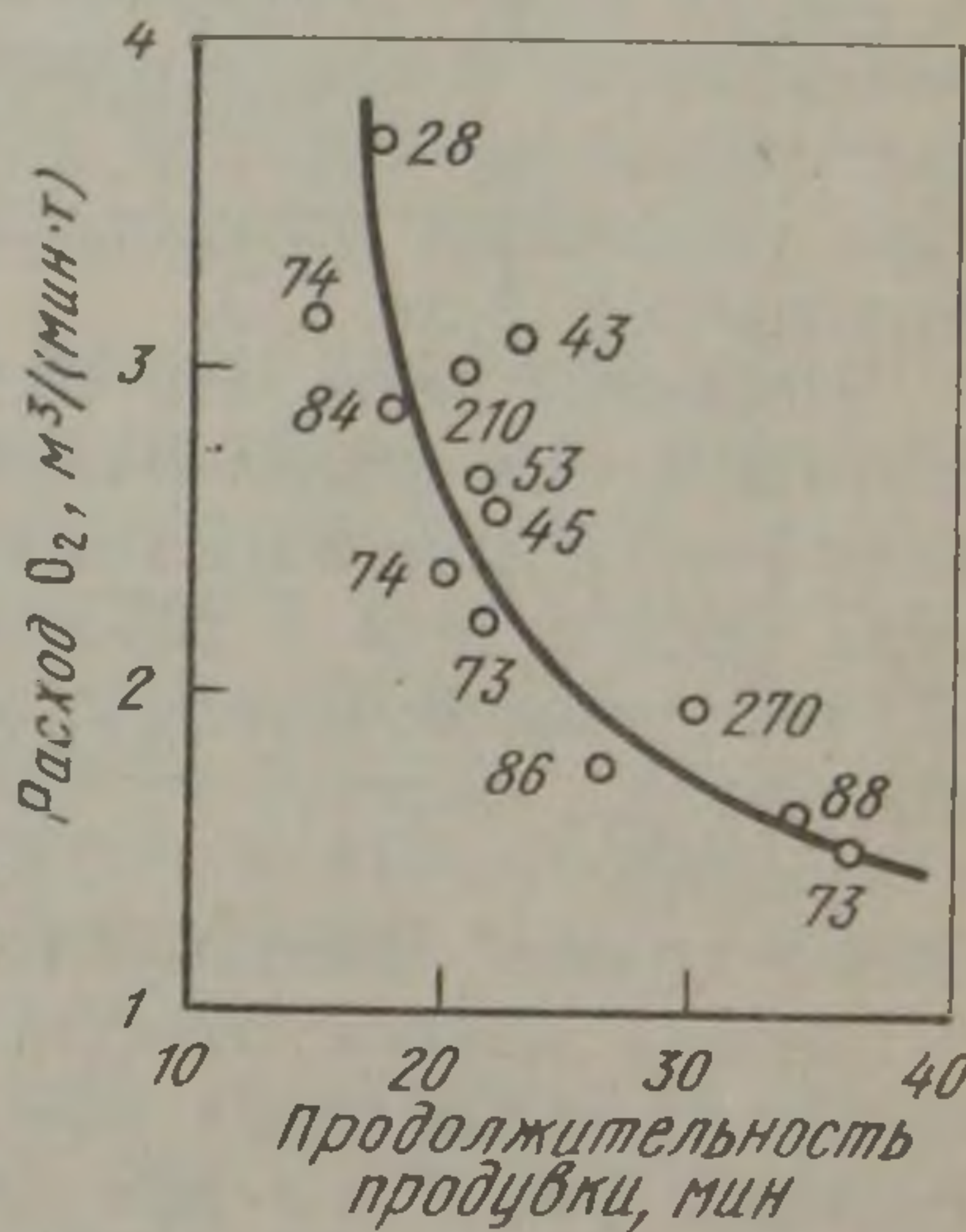


Рис. 37-4. Зависимость удельного расхода кислорода от продолжительности продувки для конвертеров различной емкости (цифры у точек — емкость конвертеров, т)

уровня спокойной ванны, обеспечивая на выходе из сопла значе- ние критерия Маха около 2.

В месте соприкосновения струи кислорода с жидкой ванной благодаря высокой температуре образуются пары металличе- ского железа и оксидов, которые выносятся из ванны конвертер- ными газами в виде бурого дыма, т. е. происходит интенсивное пылеобразование. Основной составляющей пыли являются оксиды железа (>65 %). Размеры частичек пыли очень малы: около 95 % пыли имеют размер частичек не более 5 мкм, в том числе свыше 70 % — не более 1 мкм. Количество пыли, уносимое из конвертера газами, доходит до 90 г/м³. Общие потери железа с отходящими газами составляют 1,0—1,5 %.

Движение металла в конвертере является весьма сложным; помимо кислородной струи, на жидкую ванну воздействуют пу- зыри оксида углерода. Процесс перемешивания усложняется еще и тем, что шлак проталкивается струей газа в толщу металла и перемешивается с ним. Движение ванны и вспучивание ее выде- ляющимся оксидом углерода приводят значительную часть жид- кого расплава в состояние эмульсии, в которой капли металла и шлака тесно перемешаны друг с другом. Это создает большую поверхность соприкосновения металла со шлаком, что обеспечи- вает высокие скорости окисления углерода и нагрева металла. При окислении углерода на 1 м³ поданного в ванну кислорода выделяется 2 м³ СО.

Несмотря на то, что часть кислорода расходуется на окисление железа и СО, общее количество газов в горловине может дости- гать 5—7 м³/мин на 1 т садки. Это означает, что для 200-т конвер- тера расход газа в горловине достигает 60 000 м³/ч. Дожигание СО над ванной практически не происходит и газ, отходящий из конвертера, состоит из 90 % СО и 10 % СО₂, а его температура в среднем составляет 1700 °С. Запыленность отходящих газов очень велика, поэтому газ необходимо очищать. Применяемые установки мокрой очистки и электрофильтры требуют предвари- тельного охлаждения газа (соответственно до ~400 и ~250 °С). Размеры установок для дожигания, охлаждения и очистки кон- вертерных газов во много раз превышают размеры самих кон- вертеров (см. рис. 37-2). Чаще всего на заводах газ (СО) дожигают в камине при подаче холодного воздуха, засасываемого через зазор между горловиной и камином или подаваемого принуди- тельно. Стенки камина представляют собой поверхности котла- утилизатора или водяные холодильники. Газ дополнительно охлаждают впрыскиванием воды, а затем очищают.

Проанализируем укрупненный (приблизительный) тепловой баланс кислородного конвертера без дожигания СО и, несколько забегаая вперед, с дожиганием СО.

Приходная часть теплового баланса конвертера включает в себя две приблизительно одинаковые статьи: тепло, вносимое жидким чугуном, и тепло экзотермических реакций. Расходная

часть теплового баланса состоит из четырех основных статей, %:

Тепло жидкой стали	60
Тепло шлаков	10
Тепло уходящих продуктов реакций окисления	9—10
Потери	5
<hr/>	
Итого	85

Вот этот избыток тепла (15 %) необходимо израсходовать, иначе в конвертере разовьется чрезмерная температура. Именно этот избыток тепла и позволяет использовать в конвертере 20—25 % холодного стального скрапа.

При дожигании СО в СО₂ (конвертер Кал-До) приходная часть теплового баланса конвертера (%) выглядит иначе, а именно:

Тепло, вносимое жидким чугуном	36
Тепло экзотермических реакций	34
Тепло от дожигания СО в СО ₂	30

Иначе будет выглядеть и расходная часть баланса, %:

Тепло жидкой стали	40
Тепло шлаков	10
Тепло уходящих продуктов реакций окисления (включая СО ₂)	15
<hr/>	
Итого	65

Таким образом, дожигание СО в СО₂ создает в системе избыток тепла, равный приблизительно 35 % прихода тепла, что позволяет в этих конвертерах (Кал-До) удельный расход скрапа довести до 40—45 %. Очевидно, что как в том, так и в другом случае подогрев скрапа позволяет увеличить его удельный расход. Естественно, что при определении теплового к. п. д. конвертера тепло, пошедшее на нагрев и расплавление скрапа, должно суммироваться с количеством тепла, которое уносится той частью жидкой стали, которая получена за счет чугуна.

В целом следует отметить, что степень использования тепла в кислородном конвертере гораздо выше, чем в сталеплавильных агрегатах подового типа. К. п. д. (тепловой) конвертера составляет ~70 %, в то время как для хорошо работающих мартеновских печей он не более 30 %, что является большим преимуществом конвертерного процесса перед мартеновским. Кроме того, газы, отходящие из конвертера, имеют теплоту сгорания 10—11,5 МДж/м³, что используется или при дожигании газа в котлах-утилизаторах, или как топливо при отводе газов из конвертера без дожигания.

3. Кислородные конвертеры Кал-До

Значительное количество химического тепла, которое содержится в оксиде углерода, выделяющемся из ванны, можно использовать в самом конвертере. Сжигание СО над ванной конвертера ЛД,

как правило, не применяют, так как вследствие малой площади ванны конвертер не приспособлен к функциям теплообменника. Кроме того, при сгорании СО значительно повышается температура рабочего пространства и усиленно изнашивается кладка.

Конструкция конвертера, приспособленного к сжиганию СО (конвертера Кал-До), показана на рис. 37-5. Корпус покоится на роликах, два из которых — приводные, они обеспечивают вращение конвертера вокруг оси. Все ролики закреплены в люльке,

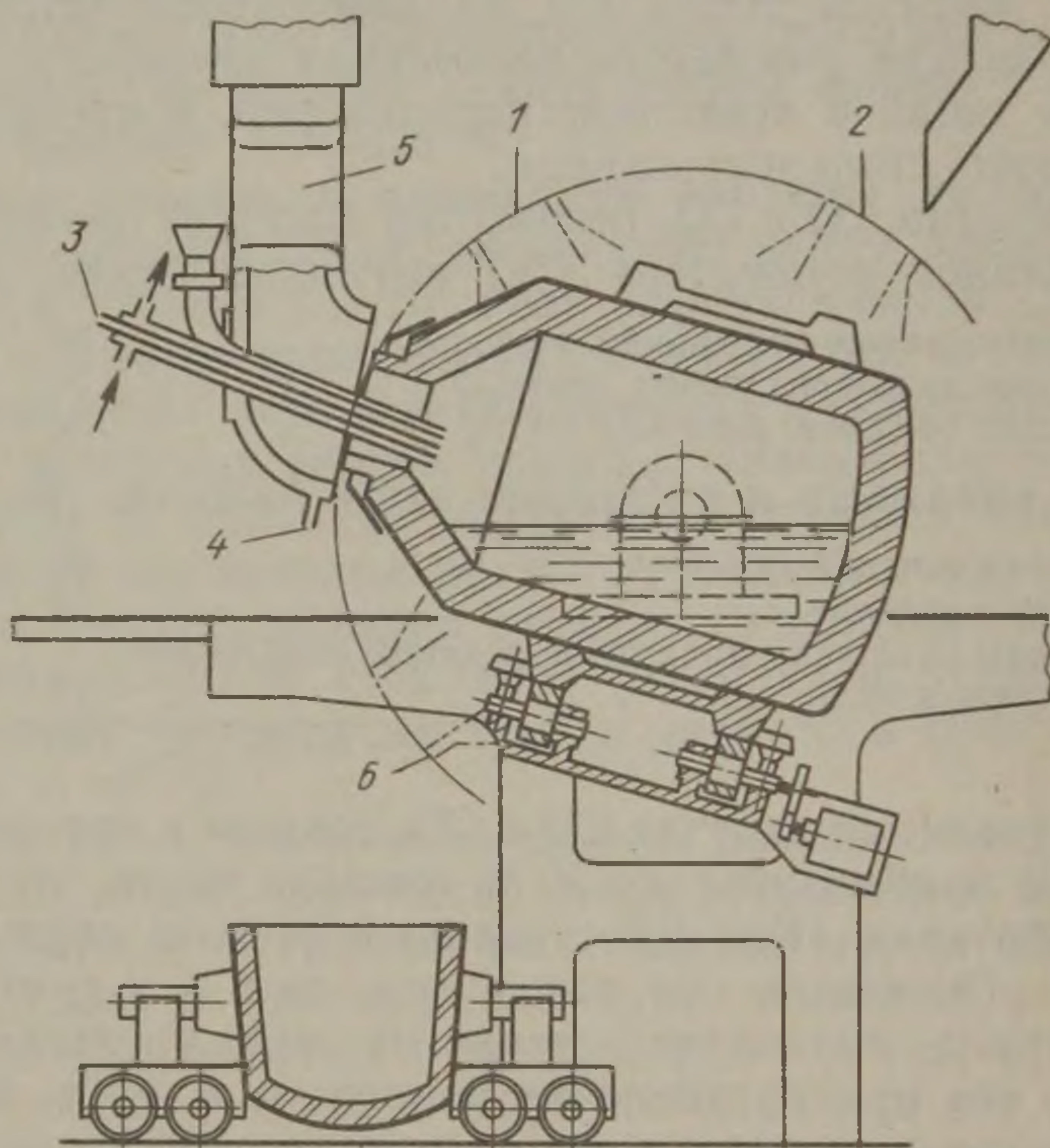


Рис. 37-5. Кислородный конвертер Кал-До:

1 — положение при заливке чугуна; 2 — положение при загрузке сыпучих; 3 — подвод кислорода; 4 — подвод воды; 5 — камин; 6 — положение при выпуске стали

которая может поворачиваться вместе с печью вокруг горизонтальной оси. В рабочем положении ось конвертера наклонена к горизонту под углом 17° , благодаря чему площадь ванны получается достаточно большой. Кладка напоминает футеровку конвертеров ЛД.

Кислород подают через водоохлаждаемую фурму, направленную под углом к ванне. Окисление примесей ванны происходит в результате диффузии кислорода через шлак. Так как поверхность ванны больше, то толщина шлака меньше, что способствует достаточно быстрой передаче кислорода в металл. Большое значение для ускорения окисления ванны имеет также вращение конвертера, усиливающее перемешивание металла и шлака.

В этих условиях нет необходимости вводить кислород со сверхзвуковой скоростью. Наоборот, его подают так, чтобы шлак

сильно не разбрызгивать. Обычно скорость кислорода на выходе из фурмы составляет 200—250 м/с. Угол наклона и расстояние фурмы от поверхности ванны изменяют по ходу плавки.

Поскольку часть тепла, необходимого для процесса, поступает к ванне при сжигании СО, конвертер Кал-До не является чистым теплогенератором. Он одновременно служит топкой и теплообменником.

Большая роль в процессе передачи тепла к ванне принадлежит кладке, выполняющей функции регенератора; часть ее, находящаяся над ванной, нагревается от газовой среды с высокой температурой, а затем, вступая в контакт с более холодными металлом и шлаком, отдает им свое тепло. Вследствие охлаждения металлом средняя температура кладки сохраняется на допустимом уровне. Все же стойкость кладки конвертеров Кал-До значительно ниже стойкости кладки конвертеров ЛД и составляет для крупных печей от 50 до 150 плавов. Опыты по применению обожженного магнезитового кирпича высокой чистоты говорят о том, что стойкость кладки можно значительно повысить.

Для сохранения кладки конвертеров Кал-До расход кислорода в них поддерживают более низким, чем в конвертерах ЛД: 1,5—2,5 м³/мин на 1 т металла. Поэтому общая продолжительность плавки получается большей: для агрегатов емкостью 110—135 т она составляет 70—80 мин.

Благодаря тому, что в ванну тепло поступает извне в конвертерах Кал-До необходимо снижать приход тепла путем теплогенерации или увеличивать расходные статьи. Для этого уменьшают долю чугуна в шихте или увеличивают количество твердых окислителей. Оба способа дают Кал-До-процессу значительные экономические преимущества. Первый позволяет перерабатывать большие количества относительно дешевого стального лома (до 45 % вместо 25 % при ЛД-процессе), второй приводит к более высокому выходу жидкого металла.

В отличие от конвертеров ЛД из горловины конвертера Кал-До выходит газ, содержащий лишь незначительное количество СО. Так как кислород поступает преимущественно в результате диффузии через шлак и меньше разбрызгивается ванна, потери железа с пылью в конвертере Кал-До составляют 11 кг на 1 т стали по сравнению с 17 кг для конвертера ЛД. По этим причинам размеры установок для охлаждения и очистки газа для конвертеров Кал-До значительно меньше и стоимость их значительно ниже.

Удельная продолжительность продувки в конвертере Кал-До с возрастанием расхода кислорода уменьшается, так же как и для конвертера ЛД. Часть кислорода расходуется на дожигание СО. Выделяющееся при этом тепло в зависимости от условий горения и теплообмена может усваиваться ванной в большей или меньшей степени. Тепло от сгорания примесей выделяется в ванне и усваивается ею полностью.

4. Кислородные конвертеры с донной продувкой

Попытки применения кислородного дутья в томассовских и бесемеровских конвертерах с донным воздушным дутьем делались неоднократно, но не принесли положительных результатов, так как футеровка днища не выдерживала тех высоких температур, которые развивались в местах подачи кислорода в металлическую ванну в результате очень интенсивного окисления примесей чугуна.

Для предохранения кладки днища конвертера от действия высоких температур было предложено фурму выполнять в виде

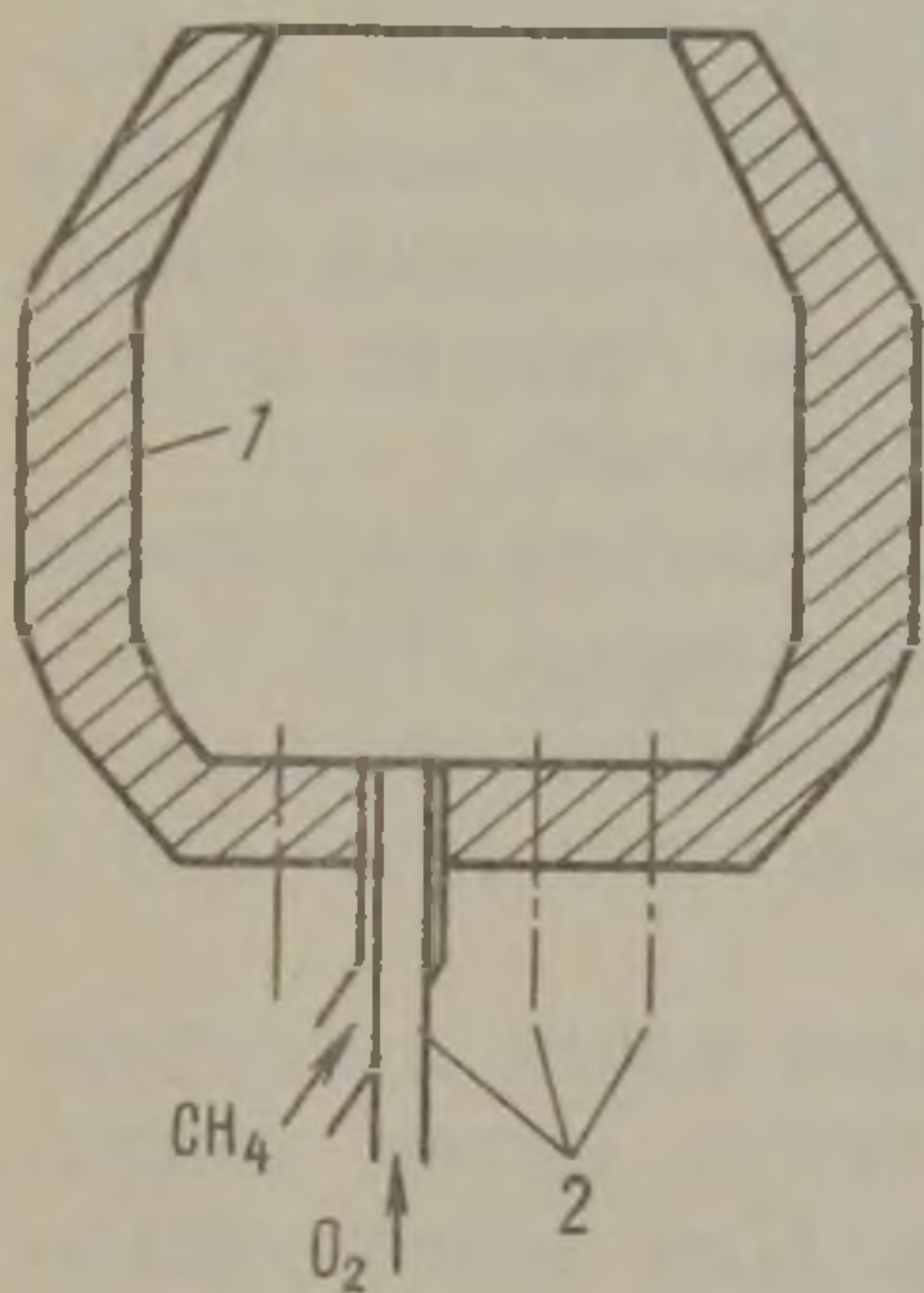


Рис. 37-6. Схема кислородного конвертера с донной продувкой:

1 — корпус конвертера; 2 — фурмы

двух коаксиальных трубок (рис. 37-6) — по центральной подавался кислород, а по периферийной — какое-либо углеводородное топливо, чаще всего природный газ. Таких фурм обычно делается 16—22, диаметр кислородного сопла фурм колеблется в пределах 28—50 мм, зазор для подачи топлива зависит от вида топлива и составляет 0,5—2,0 мм. Большое число более мелких фурм обеспечивает лучшее перемешивание ванны и более спокойный ход плавки.

Струя топлива отделяет реакционную зону от днища, снижает температуру около днища в месте выхода кислородных струй за счет отбора тепла на нагрев топлива, крекинг и диссоциацию составляющих топлива и продуктов их окисления. Охлаждающий эффект, кроме того, обеспечивается пылевидной известью, кото-

рая подается в струю кислорода. Как показывает практика, количество поданного в фурмы топлива должно составлять 5—7 % по отношению к массе кислорода. Повышение расхода топлива с целью увеличения прихода тепла и получения возможности увеличения удельного количества скрапа не приносит желаемого результата, так как приводит к образованию настывей на днище, повышению содержания водорода в стали.

Теплотехнические расчеты показывают, что количество тепла, выделяемое при окислении составляющих топлива, очень не намного превышает количество тепла, которое расходуется на диссоциацию CO_2 и H_2O . Однако конвертер с донной продувкой имеет несколько меньшие тепловые потери (по сравнению с конвертером ЛД), так как отсутствуют потери тепла на охлаждение фурм; при донной продувке приблизительно вдвое уменьшаются потери металла с дымом и, следовательно, уменьшаются потери тепла на испарение железа. Приближенный состав

расходной части теплового баланса выглядит следующим образом, %:

Тепло стали	57
Тепло шлака	13
Тепло уходящих продуктов реакций	10,3
Потери тепла на нагрев футеровки	3
Тепло на расплавление скрапа	16,7

Таким образом, расходная часть теплового баланса конвертера с донной продувкой мало чем отличается от таковой для конвертера ЛД, следовательно, и удельное количество проплавленного скрапа приблизительно такое же, как в конвертере ЛД.

Для футеровки конвертера с донной продувкой применяют, в основном, те же материалы, что и для конвертеров с верхним дутьем. Футеровка горловины и верха цилиндрической части в этих конвертерах изнашивается меньше, чем в конвертерах ЛД; в наибольшей степени изнашивается днище, которое растрескивается из-за большого перепада температур по толщине кладки. Средняя стойкость футеровки стен составляет 1600—1700 плавов, стойкость днищ 550—700 плавов. Промежуточная замена днищ — большой недостаток конвертеров с донной продувкой.

На одном из зарубежных заводов, где эксплуатируются 180-т конвертеры с донной кислородной продувкой, при выполнении технологических операций, кроме защитного углеводородного газа в сочетании с кислородом, используют азот. Сначала конвертер наклоняют под завалку, в это время через фурмы с небольшой скоростью вдувается азот. Затем загружается скрап, скорость азотного дутья увеличивается, после чего в конвертер заливается чугун. Затем конвертер переводится в вертикальное положение и производят кислородную продувку, сначала без извести, а затем с подачей извести. Перед повалкой на анализ подачу кислорода прекращают, а через фурмы с высокой скоростью подают азот. При взятии пробы скорость азотного дутья значительно снижают. Завершение плавки производится обычным путем.

Продувка расплавленного металла несколькими струями кислорода снизу создает ряд особенностей в работе конвертера. Обеспечивается большее число реакционных зон и большая межфазная поверхность контакта кислородных струй с металлом. Это позволяет увеличить интенсивность продувки до 4—5 м³ О₂/(т·мин), повысить скорость окисления углерода. Улучшается перемешивание ванны, повышается степень использования кислорода. Улучшение перемешивания влечет за собой возможность расплавления больших по массе кусков скрапа. Лучшая гидродинамика ванны обеспечивает более ровный и спокойный ход всей плавки, практически исключает выбросы. В силу этого в конвертерах с донной продувкой можно перерабатывать чугуны с повышенным содержанием марганца и фосфора.

Использование конвертеров с донной продувкой кислородом из-за меньшего угара железа позволяет получить больший выход

годной стали, превышающей таковой для конвертеров ЛД на 1,5—2 %. Плавка в 180-т конвертере с донной продувкой длится 32—39 мин, продувка 12—14 мин, т. е. производительность выше, чем у конвертеров ЛД. Однако необходимость промежуточной замены днищ нивелирует это различие в производительности.

Конвертеры с донной продувкой могут размещаться в реконструируемых мартеновских цехах. При этом обеспечивается экономия на здании (с учетом его реконструкции), равная 20—25 % стоимости нового цеха, что является очень существенным. Отсутствие в конвертерах с донной продувкой вертикально расположенной кислородной фурмы упрощает и удешевляет конструкции газоочистных устройств.

Глава 38

МАРТЕНОВСКИЕ И ДВУХВАННЫЕ ПЕЧИ

1. Общие сведения

Мартеновские печи долгое время оставались основным сталеплавильным агрегатом благодаря своей универсальности в отношении шихты, состава готовой стали, используемого топлива. Преобладающая часть тепла поступает в мартеновскую ванну из рабочего пространства печи в результате теплоотдачи от факела и элементов кладки.

На металлургических комбинатах в мартеновских печах переплавляют обычно 50—75 % жидкого чугуна и 25—50 % скрапа (скрап-рудный процесс). На металлургических заводах, не имеющих доменных печей, и на машиностроительных заводах шихта мартеновских печей состоит практически из скрапа (скрап-процесс), твердый чугун добавляется в том случае, если необходимо обеспечить требуемое содержание углерода в готовой стали.

Мартеновские печи делят на стационарные и качающиеся. У качающихся печей рабочее пространство может наклоняться в сторону разливочного пролета для выпуска стали и в сторону печного пролета для скачивания шлака. Качающиеся мартеновские печи обычно применяют для переработки чугунов с содержанием в них до 2 % P. Для удаления фосфора необходимо наводить в печи большое количество шлака и периодически его удалять, что и делается наклоном печи в сторону печного пролета. Эти печи удобны в работе и тогда, когда необходимо выпускать металл отдельными порциями (например, при фасонном литье, дуплекс-процессе и др.). Однако они сложны по конструкции и требуют больших затрат при строительстве. Основное количество мартеновской стали выплавляют в стационарных печах.

В зависимости от материала футеровки печи разделяют на основные и кислые. Под основных печей наваривают основным

огнеупорным материалом — магнезитом или смесью магнезита с доломитом, а ванну выкладывают магнезитовым кирпичом. В последнее время начинают широко внедрять набивные подины. В основных печах, которые сейчас наиболее распространены, можно перерабатывать разнообразную по составу шихту, загрязненную вредными примесями — серой и фосфором.

Под и откосы кислых печей наваривают кварцевым песком (оксидом кремния), содержащим минимальное количество посторонних примесей, а ванну выкладывают из динасового кирпича. Кислые печи применяют в настоящее время крайне редко для выплавки высококачественной и легированной сталей.

В СССР эксплуатируются промышленные мартеновские печи садкой до 900 т. Под садкой (или емкостью) печи понимают массу чугуна и скрапа, загружаемых в печь для одной плавки. Кислород, необходимый для окисления примесей, поступает в ванну обычно из двух источников: из атмосферы печи диффузией через шлак и из твердых окислителей (чаще всего железной руды), вводимых в ванну.

Развитие тепло-массообменных процессов в рабочем пространстве мартеновской печи определяется условиями сжигания топлива и характеристиками факела. Необходимость иметь в рабочем пространстве печи температуру около 1750 °С требует таких условий сжигания топлива, при которых калориметрическая температура горения должна быть около 2500 °С. Такую температуру горения невозможно получить без подогрева воздуха, идущего на горение, или воздуха и газа.

Из рабочего пространства печи уносится приблизительно 80 % тепла, поданного в печь. Это тепло уносится с отходящими газами, имеющими температуру 1600—1700 °С. Поэтому целесообразно подогрев воздуха (или воздуха и газа) производить, утилизируя тепло отходящих продуктов сгорания. В силу этого все мартеновские печи оборудованы регенераторами; если печь работает на топливе с высокой теплотой сгорания (природный газ, мазут), то подогревается только воздух, если на топливе с низкой теплотой сгорания, то подогревается и воздух и само газообразное топливо. Подогрев и воздуха, и газа осуществляется до температуры 1050—1150 °С. Таким образом, если печь отапливается смешанным газом (смесь доменного и коксового газов) с низкой теплотой сгорания (до 14 000 кДж/м³), то необходимо подогревать как воздух, так и газ, для чего требуется две пары регенераторов. При отоплении печей природным газом или мазутом требуется только одна пара регенераторов для подогрева воздуха.

Основным видом передачи тепла в мартеновской печи является тепловое излучение (~90 %), поэтому повышение температуры в рабочем пространстве, наряду с обеспечением оптимальных радиационных характеристик факела, является весьма эффективным средством интенсификации теплообмена и увеличения произ-

водительности печей. Повышение температуры ограничено огнеупорностью футеровки печи, поэтому в отдельные периоды плавки (доводка), когда температура футеровки находится на пределе, достижение необходимого уровня теплоотдачи возможно лишь за счет повышения излучательной способности факела.

Стремясь поднять производительность мартеновских печей, в течение ряда лет велись работы по использованию кислорода в факеле мартеновской печи с целью повышения температуры и окислительной способности факела. Это дало определенные позитивные результаты, но не решило проблему, так как возможное с точки зрения сжигания топлива повышение температуры серьезно ограничивалось стойкостью огнеупорных материалов футеровки.

В последние годы получила распространение продувка мартеновской ванны кислородом, которая позволила значительно увеличить производительность печей, хотя и породила свои дополнительные проблемы, связанные со стойкостью футеровки рабочего пространства и насадок регенераторов.

2. Устройство мартеновских печей

На рис. 38-1 показана одна из конструкций стационарной мартеновской печи, отапливаемой высококалорийным топливом. Печь можно условно разделить на верхнее (выше рабочей площадки 16) и нижнее (ниже рабочей площадки) строения. Верхнее строение печи состоит из рабочего пространства 8, головок 6 и вертикальных каналов 4. Нижнее строение печи включает в себя регенераторы 2, шлаковики 3 и борова 1.

Рабочее пространство — это та часть печи, где протекают процессы выплавки стали, сгорания топлива и передачи тепла материалам шихты. В передней стенке рабочего пространства предусмотрены завалочные окна 15, обрамленные с обеих сторон столбиками 14. Завалочные окна служат для завалки шихты в печь, заливки чугуна и скачивания шлака. Число окон обычно нечетное (от 3 для малых печей до 7 для больших). В задней стенке 11 расположены отверстия для выпуска стали и шлака. Среднее окно предназначено также для обслуживания сталевыпускного отверстия.

На некоторых печах жидкий чугун заливают через отверстие, находящееся в задней стенке рабочего пространства. Стены печи наклонены для того, чтобы при заправке с них не сыпались заправочные материалы.

Нижняя часть рабочего пространства, ограниченная подиной 10 и откосами 7 и 9 печи (нижней частью передней, задней и торцевых стенок), называется ванной. Ванна вмещает весь жидкий металл в шлак. Верхним уровнем ванны являются пороги — стальные плиты, образующие нижнюю часть завалочных окон. Сверху рабочее пространство ограждено арочным сводом 13.

В своде есть отверстия, через которые в печь вводят кислородные фурмы 12 для продувки ванны кислородом.

С торцевых сторон к рабочему пространству примыкают головки печи. Головки служат для подвода топлива в печь при помощи горелок 5, смешения его с воздухом и подготовки к сжиганию, а также для отвода из печи продуктов сгорания топлива и технологических газов. Поэтому требования, предъявляемые к ним, противоречивы. С одной стороны, когда через головку в печь подаются топливо и воздух для создания больших скоростей истечения газов, т. е. для хорошего перемешивания топлива

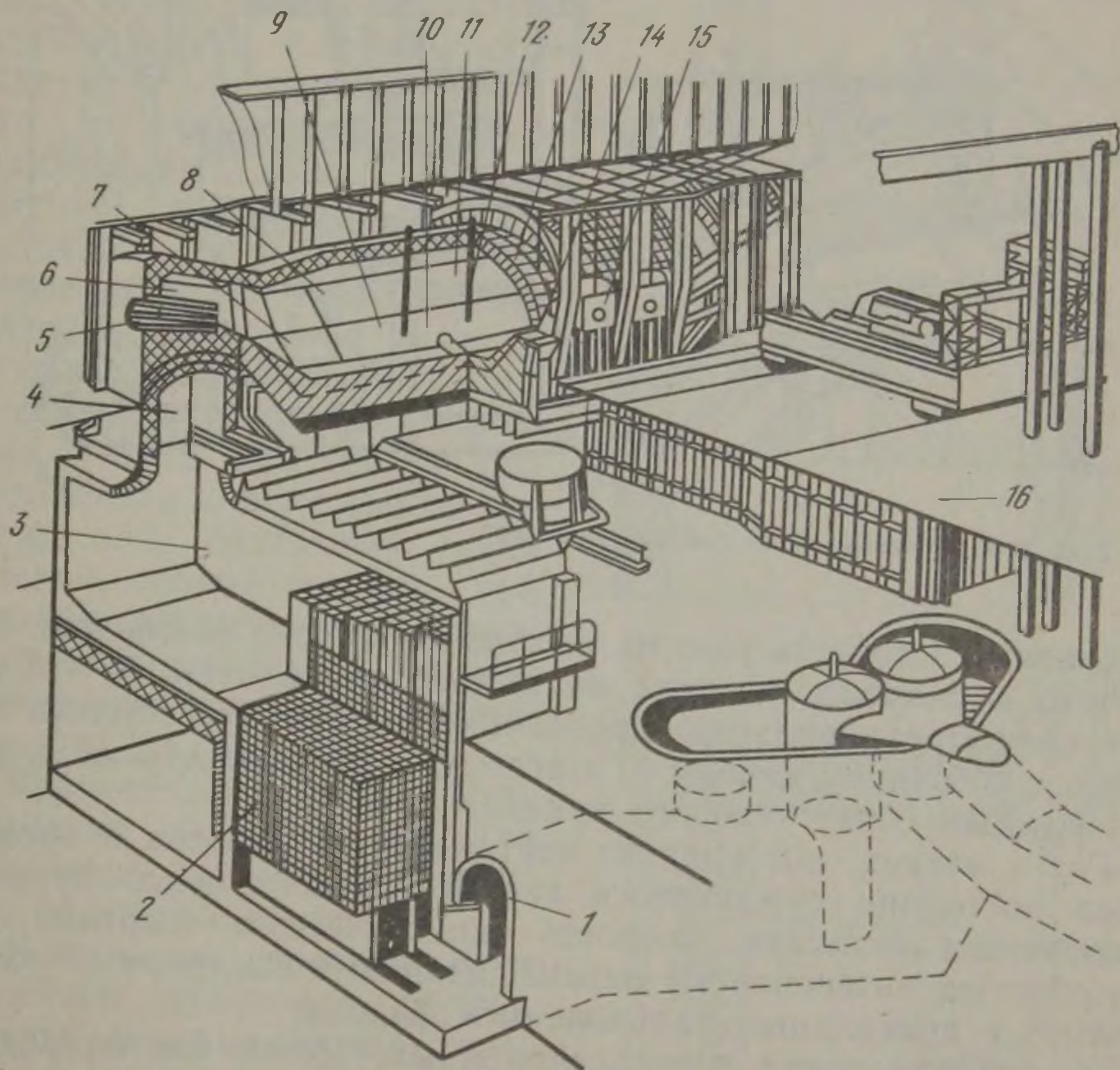


Рис. 38-1. Мартеновская печь, отапливаемая высококалорийным топливом

с воздухом и получения жесткого факела, необходима небольшая площадь сечения газовых каналов. С другой стороны, каналы малого сечения характеризуются большим гидравлическим сопротивлением в тот период, когда головка служит для отвода газов из печи. Правильный выбор конструктивных размеров головок печи особенно усложняется для печей, отапливаемых низкокалорийным топливом и, следовательно, оборудованных газовыми (для подогрева газообразного топлива) и воздушными (для подогрева воздуха) регенераторами. В этом случае головки должны быть так сконструированы и иметь такие размеры окон

для выхода газа и воздуха, чтобы обеспечить правильное распределение проходящих через них продуктов сгорания между воздушными и газовыми регенераторами.

Печи, отапливаемые смешанным газом, оборудуются трехканальными головками Вентури (рис. 38-2). Головки Вентури имеют длинный наклонный газовый канал 1, перекрытый футерованным изнутри и снаружи металлическим водоохлаждаемым

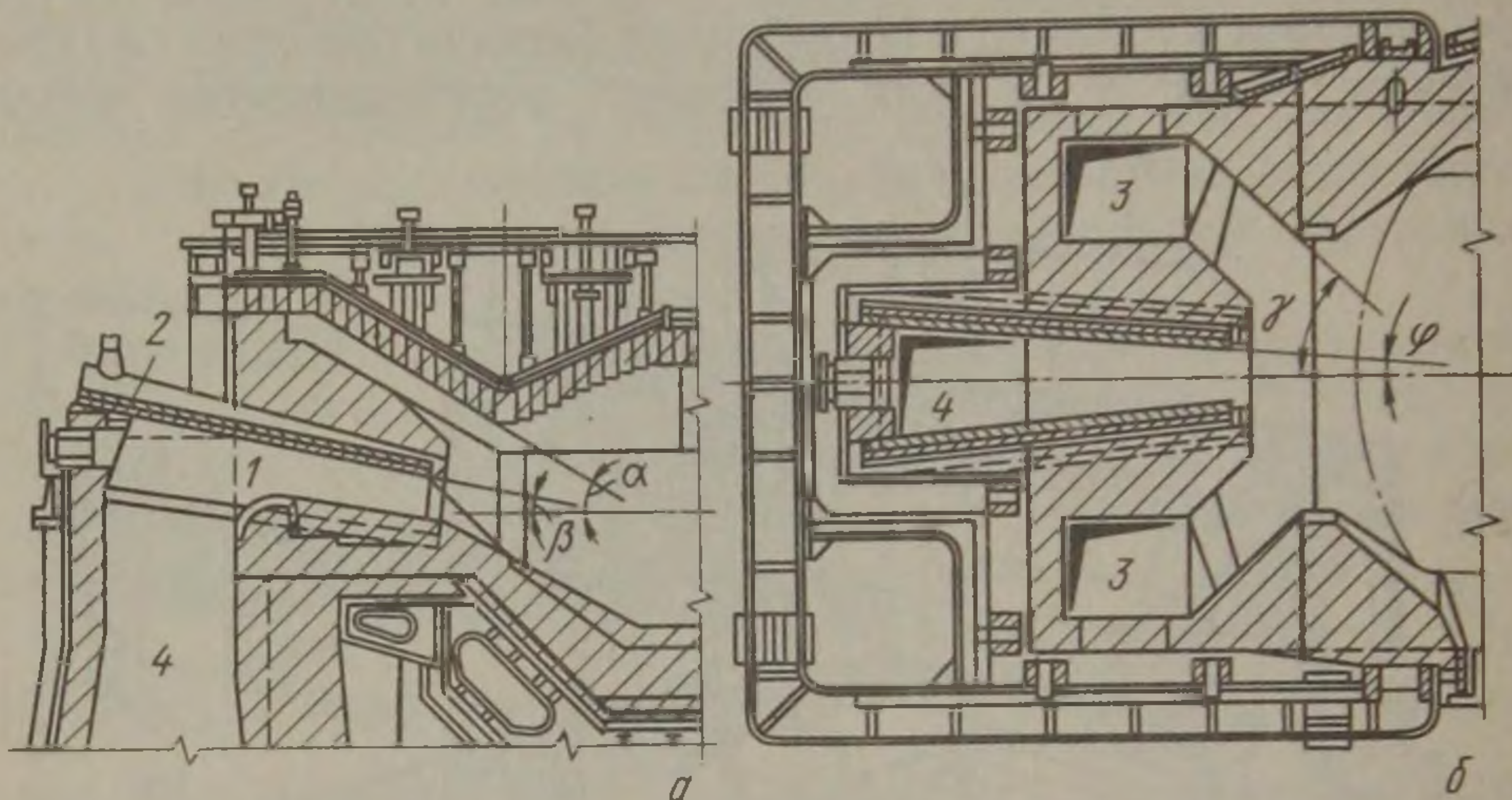


Рис. 38-2. Трехканальная головка Вентури

кессоном 2. Скорость газа на выходе из кессона составляет 50—55 м/с, а скорость воздуха на выходе из головки 12—15 м/с. Название «трехканальная» происходит от того, что топливо подводится по одному каналу 4, а воздух — по двум другим 3, расположенным сбоку газового канала.

Газ и воздух, поступая из вертикальных каналов и проходя через постоянно сужающиеся газовый и воздушный пролеты, приобретают большую скорость (кинетическую энергию), что способствует интенсивному перемешиванию и быстрому сгоранию топлива с правильным направлением факела.

Применение таких высококалорийных топлив, как природный газ и мазут, упрощает конструкцию головки и всей печи в целом, так как исключается потребность в регенераторах для подогрева топлива. Печи с такими головками имеют только одну пару регенераторов для подогрева воздуха.

Мартеновские печи, работающие на природном газе, мазуте или смеси мазута с природным газом, могут быть оборудованы двух или одноканальными головками.

Двухканальная головка Вентури отличается от трехканальной тем, что у нее отсутствует газовый вертикальный канал. Подогретый воздух подается по двум вертикальным каналам, а природный газ или мазут соответственно через горелку или форсунку, расположенные на разделительной стенке этих каналов. В одно-

канальных головках (рис. 38-3) воздух подается не по двум, а по одному вертикальному каналу 1, а топливо — через горелку или форсунку 2. Эти головки отличаются наиболее простой конструкцией. Иногда при отоплении печей природным газом используют старые трехканальные головки.

Как уже отмечалось, факел мартеновской печи должен обладать достаточной светимостью, т. е. иметь хорошую излучательную способность. Если печь отапливается мазутом, то дополнительных мер принимать не надо, так как мазутный факел обладает достаточной светимостью. При отоплении печей газообразным топливом обеспечение должной светимости может быть достигнуто двумя способами: добавками мазута или смолы (искусственная карбюризация факела) или созданием таких условий работы головки, при которых обеспечивается самокарбюризация факела за счет разложения углеводородов топлива (см. гл. 5).

Вертикальные каналы мартеновских печей служат для соединения рабочего пространства со шлаковиками.

К нижнему строению печи относятся шлаковики, регенераторы, дымовые боровы, перекидные устройства. Шлаковики предназначены для очистки газов, уходящих из рабочего пространства, от крупной пыли. Очистка основана на том, что газы, попадая в шлаковик, теряют свою скорость вследствие резкого и внезапного расширения канала. Газы, движущиеся с небольшой скоростью, не могут увлечь за собой крупные частицы пыли, и последние оседают на дно шлаковика. Частично очищенные газы изменяют на 90° направление своего движения и поступают в ре-

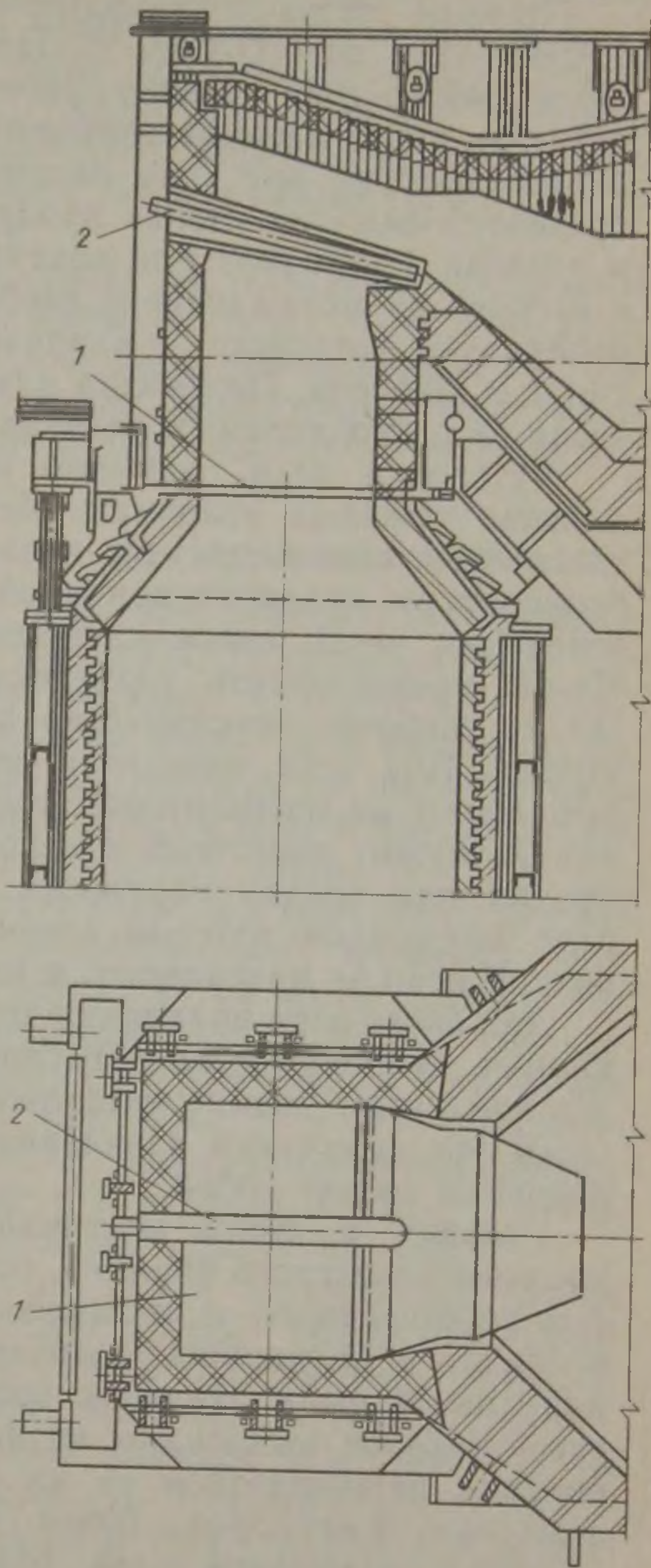


Рис. 38-3. Одноканальная головка мартеновской печи

генераторы, где отдают свое тепло огнеупорной насадке. Объем шлаковика должен быть таким, чтобы в нем умещалась пыль, оседающая за время межремонтного периода (2—3 мес.).

Проходя через регенераторы, дымовые газы охлаждаются с 1500—1600 до 800—600 °С. После перекидки клапанов, когда через разогретую насадку регенераторов пропускается воздух или газ, тепло насадки передается им, в результате чего температура воздуха или газа поднимается до 850—1150 °С. Борова предназначены для отвода продуктов сгорания из регенераторов и подвода к ним газа или воздуха. Переключение регенераторов с нагрева на охлаждение и наоборот осуществляется с помощью перекидных устройств — клапанов тарельчатого и золотникового типов и шиберов. Перекидка клапанов осуществляется автоматически, а в необходимых случаях вручную.

Футеровка печи, особенно рабочего пространства, работает в очень тяжелых условиях. Механические удары и истирание, химическое взаимодействие плавильной печи и шлаков, высокие температуры являются причиной использования для кладки мартеновских печей высококачественных огнеупорных материалов. Чтобы предотвратить разъедание кладки основными оксидами шлака, рабочее пространство выкладывают из основных огнеупоров. Под печи, заднюю и переднюю стенки, а также откосы выполняют из магнезитового кирпича. В качестве тепловой изоляции служит шамотный и пеношамотный кирпич, который применяют для кладки наружных слоев. Внутреннюю поверхность пода покрывают толстым слоем магнезитовой наварки. Иногда подину печи не наваривают, а набивают магнезитовым порошком.

Для свода печи применяют термостойкий магнезитохромитовый кирпич. В процессе кладки свода между отдельными кирпичами устанавливают тонкие металлические прокладки. При разогреве свода эти прокладки расплавляются, и отдельные кирпичи свариваются между собой.

Головки и стены вертикальных каналов выкладывают из хромомагнезитового кирпича, стены шлаковиков и верхнюю часть стен регенераторов — из динасового кирпича с облицовкой хромомагнезитом. Облицовка защищает кладку от вредного воздействия плавильной пыли. Нижнюю часть стен и большую часть насадки регенераторов выполняют из шамотного кирпича; верхние ряды насадки регенераторов — из форстеритовых или высокоглиноземистых огнеупоров, более устойчивых против агрессивного действия плавильной пыли. Борова и внутреннюю часть дымовой трубы футеруют шамотным кирпичом.

Современная мартеновская печь обычно оборудована котлом-утилизатором, позволяющим использовать до 50 % тепла дымовых газов для получения пара, установкой для очистки дымовых газов от пыли, комплектом контрольно-измерительных приборов и приборов автоматического управления тепловым режимом печи. Печи снабжены также системой испарительного охлаждения.

3. Работа мартеновских печей

Режим работы мартеновских печей достаточно сложен, так как на нем отражается взаимосвязь технологических и теплотехнических операций и приемов, к числу которых относятся: последовательность технологических операций; изменение расхода топлива по ходу плавки; поддержание необходимых характеристик факела, использование кислорода, непрерывный контроль за состоянием футеровки печи и др.

Применение кислорода для продувки мартеновской ванны вносит ряд специфических особенностей в работу печи. Учитывая это, а также то, что в настоящее время еще нередки печи, работающие без продувки ванны кислородом, рассмотрим прежде всего тепловую работу мартеновской печи, работающую без применения кислорода.

Тепловая работа мартеновской печи (без применения кислорода)

Как и в каждой печи, основой тепловой работы мартеновской печи является интенсивная теплопередача, направленная на то, чтобы передать проплавленному металлу наибольшую часть, поданного в рабочее пространство печи тепла. Для интенсификации теплообмена и ускорения плавки необходимо поддерживать максимальную разность между температурой печи и поверхностью твердой шихты или поверхностью жидкой ванны (см. том 1). Очевидно также и то, что на скорость нагрева и плавления влияют условия передачи тепла внутри расплавляемого материала или внутри жидкой ванны. Передача тепла внутри материала зависит в первую очередь от его теплопроводности, которая в течение плавки изменяется очень значительно. Загружаемый в печь скрап может иметь самую различную сыпную массу и самую различную эквивалентную теплопроводность. Чем крупнее куски скрапа, тем быстрее он будет прогреваться и плавиться. Именно по этой причине повсеместно применяется пакетирование скрапа.

В течение всего периода плавки после образования ванны расплавленный металл покрыт слоем шлака, представляющего смесь различных оксидов. Состав шлака определяется технологией плавки. Вместе с тем именно поверхность шлака воспринимает тепло, излучаемое на ванну факелом и кладкой печи. Шлак также, как металл, в зависимости от химического состава и своего физического состояния (прежде всего пористости) может иметь ту или иную теплопроводность, которая в значительной степени будет определять характер теплового баланса на поверхности шлака и температуру поверхности. Тепловой баланс на поверхности шлака будет определяться также его радиационными характеристиками, т. е. поглощательной, излучательной и отражательной способностями. Проведенные исследования показали, что шлак не является серым телом и имеет очень сложную зависимость своих радиационных характеристик от химического

состава и состояния поверхности. Это очень важные, хотя и недостаточно изученные особенности мартеновской плавки, так как если плохо прогревается шлак, то недостаточное количество тепла поступает в металлическую ванну.

Таким образом, теплообмен в рабочем пространстве мартеновской печи крайне сложен, не поддается строгому описанию. Для обеспечения высокопроизводительной и экономичной работы мартеновской печи необходимо знать особенности теплообмена

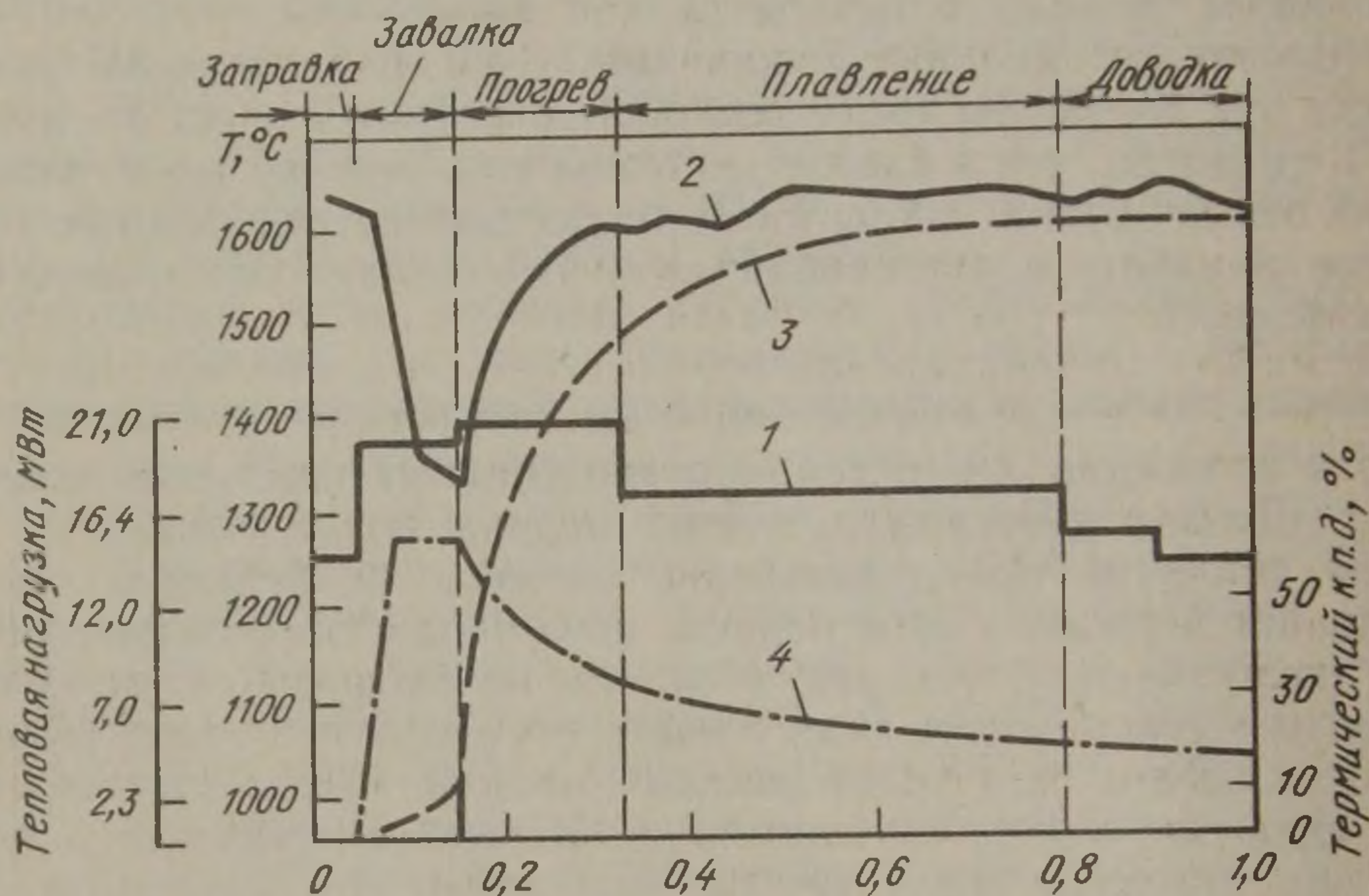


Рис. 38-4. Изменение тепловой нагрузки 1, температуры поверхности свода 2 и шихты 4, ванны 3 и термического к. п. д. по длине плавки

в каждый период плавки. Процесс плавки по организационно-технологическим и теплотехническим признакам разбивается на следующие периоды: заправка, завалка, прогрев (если печь работает на жидком чугуна, то этот период отсутствует), плавление, доводка.

Обычно для мартеновских печей составляют тепловой график плавки, один из которых в качестве примера приведен на рис. 38-4. Как видно из графика, по ходу плавки контролируются такие величины, как тепловая нагрузка 1, температура поверхности свода 2, температура поверхности шихты 4 ванны 3, рассчитывается термический к. п. д. Тепловая нагрузка и температура свода основные величины, по которым ведется плавка.

Рассмотрим кратко теплотехнические характеристики каждого периода плавки.

Период заправки печи предназначен для поддержания кладки подины печи в надлежащем состоянии. В течение этого периода устраняют повреждение подины перед последующей завалкой. В этот период в печи металла нет, топливо тратится только на поддержание рабочей температуры. В период

заправки надо всемерно избегать охлаждения кладки печи, особенно подины, поскольку это впоследствии приведет к удлинению плавки. Причиной охлаждения кладки может быть подсос холодного воздуха, поскольку в отдельные моменты этого периода давление в печи на уровне рабочих окон поддерживается ниже атмосферного. Это делается для того, чтобы избежать выбивание раскаленных газов и дать возможность обслуживающему персоналу выполнить необходимые заправочные операции. Очевидно, что заправку надо производить как можно быстрее, для чего используют специальные механизмы. Тепловая нагрузка в этот период на 15—20 % выше тепловой нагрузки холостого хода¹.

Период завалки — это время, необходимое для завалки твердой шихты в печь. В течение этого периода обеспечивается наивысшая теплоотдача к шихте, так как имеют место низкая температура и большая поверхность твердой шихты, возможность проникновения горячих газов в толщу шихты и, как следствие, развитие конвективной теплоотдачи к металлу. Интенсивная теплоотдача к металлу резко снижает опасность поджога свода. Температура свода в этот период понижается, так как много тепла забирает заваленный холодный металл. Все это позволяет держать в этот период максимально возможную тепловую нагрузку. Однако, для того, чтобы обеспечить столь благоприятные условия для хода плавки необходимо применять определенный порядок завалки шихты. Металлическую часть шихты, имеющую высокую теплопроводность, следует загружать после сыпучих материалов — известняка и руды.

Период прогрева необходим для того, чтобы поднять температуру шихты до значения, несколько превышающего температуру плавления чугуна. Если чугун заливать на непрогретую шихту, то относительно холодная шихта охладит часть его до температуры ниже температуры его плавления что приведет к так называемому «закозлению» шихты. Образующаяся твердая корка ухудшит передачу тепла во внутренние микрообъемы шихты, что удлинит их прогрев и плавление.

Не следует также допускать значительный перегрев шихты, так как заливка чугуна на сильно перегретую шихту вызывает бурную реакцию окисления примесей чугуна и может вызвать выброс металла из печи. В этот период условия теплообмена близки к условиям периода завалки, однако температура свода постепенно повышается, хотя и не достигает критического уровня. Поэтому тепловую нагрузку надо поддерживать на максимальном уровне.

Период плавления металлической части шихты — время от конца периода ее прогрева до полного ее расплавления. При работе на скрапе и твердом чугуне (скрап-процесс) плавление

¹ Напомним, что нагрузкой холостого хода называется такая, при которой для пустой печи с закрытыми рабочими окнами обеспечивается поддержание необходимой температуры. Вводимое в печь тепло компенсирует лишь тепловые потери.

начинается сразу после завалки, поэтому в начале этого периода условия теплообмена подобны условиям периода прогрева и можно держать высокие тепловые нагрузки. При скрап-рудном процессе (60—75 % жидкого чугуна) плавление твердой шихты протекает под слоем шлака в жидком чугуне. Поэтому в этом случае, как и для скрап-процесса, интенсивность теплообмена зависит главным образом от степени перемешивания ванны за счет пузырей CO и CO₂.

В этот период большую роль играет теплоотдача от факела, который должен иметь настильные свойства, что приближает максимум температур к поверхности ванны и создает условия направленного теплообмена. В этот период уже необходимо, чтобы факел имел высокую степень черноты и обеспечивал большие тепловые потоки на поверхность ванны. Температура свода в этот период достигает своего предельного уровня. По мере роста температуры свода тепловая нагрузка снижается.

Период доводки — это отрезок времени от момента полного расплавления до выпуска готовой стали. В период доводки температура свода и температура поверхности ванны достигают максимальных величин. Причем температура кладки свода находится на пределе ее огнеупорности. Окисление углерода значительно снижается, падает газовыделение и ослабевают перемешивание металла. В результате значительного и непрерывно растущего подъема температуры поверхности ванны постепенно уменьшается разность температур между температурой печи (свода, факела) и температурой поверхности ванны. Все это приводит к тому, что условия теплообмена в период доводки наихудшие и тепловая нагрузка должна снижаться до минимального уровня. Однако, питание ванны теплом необходимо, так как в этот период металл доводят до заданного химического состава путем добавления различных твердых ферросплавов. Чтобы способствовать питанию ванны теплом в этот период необходимо, чтобы факел имел высокую светимость.

Производительность мартеновских печей определяется несколькими показателями: годовой (т/г), часовой (т/ч) производительностью и съемом стали с 1 м² площади пода в сутки. Удельный расход тепла колеблется от ~2100 МДж/т (крупные печи) до ~6300 МДж/т (малые печи). Годовая производительность наиболее важный показатель работы печи. Она зависит от часовой производительности и длительности простоев на ремонт. Для современных мартеновских печей холодные и горячие ремонты составляют 5—7 % времени эксплуатации. Показатели работы мартеновских печей приведены ниже:

Садка печи, т	200	400	600	900
Производительность:				
годовая, тыс. т	200—240	370	490	670
часовая, т	24—29	45	59	81
Продолжительность				
плавки, ч	8—10	—	—	10—12

Для сравнения отметим, что продолжительность одной плавки 200-т кислородного конвертера составляет 45—50 мин.

Роль и формирование факела

Роль факела в работе мартеновской печи первостепенна. Факел определяет тепло-массообменный уровень работы печи. Факел мартеновской печи должен удовлетворять трем основным требованиям:

иметь достаточно высокую (по требованиям процесса сталеварения) температуру;

иметь (хотя бы в период плавления и доводки) высокую излучательную способность (светимость);

быть настильным и иметь достаточную окислительную способность.

Как уже отмечалось, температура факела определяется теплотворной способностью топлива, степенью подогрева воздуха (или воздуха и газа), величиной коэффициента расхода воздуха. Поскольку эти вопросы достаточно полно рассмотрены выше (см. гл. 5), остановимся несколько подробнее на значении величины коэффициента расхода воздуха. Количество используемого в мартеновской печи воздуха определяется не только необходимостью обеспечения полноты сгорания топлива, но и необходимостью, практически на протяжении всей печи, иметь в факеле достаточное количество газов-окислителей, обеспечивающих диффузию кислорода в металлическую ванну. Обычно коэффициент расхода воздуха в мартеновской печи поддерживается на уровне $\sim 1,2$.

И окислительные, и теплообменные функции факела тесно связаны с его аэродинамикой, в основе которой лежит необходимость обеспечения настильности факела при достаточно высоких скоростях его движения. В мартеновских печах интенсивность смешения топлива с воздухом, выходные скорости потоков, настильность факела обеспечиваются конструкцией головки печи. Факел должен как можно дольше стелиться по поверхности ванны, закрывая большую часть ее с тем, чтобы обеспечить необходимый контакт газовой фазы с поверхностью ванны и максимально возможный конвективный теплообмен, а также приблизить максимум температур к поверхности ванны, что создает благоприятные условия для направленного лучистого теплообмена.

Конструирование головки мартеновской печи ответственное и тонкое дело, связанное прежде всего с правильным выбором углов наклона образующих головки по отношению к горизонтальной и вертикальной плоскостям (см. рис. 38-2 и 38-3). Углы α и β определяют развитие факела в вертикальной плоскости, углы γ и φ в горизонтальной плоскости. Основное влияние на формирование факела особенно в печах, работающих на газовом топливе, оказывает воздушный поток, масса которого всегда существенно больше массы топлива. Поэтому углы α и β должны выбираться особенно тщательно. Рассчитать все эти углы с при-

емлемой точностью практически невозможно, поэтому на помощь приходит эксперимент. Большую пользу в этом случае приносит моделирование.

Необходимость иметь в рабочем пространстве мартеновских печей хорошо светящийся факел ставит перед конструкциями головок дополнительные требования по созданию благоприятных условий по развитию процессов самокарбюрации газообразного топлива. Излучение светящегося факела серьезно зависит от размера взвешенных в нем сажистых частиц. Обеспечивающие высокую степень черноты факела крупные частицы (150—20 нм) состоят частично из промежуточных продуктов разложения метана и образуются в довольно узком температурно-временном интервале. В трехканальных головках путем принятия специальных конструктивно-эксплуатационных мер можно создать такие условия, при которых за счет самокарбюрации можно получить хорошо светящийся факел природного газа. В современных одноканальных головках такие условия создать невозможно, так как в головке развивается температура слишком высокая, а продолжительность пребывания газа в головке слишком мала, чтобы можно было получить путем самокарбюрации хорошо светящийся факел. В настоящее время почти повсеместно используют искусственную карбюризацию факела газообразного топлива мазутом, расходуя при этом его в количестве 20—35 % от всего расхода тепла на печь.

Использование дутья, обогащенного кислородом

Большое влияние на характеристики факела и печи в целом оказывает подача в факел газообразного кислорода, т. е. использование дутья, обогащенного кислородом. До применения продувки мартеновской ванны кислородом использование обогащенного дутья было весьма результативным методом интенсификации теплообменных и окислительных процессов в рабочем пространстве мартеновских печей. При использовании обогащенного дутья преследовали, в основном, три главные цели: повышение температуры факела и печи в целом; интенсификацию окислительных и теплообменных процессов; повышение теплового к. п. д. рабочего пространства мартеновской печи.

Увеличение содержания кислорода в дутье приводит к снижению удельного количества дымовых газов и, при прочих равных условиях, к повышению температуры сгорания топлива. Используя различную степень обогащения дутья кислородом, при одном и том же топливе можно достичь весьма высоких значений температуры горения. Однако повышение температуры в мартеновских печах сдерживается стойкостью огнеупорных материалов, огнеупорность которых за последние десятилетия поднялась всего на 60—70 °С (динас ~1690 °С, магнезитохромит ~1760 °С). Поэтому применение кислорода с этой точки зрения может быть

наиболее целесообразно в те периоды плавки (завалка, плавление), когда нет опасности поджога свода. Подъем температуры факела в этот период усилит тепловой поток на металл, ускорит его прогрев и плавление. Это в свою очередь позволит ускорить эти периоды и обеспечить увеличение производительности печи. Обогащенное дутье позволяет интенсифицировать окислительные процессы.

В мартеновской печи главными источниками кислорода, необходимого для окисления примесей металла, являются железная руда и раскаленные газы, расположенные над металлической ванной. Использование кислорода прежде всего способствует повышению парциального давления кислорода в печных газах, что способствует усилению диффузии кислорода в ванну. Надо иметь также в виду, что кислород обычно вводят под факел, между факелом и шлаком, что в начале рабочего пространства создает зону со значительным повышением парциального давления. Здесь уместно заметить, что такая подача кислорода обеспечивает развитие максимальных температур непосредственно у ванны, создает условия направленного теплообмена и интенсифицирует теплоотдачу к металлу. Кроме того, вдуваемый кислород в начале ванны частично проникает в шлак, кислородная струя на некотором участке «сдувает» шлак и толщина его уменьшается. В период «кипения» металла, когда идет интенсивное окисление углерода и ванна интенсивно барботируется, возможен также непосредственный кратковременный контакт обнажающегося металла с газовой фазой, обогащенной кислородом. Все это интенсифицирует окислительные процессы, что хорошо подтверждается данными, приведенными в табл. 38-1. Как видно из приведенных данных, повышение степени обогащения дутья кислородом позволяет снизить расход руды в завалку и, как следствие, уменьшить расход тепла на ее нагрев и разложение.

Т а б л и ц а 38-1. Влияние обогащения дутья кислородом на окислительные процессы в мартеновской ванне (200-т печь, скрап-рудный процесс)

Показатели	Степень обогащения, % O ₂		
	(воздух)	25	30
Доля чугуна в шихте, %	65,3	65,9	66,2
Доля руды в шихте, %	12,0	10,7	9,0
Средняя скорость окисления углерода, % С/ч	0,64	0,68	0,93
Содержание в шлаке по расплавлению, %:			
FeO	12,19	13,06	15,36
Fe ₂ O ₃	5,05	6,05	7,23
Основность шлака по расплавлению CaO/SiO ₂	2,6	2,6	2,6

Продукты сгорания уходят из рабочего пространства мартеновской печи с весьма высокой температурой (1600—1750 °С). Оче-

видно, что чем меньше количество уходящих газов, тем меньше тепла унесут они из рабочего пространства печи. При этом больше тепла остается в рабочем пространстве и повышается тепловой к. п. д. рабочего пространства.

Снизить расход отходящих газов при постоянной тепловой нагрузке можно лишь двумя способами — снизив величину коэффициента расхода воздуха и применив обогащенное кислородом дутье. Первый способ не эффективен, так как влечет за собой снижение полноты горения. Остается только применение обогащенного дутья.

Таким образом, можно сделать общий вывод о том, что применение обогащенного дутья в мартеновских печах положительно влияет на развитие процессов теплообмена в рабочем пространстве печей и способствует повышению их производительности. Однако, по современным требованиям достигаемое при этом повышение производительности является недостаточным, что и вызвало необходимость продувки мартеновской ванны кислородом.

Продувка ванны кислородом

В процессах продувки кислородом конвертерных и мартеновских ванн есть много общего. Остановимся на специфических особенностях, характерных для применения продувки мартеновской ванны кислородом, и в первую очередь на пылеобразовании и разбрызгивании. Конечно, и в конвертерах пылеобразование крайне нежелательно, так как снижает выход годного и сильно засоряет отходящие газы. Но в мартеновских печах значительное пылеобразование может оказаться пагубным для регенераторов. Надо стремиться к тому, чтобы и главный свод и регенераторы ремонтировались в одно время, поскольку ремонт в разное время снижает годовую производительность печей.

Разбрызгивание играет большую роль для мартеновских печей, чем для конвертеров, поскольку рабочее пространство печи перекрыто сводом, очень уязвимым для разрушающего действия брызг.

Проведенные исследования показывают, что продувка кислородом очень сильно увеличивает пылеобразование в мартеновской печи. Средняя запыленность продуктов сгорания 400-т мартеновской печи во время плавления (пробы из вертикальных каналов) приведена ниже:

Средняя запыленность, г/м ³ :	
без кислорода	1,1
при расходе кислорода, м ³ /ч:	
2300	8,2
4000	13,0
5600	24,5

Чтобы бороться с пылеобразованием, надо четко представлять себе причины возникновения пыли. Здесь далеко не все ясно.

Большинство исследователей сходятся на том, что пыль образуется как из всплесков расплавленного металла, так и из паров железа. При продувке кислородом из ванны выделяется значительно большее количество газов, чем при обычном кипении, что способствует механическому отрыву и выносу из ванны частиц металла и шлака. В реакционной зоне непосредственно под фурмой развивается очень высокая температура, что вызывает интенсивное испарение железа.

Разбрызгивание металла и шлака зависит главным образом от положения фурм относительно ванны, направления и импульса кислородных струй, физических свойств шлака. При продувке без погружения фурм брызги состоят главным образом из шлака. Брызги, образующиеся в результате продувки мартеновской ванны с погружением фурм на границу шлак — металл, представляет собой двухфазные образования. Установлено, что в реальных условиях печи на максимальную высоту поднимаются брызги некоторого определенного размера приблизительно от 1 до 5 мм диаметром. Большое влияние на разбрызгивание оказывает вязкость шлака. Если шлак плохо прогрет и вязкость его велика, разбрызгивание будет значительным. Наличие в шлаке кусков нерастворившихся сыпучих материалов также способствует разбрызгиванию.

Таким образом, разбрызгивание главным образом зависит от положения фурмы относительно поверхности ванны и от конструкции фурм. В настоящее время по технологическим соображениям продувку в мартеновских печах проводят преимущественно с погружением фурм на границу шлак — металл. В этом случае значительная часть газа выходит из ванны крупными порциями в зоне продувки, что способствует брызгообразованию. При нормальном ходе плавки важнейшим методом борьбы с брызгообразованием является использование многосопловых фурм, обеспечивающих достаточно спокойное взаимодействие газовых струй с поверхностью жидкой ванны. Этим и объясняется существующая тенденция к созданию фурм, имеющих 6 и более сопел. Однако излишняя форсировка продувки ванны мартеновской печи и, связанное с ней увеличение производительности, может быть сведено на нет учащающимися при этом ремонтами.

4. Двухваннные печи

При интенсивной продувке мартеновской ванны выделяется значительное количество CO , который трудно полностью дожечь в самом рабочем пространстве. Часть несгоревшего CO и большое количество пыли выносятся дымовыми газами из рабочего пространства печи. Для лучшего использования CO и частичного улавливания пыли в самом рабочем пространстве создана двухванная сталеплавильная печь (рис. 38-5).

Рабочее пространство такой печи разделено перевалом на две ванны. Обе ванны имеют общий свод, так что продукты сгорания, образующиеся в одной ванне, проходят вторую часть рабочего пространства.

Печь работает следующим образом: в одной ванне (горячей) происходит плавление и доводка с интенсивной продувкой металла кислородом, а во второй ванне (холодной) в то же время идет завалка и прогрев твердой шихты. Газы из горячей части печи направляются в холодную и состоят до 35 % из оксида углерода.

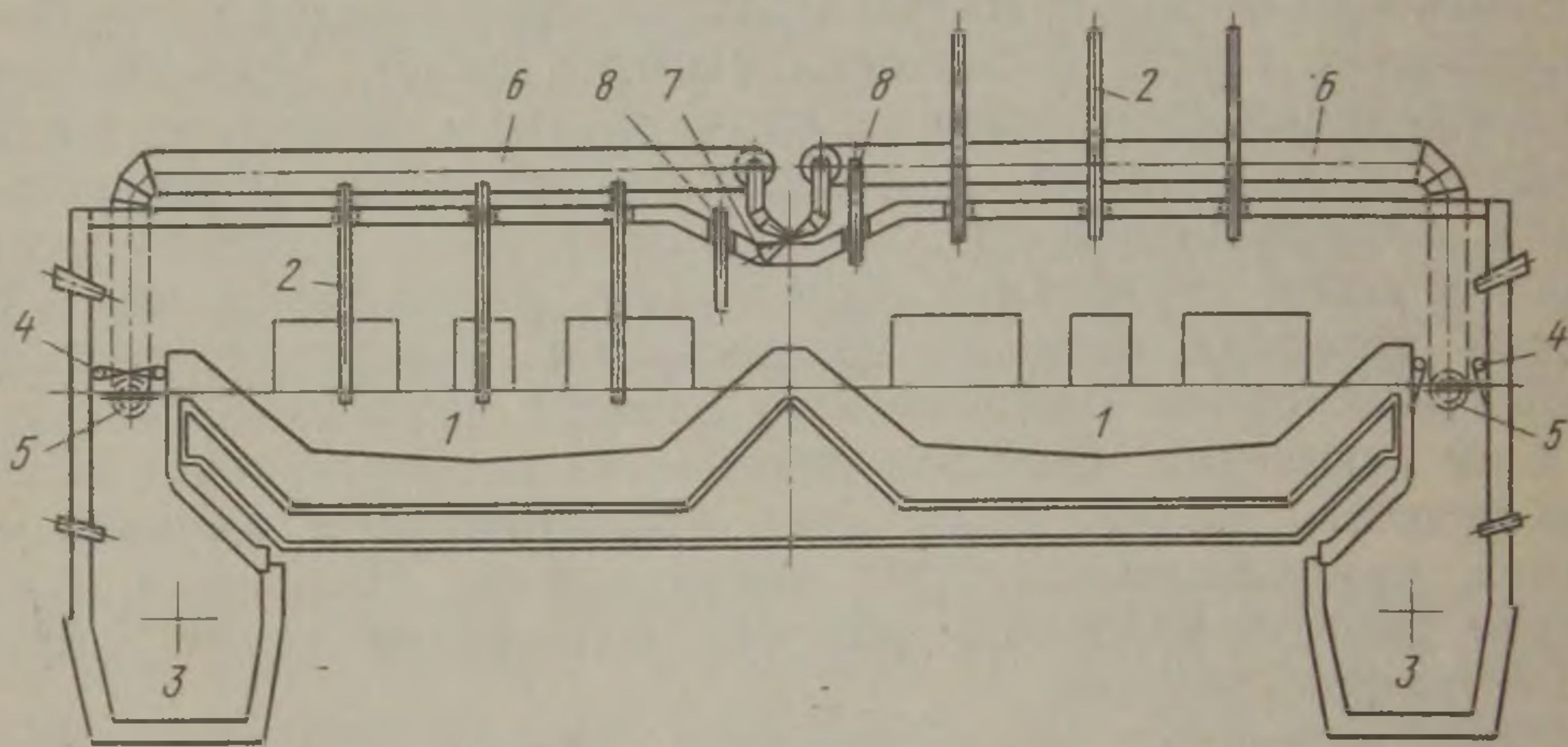


Рис. 38-5. Двухванная печь 2 × 300 т

1 — ванны печи; 2 — фурмы; 3 — шлаковики; 4 — водоохлаждаемые заслонки; 5 — амбразуры для отбора воздуха из вертикального канала; 6 — футерованные воздухопроводы; 7 — амбразуры в своде печи; 8 — эжекторы

В холодной части печи СО догорает до CO_2 и за счет выделяющегося тепла происходит нагрев твердой шихты. Недостающее для процесса нагрева тепло восполняется подачей природного газа через горелки, установленные в своде печи. Сгорание природного газа и догорание СО совершаются за счет дополнительного кислорода.

Когда готовую сталь из первой ванны выпускают, во вторую ванну заливают жидкий чугун. После заливки чугуна тут же начинают продувку ванны кислородом. Заканчивается продувка за 5—7 мин до выпуска. С выпуском металла из первой ванны цикл плавки заканчивается и начинается новый. В то же время с помощью перекидных шиберов изменяется направление движения газов. Теперь бывшая холодная ванна становится горячей. Первую ванну заправляют и производят завалку шихты, и цикл повторяется.

Двухванная печь должна работать таким образом, чтобы было равенство холодного и горячего периодов, протекающих одновременно в разных ваннах. В холодный период входит выпуск, заправка, завалка, прогрев, заливка чугуна; в горячий период — плавление и доводка. Например, для печи с садкой каждой ванны 250 т общая продолжительность плавки составляет 4 ч, каждый

период длится по 2 ч. Металл выпускается также через каждые 2 ч. Раскисление стали производят в ковше.

Металл продувают кислородом в каждой ванне через две — три кислородные фурмы с интенсивностью 20—25 м³/ч на 1 т металла. Каждая часть печи оборудована сводовыми кислородными фурмами и газокислородными горелками. Горелки необходимы для сушки и разогрева печи после ремонтов, а также для подачи дополнительного топлива.

Современные двухваннные печи работают на техническом кислороде, без вентиляторного воздуха, поэтому регенераторы отсутствуют. Холодная ванна печи частично выполняет роль регенераторов, аккумулируя тепло газов, покидающих горячую часть печи с температурой ~1700 °С, и частично улавливает плавильную пыль, тем самым выполняет роль шлаковиков. Тем не менее количество пыли в продуктах сгорания, покидающих печь, составляет большую величину (20—40 г/м³). Пыль состоит на 85—90 % из оксидов железа.

Дымовые газы, покидающие рабочее пространство печи с температурой около 1500 °С, поступают по вертикальному каналу в шлаковик, в котором охлаждаются водой до температуры 900—1000 °С, а затем направляются в боров. В борове за счет подсоса холодного воздуха происходит дальнейшее понижение их температуры до 700 °С.

Распространение двухванных печей определилось их преимуществами в сравнении с мартеновскими печами: малым удельным расходом огнеупоров (4—5 кг в сравнении с 12—15 кг на мартеновских печах), меньшим объемом ремонтов, значительным облегчением условий труда ремонтных рабочих, в 3—5 раз меньшим расходом топлива, более высокой стойкостью, достигающей 800—1000 плавок. Производительность двухванных печей в 3—4 раза выше, чем мартеновских; их устанавливают на месте существующих мартеновских печей без реконструкции здания и изменения грузопотоков в цехе. В двухванных печах выплавляют стали широкого сортамента, в том числе низколегированные, не уступающие по качеству сталям, выплавляемым в мартеновских печах.

К недостаткам существующих конструкций двухванных печей следует отнести меньший выход годной стали, повышенный расход жидкого чугуна и выбивание большого количества технологических газов через завалочные окна в цех.

Выбивание газов из рабочего пространства происходит через завалочные окна при поднятых заслонках и по периметру закрытых заслонок, а также через стационарные желоба для заливки чугуна. Как показала практика, оптимальное с точки зрения тепловой работы существующих двухванных печей давление под сводом печи составляет 30—40 Па. При этом нулевая линия давления располагается на уровне порога печи или несколько выше его. При этих условиях, как показывают расчеты, через

одно открытое окно выбивается 6—8 тыс. м³ газа в час (запыленность 20—40 г/м³). В отдельные периоды плавки расчетное количество выбивающихся газов превышает 20 % всего количества газов, поступающих в дымоотводящий тракт.

На некоторых печах вследствие недостаточной пропускной способности дымоотводящего тракта давление под сводом при интенсивной продувке повышается до 50—60 Па, что приводит к еще большему увеличению количества газов, поступающих в цех.

Выбивание газов ухудшает условия труда, затрудняет обслуживание печи, загрязняет воздушный бассейн. Часть пыли не удаляется через фонарь здания, а циркулирует над рабочей площадкой печного пролета и попадает в разливочный пролет. Выбивание приводит также к ухудшению тепловой работы печи, так как часть оксида углерода и физического тепла дыма не используется для нагрева лома.

Радикальный способ устранения выбивания из печи — снижение давления под сводом с 30—40 до 20 Па. В этом случае нулевая линия давления располагается выше проема завалочного окна, и оно будет находиться в зоне разрежения. Выбивание дыма при этом полностью исключается. Вместе с тем, в печь подсасывается большое количество холодного воздуха. Источниками этого воздуха являются подсосы через вертикальный канал, через который не удаляются дымовые газы и на который действует тяга, создаваемая дымовой трубой. Кроме того, отрицательно сказывается эжектирующее действие воздушных завес, установленных на амбразурах для продувочных фурм и в задней стенке для термопары, а также подсосы через завалочные окна печи. Вследствие большого количества подсасываемого воздуха в продувочной камере дожигается с большим избытком воздуха практически весь выделяющийся из ванны оксид углерода.

Расчеты показывают, что подсос воздуха создает такую ситуацию, когда тепла сжигания оксида углерода недостаточно даже для нагрева дымовых газов до температуры, при которой они удаляются из продувочной камеры и, следовательно, возникает дефицит тепла на компенсацию потерь через кладку и охлаждаемые элементы печи, а также на догрев дымовых газов, который покрывается за счет тепла, выделяющегося внутри жидкого металла.

Для 280-т двухванной печи, начиная с расхода подсосанного воздуха в количестве 20 000 м³/ч, потребное для компенсации дефицита количества тепла возрастает с увеличением количества подсасываемого воздуха. При этом все меньшая часть тепла дожигания оксида углерода используется полезно для нагрева ванны и все большее количество тепла, выделяющегося внутри жидкой ванны, затрачивается на покрытие потерь тепла. Для решения вопроса о необходимой степени дожигания окиси углерода в продуваемой камере и оптимальном распределении тепла

оксида углерода между двумя камерами были выполнены совместные расчеты уравнений газового, материального и теплового балансов продувочной камеры и камеры нагрева, которые показали, что:

1) на двухванных сталеплавильных печах при существующих суммарных тепловых потерях на обе ванны и наличии более 28 % лома в шихте в продувочной камере существует дефицит тепла, эквивалентный 20—100 % теплового эффекта сжигания оксида углерода;

2) количество воздуха, фактически поступающее в продувочные камеры существующих печей, существенно превышает необходимое для сжигания расчетной доли оксида углерода, что еще больше усугубляет дефицит тепла;

3) при ограничении подсоса и рациональном нагреве скрапа в двухванной печи удельный расход чугуна может быть уменьшен с 780—750 до 680—700 кг/т годной стали (содержание лома в шихте 38—40 %).

Как уже указывалось, большим недостатком двухванных печей является выбивание газов через окна печи. Для устранения этого недостатка необходимо выполнение ряда мероприятий, из которых наиболее важны следующие: обеспечение на печи резерва по тяге и работа через газоочистку в течение всей кампании печи; создание конструкции дымоотводящего тракта, обеспечивающего минимальные неорганизованные подсосы; выполнение вертикальных каналов печи с охлаждаемыми поверхностями.

Для ограничения подсоса воздуха через вертикальный канал может быть предусмотрена установка водоохлаждаемых заслонок (см. рис. 38-5, 4), перекрывающих в закрытом положении более 90 % площади сечения вертикального канала. Гидравлические расчеты дымового тракта показали, что установка заслонок позволяет сократить количество воздуха, поступающего через вертикальный канал в продувочную камеру, примерно вдвое.

Подсос воздуха в продувочную камеру уменьшается также благодаря эжекции части воздуха ($\sim 10\ 000\ \text{м}^3/\text{ч}$) из вертикального канала с подачей его в камеру нагрева шихты мимо продувочной камеры. Воздух, имеющий температуру 700—500 °С, отсасывают через охлаждаемую амбразуру 5 в стенке вертикального канала, соединенную с амбразурой 7 в своде печи между камерами футерованным воздухопроводом. Эжектируемый воздух подается в камеру нагрева шихты со скоростью 100 м/с и используется для сжигания топлива или дожигания оксида углерода, поступающего из камеры продувки.

Для уменьшения эжектирующего действия струй воздуха в конструкции отдува предусмотрены сопла, подающие воздух, направленный против движения потока подсосываемого воздуха. Струи из этих отверстий создают завесу на входе в амбразуру,

тем самым сокращая присос воздуха без уменьшения эффективности отдува.

При уменьшении количества подсасываемого в продувочную камеру воздуха уменьшается общее количество дыма, поступающего в камеру нагрева. Это позволяет оборудовать печь пережимом между ваннами с установкой с каждой стороны эжекторов. При этом возможно обеспечение независимого регулирования давления под сводом печи в каждой камере, что имеет большое значение для улучшения тепловой работы печи и обеспечивает хорошие условия для полного дожигания горючих составляющих дыма, поступающих в камеру нагрева.

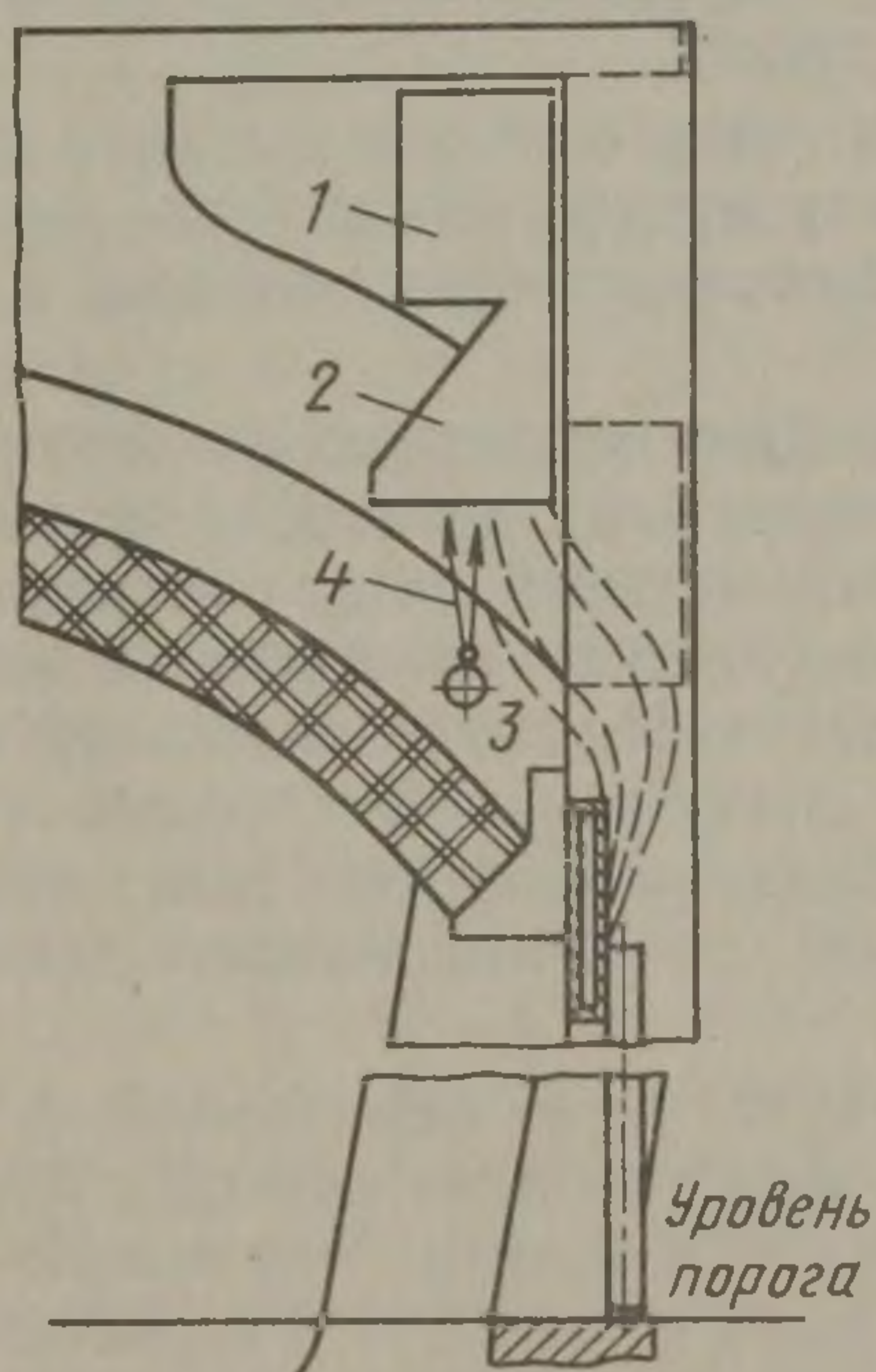


Рис. 38-б. Устройство для отсоса дымовых газов, выбивающихся из рабочего пространства печи:

1 — коллектор; 2 — зонт; 3 — коллектор сжатого воздуха; 4 — воздушная струя

Большие трудности вызывает уплотнение проема завалочных окон при открытой заслонке. Если окно находится под разрежением, то через него засасывается 30 000—40 000 м³ воздуха в час. Для обеспечения возможности работы печи при повышенном давлении под сводом предусмотрены устройства, отсасывающие выбивающийся дым (рис. 38-б) со сбросом его в борова или в резервную газоочистку. Наличие резервной газоочистки приводит к удорожанию строительства печи.

Таким образом, двухванная печь имеет много эксплуатационных и сантехнических недостатков. В связи с этим и несмотря на то, что двухванные печи имеют значительную производительность, их следует рассматривать как временную, промежуточную конструкцию, соответствующую сложному (в техническом и экономическом отношении) периоду полного перехода нашей металлургии с мартеновского на конвертерный способ производства стали.

ПЕЧИ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ С ПОЛНЫМ ИЛИ ЧАСТИЧНЫМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХИМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Раздел XI

Глава 39

ПЕЧИ ДЛЯ ОБЖИГА СУЛЬФИДНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

1. Общая характеристика и принцип работы

Печи кипящего слоя являются основными агрегатами для высокотемпературного обжига (окисления) полидисперсных сульфидных концентратов, используемых в качестве сырья при производстве цинка, меди, никеля, молибдена и ряда других металлов. Их название связано с особым аэродинамическим состоянием зоны технологического процесса, при котором перерабатываемый материал и газообразный окислитель образуют псевдогомогенную (внешне однородную) систему, ведущую себя подобно кипящей жидкости. Процесс образования кипящего слоя происходит в период пуска печи.

Схема этого процесса выглядит следующим образом. В вертикально расположенную реакционную камеру печи, имеющую цилиндрическую, овальную или, что встречается крайне редко, прямоугольную форму, ограниченную снизу перфорированной подиной, в отверстиях которой установлены специальные газораспределительные устройства (сопла), загружается сыпучий материал, представляющий собой окисленную шихту (огарок). Далее происходит разогрев футеровки печи за счет сжигания в ее рабочем пространстве природного газа или других видов традиционного топлива, подаваемого в печь через специальные пусковые горелки, установленные в корпусе реакционной камеры. При достижении на поверхности футеровки рабочих температур осуществляемого в печи технологического процесса (550—1000 °С) через подину в слой снизу вверх подается газообразный окислитель (дутье).

Сначала скорости газа невелики и он фильтруется через неподвижный зернистый слой так же, как через твердое пористое тело. При постепенном увеличении расхода газа между частицами материала появляются газовые прослойки, объем зернистого слоя растет, и наступает момент, когда вес слоя уравнивается силой гидравлического давления восходящего газового потока. В условиях гидродинамического равновесия частицы слоя получают возможность взаимного пульсационного перемещения, слой становится «текучим» и ведет себя подобно жидкости. Увеличение расхода газа прекращается в момент появления в слое небольших

газовых пузырей, повышающих интенсивность перемешивания частиц. После этого в слой начинают подавать, постепенно увеличивая расход, перерабатываемую шихту.

Сульфидные соединения, содержащиеся в шихтовых материалах, вступают в активное химическое взаимодействие с кислородом дутья, которое сопровождается взаимным изменением обеих фаз. Шихтовые материалы полностью (цинковый и молибденитовый концентраты) или частично (медные концентраты) окисляются и содержащаяся в них сера переходит в газовую фазу в виде сернистого ангидрида. Окисление сопровождается выделением значительных количеств тепловой энергии и поэтому по мере увеличения расхода шихты пусковые горелки постепенно отключаются и при выходе на рабочий режим технологический процесс протекает в автогенном режиме за счет тепла экзотермических реакций. Одновременно с загрузкой шихты окисленный в процессе протекания химических реакций материал непрерывно выводится из печи и направляется на дальнейшую переработку с целью получения из него соответствующего металла. Покидающие печь технологические газы, содержащие большое количество сернистого ангидрида, после очистки их от пыли используют для производства серной кислоты.

Таким образом, обжиговые печи кипящего слоя представляют собой агрегаты непрерывного действия с постоянными во времени параметрами аэродинамического, теплового и температурного режимов технологического процесса. По своим энергетическим признакам они относятся к печам теплогенераторам с массообменным режимом тепловой работы, так как образующиеся в них продукты получают тепло непосредственно в процессе его генерации при протекании экзотермических реакций. Тепловой и температурные режимы работы печи определяются требованиями технологического процесса и выбираются с таким расчетом, чтобы исключить возможность образования в печи жидкой фазы.

2. Аэродинамический режим работы печей

Зона технологического процесса в обжиговых печах представляет собой слой окисленного материала, в который одновременно подается сульфидный концентрат и необходимый для его окисления воздух или дутье, обогащенное кислородом. Восходящий поток газа и твердые частицы непрерывно обмениваются энергией. Она расходуется на поддержание слоя в псевдооживленном состоянии и ее затраты могут быть рассчитаны из условий равенства сил гидродинамического давления и веса материала, препятствующего его оживлению. Из равенства этих сил следует, что

$$\Delta p = g (\rho_T - \rho_r) (1 - e) H_{сл}, \quad (39-1)$$

где Δp — перепад давления по высоте слоя в направлении движения газа, Па; ρ_T, ρ_r — соответственно плотности твердого мате-

риала и газов, кг/м^3 ; ϵ — относительный объем пор (пустот) или порозность слоя, $\epsilon = V_{\text{пор}}/(V_{\text{пор}} + V_{\text{т}}) = V_{\text{пор}}/V_{\text{сл}}$, для неподвижного материала принимается, что $\epsilon = \epsilon_0 = 0,4$; $V_{\text{т}}$ — объем, занимаемый твердым материалом в слое, м^3 ; $V_{\text{пор}}$, $V_{\text{сл}}$ — соответственно объем пор и общий объем слоя, м^3 ; $H_{\text{сл}}$ — высота слоя, м.

Средняя скорость газа, при которой устанавливается равенство указанных сил и слой сыпучего материала переходит в псевдоожигенное состояние, называется первой критической скоростью или скоростью начала псевдоожигения (ω_0'). Ее величина определяется опытным путем. Для монодисперсного материала результаты многочисленных экспериментов могут быть выражены в виде формулы

$$\text{Re}_0' = \text{Ar}/(1400 + 5,22 \sqrt{\text{Ar}}). \quad (39-2)$$

При переработке полидисперсного материала в псевдоожигенное состояние сначала переходят мелкие, а затем, более крупные частицы. Ориентировочная оценка средней скорости начала псевдоожигения в этом случае также может быть произведена по формуле (39-2), если в качестве характерного размера частиц в критериях Рейнольдса и Архимеда использовать их эквивалентный средний диаметр d_a , полученный на основе анализа данных о гранулометрическом составе шихты.

При обработке экспериментальных данных, полученных в условиях псевдоожигенного состояния системы, вместо числа Рейнольдса в качестве безразмерной скорости газового потока удобнее использовать число псевдоожигения W , представляющее собой отношение средней скорости газа $\omega_{\text{ср}}$ к скорости начала псевдоожигения ($W = \omega_{\text{ср}}/\omega_0'$). Как показали результаты исследований, при скоростях газа близких к скорости начала псевдоожигения ($W \approx 1$) интенсивность движения твердых частиц в слое невелика. С увеличением псевдоожигения ($W \approx 1,3 \div 2$) в слое начинают появляться небольшие газовые пузыри, способствующие энергичному перемешиванию частиц, и свободная поверхность слоя напоминает в этом случае поверхность кипящей жидкости. Спокойное состояние системы продолжается до значений $W \approx 5$. При дальнейшем увеличении скорости газа процесс спокойного псевдоожигения нарушается, появляются крупные газовые пузыри, свободная поверхность слоя теряет резкие очертания и над ней возникают крупные всплески материала. Если рост скорости продолжается, то сначала часть, а затем и весь материал постепенно переходят во взвешенное (псевдогазовое) состояние и выносятся вместе с газом из слоя.

Скорость газа, при которой твердые частицы начинают покидать псевдоожигенный слой, называется скоростью витания частиц ω_v . Ее значение может быть строго определено только для монодисперсного материала. При переработке полидисперсного сырья частицы разных размеров имеют различные скорости витания. Вынос мелких частиц (пыли) в таких системах начи-

нается значительно раньше, чем скорость газа достигает величины, соответствующей скорости витания частиц средней крупности. Практически пылевынос в печах кипящего слоя достигает 30—40 % от массы загружаемого материала и начинается при скоростях газа, равных скорости витания самых мелких частиц слоя.

Под скоростью витания частицы обычно принимается скорость, с которой она равномерно движется в неограниченном объеме газа. Это состояние характеризуется равенством действующих на нее сил гидродинамического давления и тяжести. Условия равенства этих сил для частиц круглой формы записываются в виде:

$$\frac{\pi d^3}{6} g (\rho_T - \rho_r) = C_d \frac{\pi d^2}{4} \frac{\omega_B^2}{2} \rho_r, \quad (39-3)$$

где d — диаметр частиц; C_d — коэффициент лобового сопротивления, зависящий от режима движения газа, т. е. от величины критерия Re .

При ламинарном режиме обтекания частиц потоком газа ($Re < 2$) $C_d = 24/Re_B$. При турбулентном режиме ($Re_B > 500$) коэффициент лобового сопротивления не зависит от критерия Рейнольдса и равен 0,44.

Подставляя значения C_d в (39-3) можно получить расчетную формулу для определения скорости витания частиц, которая после критериальной обработки получит вид

$$Re_B = Ar / (18 + 0,61 \sqrt{Ar}). \quad (39-4)$$

Достаточно сопоставить выражения (39-2) и (39-4), чтобы оценить пределы существования системы в состоянии псевдооживления, которые определяются максимальным значением числа псевдооживления

$$W_{\max} = (1400 + 5,22 \sqrt{Ar}) / (18 + 0,61 \sqrt{Ar}). \quad (39-5)$$

В области ламинарного режима (для мелких частиц) величина Ar мала и зависимость (39-5) асимптотически приближается к значению $W_{\max} \rightarrow 1400/18 \approx 78$. В области турбулентного режима слагаемые в уравнении (39-5), содержащие Ar , значительно превышают первые члены сумм в числителе и знаменателе и $W_{\max} \rightarrow 5,22/0,61 \approx 9$.

Данные, которые можно получить расчетным путем, используя формулы (39-2)—(39-5), носят грубо ориентировочный (оценочный) характер, так как в условиях реального агрегата аэродинамические процессы в значительной степени зависят от целого ряда неподдающихся пока учету факторов. К ним относятся, например, взаимное воздействие друг на друга мелких и крупных частиц, в результате которого в слое всегда содержится некоторое количество мелочи, а в пыли присутствуют крупные частицы. Практика работы обжиговых печей показала, что во избежание значительного пылевыноса при переработке концентратов, состоящих из

относительно мелких частиц, следует применять сравнительно узкие фракции. С увеличением абсолютного размера частиц устойчивость процесса возрастает и появляется возможность использования шихтовых материалов более широкого гранулометрического состава.

Существенное влияние на интенсивность пылевыноса оказывает также конструкция газораспределительных устройств. При большой неравномерности газораспределения следует ожидать повышенный унос пыли. Этот эффект может быть несколько сглажен за счет увеличения высоты слоя. Снижению выноса пыли способствует также увеличение площади сечения реакционной камеры над уровнем слоя, которое приводит к снижению скорости потока газа над слоем и выпаданию из него (сепарации) твердого материала.

Пылевынос в настоящее время является основным фактором, ограничивающим производительность печей кипящего слоя. При определении производительности печи по формуле (39-2) рассчитывают скорость начала псевдооживления перерабатываемой шихты, на основании опытных данных выбирают значение числа псевдооживления, соответствующее спокойному (устойчивому) состоянию кипящего слоя ($W = 1,3 \div 3,0$). Используя эти величины, производительность печи (т/ч) рассчитывают по формуле

$$A = 3600 \frac{W \omega'_0 F_{\Pi}}{V_{\text{уд}}}, \quad (39-6)$$

где F_{Π} — площадь пода печи, м^2 ; $V_{\text{уд}}$ — количество дутья, необходимого для окисления 1 т шихты в условиях заданного температурного режима, $\text{м}^3/\text{т}$.

Из формулы (39-6) следует, что одним из основных способов интенсификации процесса обжига является снижение удельного объема дутья за счет обогащения его кислородом.

При выборе размеров печи и компоновке ее элементов обычно исходят из необходимости обеспечить минимальное время пребывания перерабатываемого концентрата в рабочем пространстве печи (t_{min}), которое требуется для завершения предусмотренных технологией химических реакций. Для расчета этой величины можно воспользоваться формулой

$$t_{\text{min}} = (4 \div 5) d_{\text{э}} / \omega_{\text{ок}}. \quad (39-7)$$

Коэффициент $(4 \div 5)$ в формуле вводится для того, чтобы учесть возможную в производственных условиях неравномерность окисления сульфидов, вызванную укрупнением частиц концентрата в результате его слеживания и образования окатышей. Значение средней скорости окисления сульфидов $\omega_{\text{ок}}$, $\text{м}/\text{с}$, выбирают по экспериментальным данным. Например, для цинкового концентрата она равна $(1,1 \div 2,0) \cdot 10^{-6}$, для медного $(1,4 \div 3,0) \times 10^{-6}$, $\text{м}/\text{с}$.

При выборе основных размеров рабочего пространства печи, расположенного над слоем, обычно исходят из условий равенства времени окисления частицы и времени пребывания ее в сепарационной зоне, которое записывается в виде

$$t_{\text{min}} = (H_0 F_0) / (W \omega_0 F_{\text{с}}), \quad (39-8)$$

где F_0 , H_0 — соответственно площадь и высота сепарационной камеры.

При непрерывной работе печи время пребывания материала в слое является одной из основных характеристик ее работы, от которой зависит такой важный показатель технологического процесса как выход годного. Среднее значение времени пребывания материала в слое может быть рассчитано по формуле

$$t_0 = G_T / A, \quad (39-9)$$

где G_T — количество материала, одновременно находящегося в слое.

Однако, для завершения технологического процесса необходимо, чтобы каждая частица загруженного в печь концентрата находилась в слое ровно столько времени, сколько требуется для ее окисления. В печи кипящего слоя из-за высокой интенсивности перемешивания материала выполнить это требование довольно сложно, так как все частицы слоя (в том числе только что введенные в него) имеют практически одинаковую вероятность покинуть его с выводимым из печи огарком. В результате часть поступающего в печь концентрата будет находиться в слое малое время, тогда как остальной материал может оставаться в печи в течение длительного времени, значительно превышающего среднее время его пребывания в слое.

В качестве примера может быть рассмотрен слой с идеальным смешением, в котором происходит мгновенное перемешивание вновь поступившего концентрата с основным материалом слоя. Для такой системы вероятность пребывания частиц в слое в течение времени t определяется из следующего уравнения:

$$x = 1 - e^{-t/t_0}, \quad (39-10)$$

где x — весовая доля загружаемых в печь частиц, которые покидают слой к моменту времени t (вероятность того, что частица будет находиться в слое менее времени t_0).

Анализ уравнения (39-10) показал, что частицы материала, одновременно загружаемые в псевдооживленный слой с идеальным смешением, покидают его через различные промежутки времени. Так, примерно 22 % загружаемых в слой частиц находится в нем менее четверти среднего времени пребывания t_0 , 40 % — менее половины t_0 , 22 % частиц задерживается в слое в полтора раза дольше t_0 , а 14 % — в два раза дольше. Таким образом, чем дальше псевдооживленный слой реальной печи отстоит от системы с идеальным перемешиванием, тем более равномерно происходит

в нем переработка концентрата. В реальной печи между моментом подачи концентрата в зону технологического процесса и появлением продуктов его окисления на выходе из агрегата происходит некоторое время t' . В этом случае справедливо выражение

$$x = 1 - e^{-(t-t')/(t_0-t')}. \quad (39-11)$$

Из анализа формулы (39-11) следует, что по мере увеличения t' и приближения к t_0 повышается равномерность во времени пребывания отдельных частиц в слое. На практике это может быть достигнуто за счет размещения устройств ввода и вывода материала из печи на разных концах слоя; увеличения отношения высоты слоя к его диаметру; ввода концентрата непосредственно в слой, а не на его поверхность; размещения в слое различных вставок (например, трубчатых теплообменников, перегородок и т. п.), затрудняющих перемещение материала от точки ввода в печь к точке вывода из нее.

3. Тепловой и температурный режимы процесса

Сульфидные минералы, входящие в состав моно- и полиметаллических флотационных концентратов, окисляясь в рабочем пространстве печей кипящего слоя, выполняют одновременно функции сырья и технологического топлива, теплота сгорания которого в зависимости от вида минерала колеблется в пределах от 1700 до 5700 кДж/кг. Калориметрическая температура продуктов их окисления, как показали расчеты теплового баланса процесса и практика работы печей, существенно превышает температуру плавления сульфидов. Действительная температура обжига зависит от интенсивности процессов переноса тепла, выделившегося при окислении загружаемого в печь материала.

Теплообменные процессы, протекающие в печи кипящего слоя, чрезвычайно сложны. Между частицами, газовой фазой и футеровкой печи передача тепла осуществляется в основном за счет конвекции и излучения. Помимо этого передача тепла осуществляется за счет теплопроводности при соприкосновении частиц друг с другом и с поверхностью футеровки, а также вследствие перемещения (вывода из печи) окисленных частиц и технологических газов.

Существующие методы математического описания процессов теплообмена в псевдооживленном слое базируются в основном на обобщении и анализе обширного экспериментального материала, накопленного в этой области. Специфические условия, в которых находится псевдооживленный слой в обжиговых печах, представляющих собой печи-теплогенераторы, позволяют существенно упростить описание протекающих в нем теплообменных процессов. Например, перепадом температур внутри твердой частицы, на поверхности которой при ее окислении происходит выделение тепла, можно пренебречь, так как, имея небольшие

размеры (порядка 0,2 мм), она представляет собой тонкое в тепловом отношении тело с критерием Био, не превышающим 10^{-2} .

Известно также, что перенос тепла между твердыми частицами и оживающим агентом отличается очень большой интенсивностью из-за огромной поверхности теплообмена, измеряемой тысячами квадратных метров на кубический метр слоя. Следствием этого является быстрое выравнивание температур между газом и твердыми частицами. Градиенты температур по высоте слоя наблюдаются только на небольшом участке в несколько сантиметров, расположенном вблизи газораспределительных устройств. Эта область носит название участка тепловой стабилизации. В остальном объеме слоя температура практически одинакова и неизменна во времени.

Таким образом при организации теплового режима печи задача заключается в том, чтобы на протяжении всего процесса обжига поддерживать в слое постоянную температуру, величина которой определяется экспериментальным путем и должна соответствовать его аэродинамическим и технологическим параметрам. Температура слоя и состав дутья оказывают большое влияние на химический и гранулометрический состав продуктов обжига. При ее выборе необходимо учитывать, что она не может быть ниже температуры воспламенения сульфидов, но и не должна превышать значений, при которых происходит слипание и тем более плавление сульфидных частиц, так как это может привести к образованию комков, зарастанию подины и другим нежелательным явлениям, способствующим нарушению аэродинамического режима обжига.

Анализ тепловых балансов применяемых в промышленности печей кипящего слоя показал, что в большинстве случаев для поддержания в слое заданной по технологическим данным температуры требуется с помощью специальных трубчатых кессонов, охлаждаемых водой, отводить из печи от 15 до 25 % тепла, выделившегося в результате протекания реакций окисления сульфидов. Довольно часто с целью повышения производительности печи, улучшения ее аэродинамических характеристик и создания более благоприятных условий для протекания технологических процессов требуется обогащение дутья кислородом. В этом случае для сохранения неизменной температуры слоя необходимо увеличить отвод тепла из рабочего пространства печи за счет повышения поверхности элементов охлаждения.

Условие постоянства заданной температуры процесса распространяется и на реакционное пространство, расположенное над слоем, так как в нем протекают процессы окисления выносимой из печи пыли. Поэтому наряду с использованием кессонов в современных печах предусматривается тщательная тепловая изоляция стен печи, расположенных над слоем псевдооживленного материала.

4. Конструкция печей

Печи кипящего слоя различаются в зависимости от вида и характера перерабатываемых в них материалов, площади пода, высоты слоя и удельной производительности. При всем разнообразии печей кипящего слоя, их конструкции имеют много общего и могут быть рассмотрены на примере наиболее распространенных в цветной металлургии печей для обжига цинковых концентратов. Общий вид такой печи представлен на рис. 39-1. Она состоит из следующих элементов: реакционной камеры, подины с установленными в ней газораспределительными соплами, устройства для подачи дутья, камер загрузки и выгрузки материала, а также системы удаления и очистки технологических газов.

Заклученная в металлический кожух реакционная камера представляет собой выложенную из шамотного кирпича шахту цилиндрической (или овальной) формы, для теплоизоляции которой обычно используют листовой асбест. Ее диаметр и высота определяются аэродинамическими параметрами слоя и в зависимости от производительности печи и гранулометрического состава концентрата колеблются в широких пределах, соответственно от 6 до 10 м и от 9 до 17 м. В рабочем пространстве реакционной камеры можно выделить две области: слой и надслоевое сепарационное пространство, от объема которого зависит один из важнейших показателей процесса — пылевынос, определяемый в процентах от массы загружаемого в печь материала. В некоторых случаях, при переработке концентратов, содержащих большое количество мелких фракций, для снижения пылевыноса прибегают к значительному увеличению объема сепарационного пространства, применяя шахты переменного, расширяющегося кверху сечения.

Самым ответственным элементом печи является подина, так как она подвергается наибольшему износу и от ее конструкции во многом зависят аэродинамические характеристики слоя. В большинстве печей подина выполнена в виде перфорированной плиты из жаропрочного бетона толщиной 200—300 мм. В отверстиях плиты установлены специальные газораспределительные сопла, конструкция которых обеспечивает равномерную подачу дутья и исключает попадание твердого материала в газоподводящие каналы. Наибольшее распространение получили сопла со съемными грибообразными литыми головками из жаропрочной стали, газоподводящие каналы в которых расположены горизонтально или имеют наклон в сторону подины. Скорость воздуха на выходе из сопла подбирается экспериментальным путем и равна 10—12 м/с. Общее число сопел достигает значительной величины (до 2000) и устанавливается с таким расчетом, чтобы площадь сечения газоподводящих каналов составляла около 1 % от площади пода.

Сжатый воздух или дутье, обогащенное кислородом, подводится к нижней поверхности подины через специальную камеру, имеющую конусообразную форму (диффузор). Камера для подвода

газа может быть общей для всей подины или разделена на 2—5 секций с целью более равномерного распределения дутья. Загрузочное устройство имеет индивидуальную систему газоподвода.

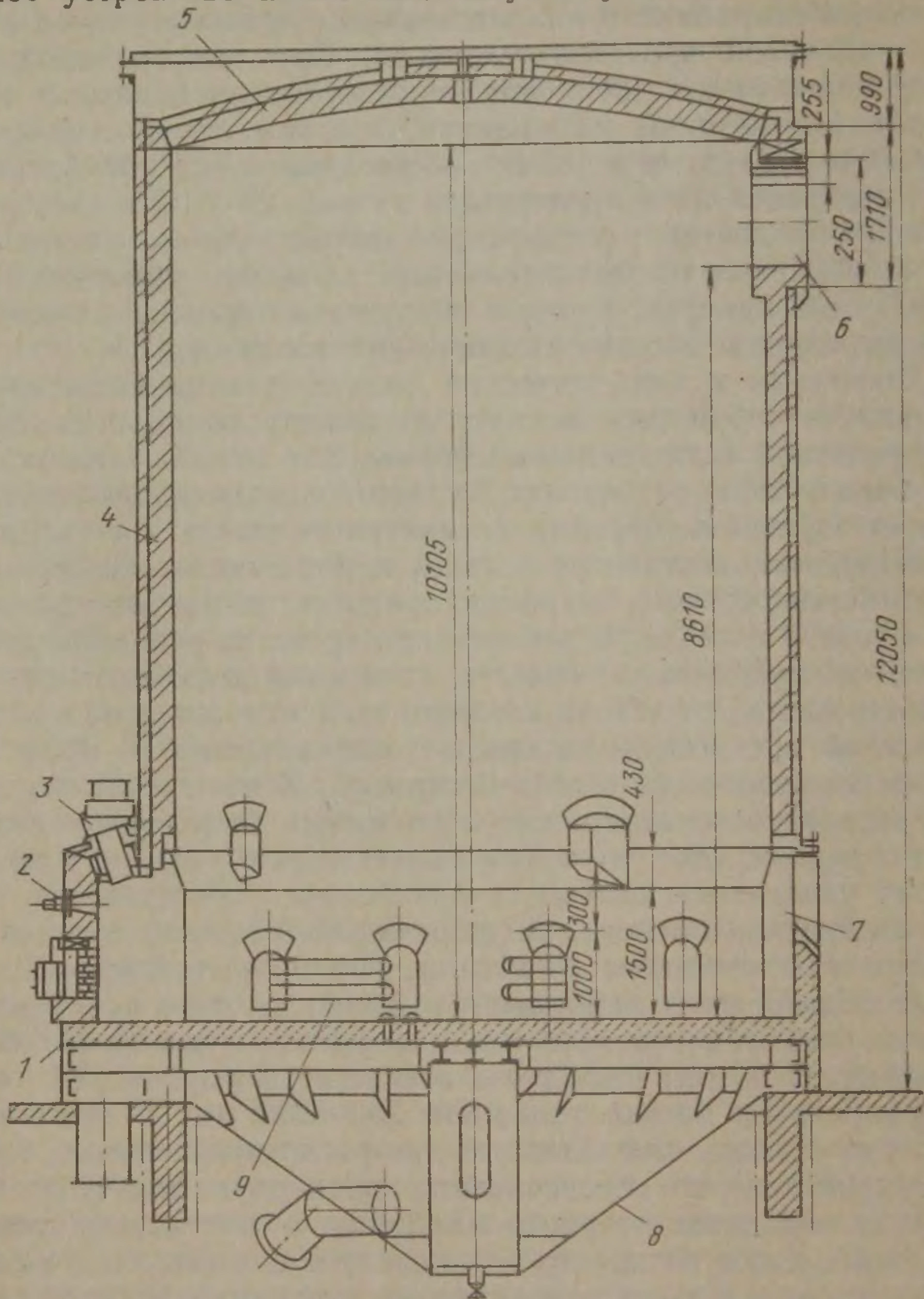


Рис. 39-1. Общий вид печи кипящего слоя для обжига цинковых концентратов:
 1 — подина; 2 — горелка (форсунка) для разогрева печи перед пуском; 3 —
 загрузочное устройство; 4 — корпус; 5 — свод; 6 — отверстие для отвода
 газов; 7 — разгрузочное устройство (сливной порог); 8 — воздушная камера;
 9 — трубчатый кессон

Камеры загрузки и выгрузки материалов располагают на противоположных максимально удаленных друг от друга участках слоя. Загрузочная камера, футеруемая шамотным кирпичом, имеет арочный свод и непосредственно примыкает к стенке печи. Загрузка концентрата производится сверху через специальный

патрубок. В последнее время разрабатываются устройства для подачи материала ниже уровня кипящего слоя. Выгрузка окисленного материала осуществляется через сливной порог. Камера выгрузки делается съемной и представляет собой металлическую коробку, футерованную шамотным кирпичом. Она расположена сразу за сливным порогом и вплотную примыкает к стенке печи. Свод печи имеет куполообразную форму, выкладывается из шамотного кирпича и изолируется асбестом. Сверху свод покрывается металлическим листом.

Для регулирования температуры слоя применяют водоохлаждаемые кессоны типа «труба в трубе». Внешнюю трубу изготовляют из жаропрочной стали, ее диаметр равен 220 мм, длина 2—3 м. Кессоны вводятся через специальные отверстия в стенке печи непосредственно в слой кипящего материала под углом 20° к горизонтальной плоскости. Площадь поверхности кессонов составляет 15—20 % от площади пода.

Технологические газы, содержащие большое количество обожженной пыли, отводятся в газоход через отверстие в стенке печи, расположенное на уровне свода. Далее газы, пройдя через котел-утилизатор, циклоны и систему сухих электрофильтров, направляются в сборный коллектор сернокислотного производства.

Обжиг цинковых концентратов в печах кипящего слоя осуществляется следующим образом. Шихта из сборного бункера с помощью соответствующего питателя подается в камеру загрузки и попадает на поверхность кипящего слоя, который создается потоком газа, подаваемого в распределительную камеру под давлением 15—16 кПа. В слое под действием высоких температур и кислорода дутья концентрат окисляется с выделением значительных количеств тепловой энергии. Полученное таким образом тепло расходуется в основном (80 %) на нагрев продуктов обжига до температуры слоя, составляющей $930\text{—}1000^\circ\text{C}$. Избыточная энергия идет на нагрев воды в кессонах и потери тепла через ограждение печи. Огарок выводится из печи через сливной порог, с помощью которого высота слоя над подиной поддерживается на уровне 1,0—1,3 м. Технологические газы, проходящие через слой со средней скоростью порядка 0,1—0,14 м/с, выносят из печи до 30—40 % загружаемого в нее материала. Удельная производительность печи составляет примерно $5\text{—}8\text{ т}/(\text{м}^2\cdot\text{сут})$.

Глава 40

КОНВЕРТЕРЫ ЗАВОДОВ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

1. Общие характеристики и принцип работы

В металлургии процесс переработки расплавленных материалов с целью изменения их химического состава называется конвертированием, а технологический агрегат, применяемый для его реализации, — конвертером. В цветной металлургии конвертирова-

нию в основном подвергаются моно- и полиметаллические штейны, представляющие собой сложные соединения, в которые помимо так называемых энергообразующих компонентов (железа и серы) входят один или несколько тяжелых цветных металлов (медь, никель, кобальт, свинец, цинк), небольшое количество благородных металлов и шлакообразующие примеси типа магнетита.

Сущность технологического процесса, осуществляемого в конвертере, заключается в том, что содержащиеся в штейне железо и сера полностью или частично окисляются кислородом воздуха либо, что значительно реже, с помощью дутья, обогащенного кислородом. Окисленное железо переводится в шлак, для чего в конвертер загружаются специальные флюсы, содержащие диоксид кремния. Сера в виде сернистого ангидрида выводится из процесса вместе с технологическими газами. Остальные компоненты штейна переводятся в металлическое состояние или соответственно в обогащенные металлом соединения типа никелевого (медноникелевого) фанштейна. Так как конвертерные шлаки содержат сравнительно большое количество цветных металлов, они наряду с остальными продуктами конвертирования направляются на дальнейшую переработку.

Реакции окисления железа и серы экзотермичны и идут с большим выделением тепла, которое расходуется на нагрев окислителя и других реагентов, поступающих в зону технологического процесса. Интенсивность процессов тепловыделения определяется в основном скоростью подвода в зону реакции газообразного окислителя и поэтому конвертеры относятся к классу печей теплогенераторов с массообменным режимом работы. Их освоение относится к 1866—1880 гг. Первые агрегаты имели вертикальное расположение реакционной камеры. Впоследствии они были вытеснены наиболее производительными горизонтальными конвертерами (рис. 40-1).

Рабочее пространство конвертера ограничено стенками реакционной камеры, имеющей форму цилиндра с отверстием в верхней части (горловиной), предназначенным для загрузки перерабатываемых материалов, выгрузки продуктов конвертирования и удаления технологических газов в период продувки. Дутье в конвертер подается через стальные трубки (фурмы), число которых достигает 46—52 шт. Их устанавливают в ряд с одной из сторон конвертера параллельно его оси.

Технологический процесс в конвертере протекает следующим образом. В начале работы наклонный конвертер заполняется штейном, после чего он устанавливается в рабочее положение и содержащийся в нем расплав в присутствии кварцевого флюса продувается воздухом. При общей глубине ванны расплава 1—1,5 м дутье подается на расстоянии 0,5—0,7 м от ее поверхности с начальной скоростью газового потока от 100—170 до 200—250 м/с. Струя газа проникает в расплав на участке, составляющем примерно одну треть ширины ванны, где происходит интенсивное

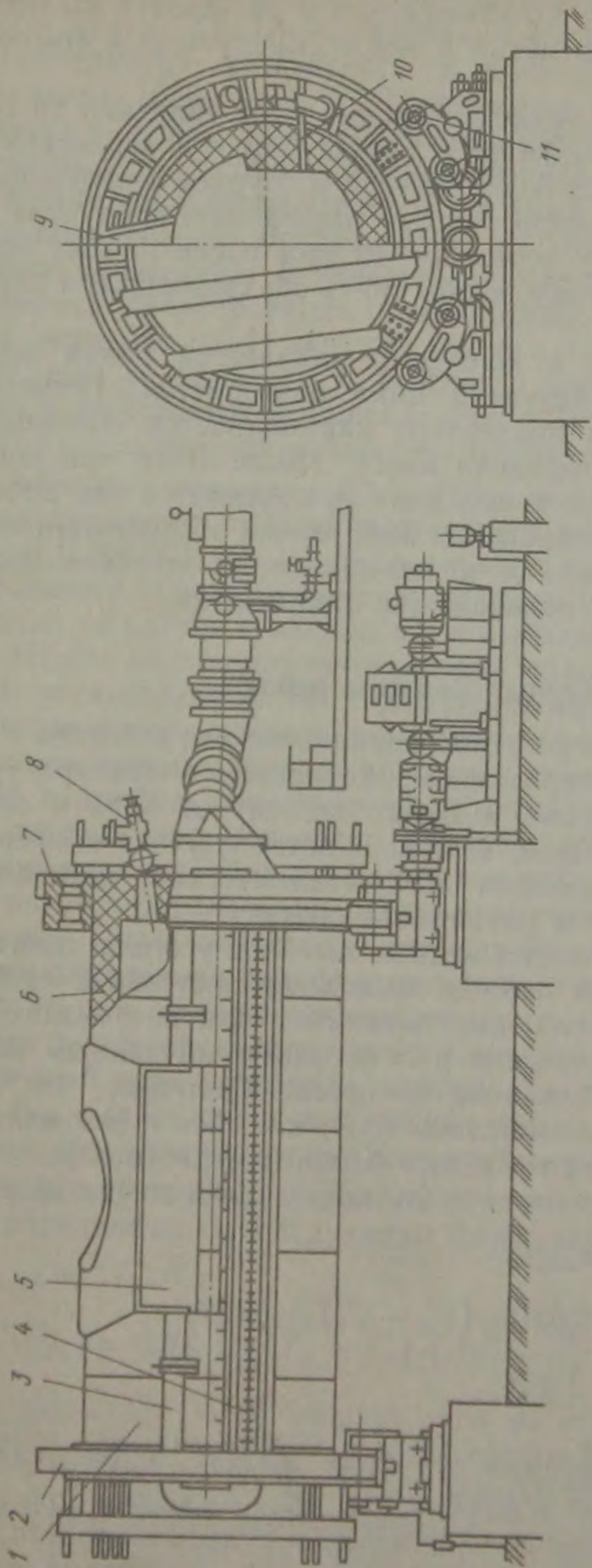


Рис. 40-1. Горизонтальный конвертер:

1 — корпус конвертера; 2 — баидаж; 3 — коллатор; 4 — фурменный пояс (фурмы); 5 — защитный кожух (фартук); 6 — футеровка; 7 — венцовая шестерня; 8 — горелка; 9 — горловка; 10 — фурменная трубка; 11 — опорный ролик

перемешивание жидкой и газовой фаз, физические характеристики и состав которых постоянно изменяются в результате взаимодействия между кислородом дутья и энергообразующими компонентами штейна.

(На выходе из ванны технологические газы увлекают за собой часть расплава, поднимающуюся в виде брызг и всплесков над зеркалом ванны на высоту более 0,5—1,0 м. Бурное перемешивание расплава препятствует эффективному разделению продуктов конвертирования и поэтому через 30—40 мин после начала приходится прекращать продувку, чтобы слить образовавшийся конвертерный шлак.)

(После слива шлака в конвертер заливается новая порция штейна, загружаются флюсы и цикл повторяется.) Постепенно после ряда продувок в конвертере накапливается обогащенная основным металлом сульфидная масса. После этого при конвертировании медного штейна продувка продолжается без добавления флюсов до полного окисления всей серы и образования черной меди. Для никелевых и медно-никелевых штейнов процесс завершается на стадии образования фاینштейна.

2. Тепловой и температурный режимы работы

Конвертеры являются агрегатами периодического действия с переменными во времени параметрами теплового и температурного режимов работы, значения которых зависят от вида и состава перерабатываемых штейнов. В большинстве случаев конвертированию подвергаются медные, полиметаллические, никелевые и медно-никелевые штейны различного состава.

Процесс конвертирования медных штейнов условно делится на два периода. В первый период происходит окисление сульфида железа. Количество тепла, выделившегося при протекании экзотермических реакций, обычно рассчитывают по данным материального и теплового балансов процесса. Учитывая, что состав штейна определяется количеством содержащейся в нем меди, для приближенных расчетов теплового баланса первого периода конвертирования могут быть использованы следующие формулы:

$$Q_{\text{FeS}} = 4001,5 - 4,9\text{Cu}; \quad (40-1)$$

$$10^2 Q_{\text{FeS}}^r = (53,40 - 0,67\text{Cu}) (T_o - T_n^c) + (40,71 - 0,51\text{Cu}) \frac{100}{\text{O}_2} (T_o - T_n^d), \quad (40-2)$$

где Q_{FeS} — теплота сгорания сульфида железа, кДж/кг штейна; Cu — содержание меди в штейне, %; Q_{FeS}^r — количество тепла, пошедшее на нагрев продуктов окисления сульфида железа, включая содержащиеся азот технологические газы, до средних температур зоны технологического процесса, кДж/кг штейна; T_o — сред-

ная температура в зоне технологического процесса, К; T_n^c , T_n^d — соответственно начальные температуры штейна (сульфидов железа) и дутья, К; O_2 — содержание кислорода в дутье, %.

Температура заливаемого в конвертер штейна колеблется в пределах 1050—1100 °С. Температура в зоне технологического процесса в период конвертирования, как правило, поддерживается в зависимости от состава штейна на уровне 1250—1320 °С.

Оценка параметров теплового режима первого периода конвертирования обычно производится на основе анализа теплового баланса конвертера. В качестве примера может быть рассмотрен процесс конвертирования стандартного штейна, содержащего 30 % меди. Из (40-1) следует, что при его окислении на каждый килограмм заливаемого в конвертер штейна в течение первого периода выделяется примерно 2500 кДж тепловой энергии. Это тепло распределяется в зоне технологического процесса следующим образом: примерно 50 % ($Q_{FeS}^r \approx 1250$ кДж/кг) пойдет на нагрев продуктов окисления сульфида железа до заданной температуры (1300 °С); 10—11 % составляют потери тепла через стенки и горловину конвертера в окружающую среду и около 20 % расходуется на нагрев сульфида меди и шлакообразующих компонентов. Чтобы не допустить перегрева продуктов конвертирования сверх установленной по технологическим данным температуры необходимо использовать оставшееся тепло (20 %) на нагрев и плавление так называемых холодных присадок (корки застывшего шлака и штейна, оборотные материалы, пыль и т. п.).

В этот период конвертер работает короткими (примерно часовыми) циклами. При таком режиме работы скорость повышения температуры расплава во время продувки составляет около 1—3 °С/мин. После окисления сульфидного железа в конвертере остается расплавленная сульфидная масса, содержащая 78—80 % Cu.

Во втором периоде конвертирования, которое осуществляется за один цикл, происходит окисление серы с целью получения из сульфидной меди чернового металла. Теплота сгорания сульфида меди $Q_{Cu,S}$ (кДж/кг) и количество тепла, полученное в процессе теплогенерации продуктами окисления сульфида, включая технологические газы $Q_{Cu,S}^r$ (кДж/кг) в расчете на 1 кг штейна могут быть определены по следующим формулам:

$$Q_{Cu,S} = 17,1 \text{ Cu}; \quad (40-3)$$

$$10^2 Q_{Cu,S}^r = 0,84 \text{ Cu} (T_0 - T_n^c) + 0,25 \frac{100}{O_2} \text{ Cu} (T_0 - T_n^d). \quad (40-4)$$

Из формулы (40-3) следует, что во втором периоде на 1 кг штейна (содержащего 30 % Cu) выделится 513 кДж тепловой энергии, т. е. примерно 20 % от того количества тепла, которое поступило в конвертер в первом периоде. Эта энергия расходуется на нагрев технологических газов (60—70 %), компенсацию потерь тепла через ограждение конвертера в окружающую среду (~25 %),

а также на нагрев и плавление холодных присадок (5—8 %), которые представляют собой слитки черновой меди, анодный скрап и т. п. материалы.

Конвертирование полиметаллических штейнов происходит так же, как и медных. Отличие заключается только в ином распределении тепловой энергии, выделившейся при окислении сульфидов, по периодам технологического процесса. Во второй период конвертирования выделяется примерно 80 % от того количества тепла, которое поступило в конвертер в первом периоде. Сравнительно небольшая разность между интенсивностью тепловыделений в течение обоих периодов объясняется повышенным содержанием сульфидов железа и других металлов в расплаве, поступающим на вторую стадию конвертирования. Средняя температура в зоне технологического процесса при конвертировании полиметаллических штейнов в первом периоде составляет 1190 °С, во втором 1250 °С.

Никелевые и медно-никелевые штейны существенно отличаются по своему составу от медных и полиметаллических. Это различие, оказывающее большое влияние на тепловую работу конвертера, заключается в том, что металлы находятся в них как в сульфидной, так и в металлической форме. В виде металла находится от 28 до 42 % Fe, которое входит в состав ферроникеля, до 60 % Ni и до 80 % Co. Получение металлического никеля из штейна непосредственно в конвертере нецелесообразно, так как конвертирование в этом случае проходит при неблагоприятных в технологическом отношении условиях. Поэтому конвертирование заканчивается на стадии образования обогащенных никелем (и медью) сульфидных соединений, именуемых фajnштейном.

Процесс конвертирования включает в себя две стадии: окисление металлического и частичное окисление сульфидного железа с целью получения (набора) богатой цветными металлами сульфидной массы и ее доводку (варку фajnштейна). На первой стадии конвертирования сначала окисляется металлическое, а затем сульфидное железо. При окислении металлического железа на единицу массы штейна выделяется значительно большее количество тепла, чем при окислении сульфидного соединения.

Из опыта работы промышленных конвертеров следует, что в этот период продувка расплава сопровождается повышением его температуры на 5—10 °С/мин. Во избежание перегрева расплава в него загружается максимально возможное количество холодных присадок, в качестве которых применяют застывший штейн, электропечной шлак и обороты конвертерного передела, содержащие не менее 5—10 % Ni. Количество холодных присадок зависит от состава штейнов и колеблется в пределах от 30 до 100 % от массы заливаемого в конвертер расплава. Содержание кремнезема в кварцевых флюсах, применяемых при переработке никелевых штейнов, должно быть не менее 85—90 %.

В некоторых случаях для поддержания в конвертере заданного температурного режима прибегают к следующему приему: после слива первого шлака (т. е. после первой продувки) проводят одну или несколько так называемых «холостых» продувок без заливки новых порций штейна. «Холостые» продувки проходят с менее интенсивным тепловыделением и соответственно менее резким изменением температуры ванны, так как при этом окисляется сернистое, а не металлическое железо. По мере снижения содержания железа в сульфидной массе создаются более благоприятные условия для заливки в конвертер новых порций штейна.

Доводка сульфидной массы до фэйиштейна заключается в окислении оставшихся в конвертере после серии продувок сульфидов железа и кобальта с последующим ошлакованием образовавшихся окисленных соединений кварцевым флюсом.

3. Конструкция конвертеров

Конвертеры, применяемые для переработки медных, полиметаллических, никелевых и медно-никелевых штейнов, по конструкции практически не отличаются друг от друга. Их емкость обычно оценивается количеством металла, содержащегося в рабочем пространстве агрегата, и колеблется в пределах от 20 до 100 т.

В зависимости от емкости диаметр и длина конвертера изменяются соответственно от 2,3 до 4,3 и от 4,5 до 10 м.

Конвертер (см. рис. 40-1) состоит из цилиндрического горизонтально расположенного корпуса, напыльника для сбора и удаления технологических газов, системы опор и привода поворотного механизма.

Корпус конвертера выложен из огнеупорного кирпича и заключен в металлический кожух из листовой стали толщиной 20—45 мм. Для футеровки конвертера могут быть использованы хромомагнезитовые, магнезито-хромитовые и периклазошпинелидные огнеупоры. Толщина кладки обычно составляет 230—380 мм. В области фурменного пояса, где огнеупоры подвергаются наиболее интенсивному воздействию агрессивной расплавленной среды, толщина футеровки увеличивается до 540—800 мм. Между кладкой и кожухом расположена засыпка из магнезитового порошка. Срок службы огнеупорной футеровки конвертера составляет 3—6 месяцев.

Горловина конвертера, имеющая круглую, овальную или прямоугольную форму, расположена под углом 13—30° к вертикальной плоскости. По периметру отверстия горловины к кожуху крепится футерованная огнеупорным кирпичом литая стальная рама (воротник) высотой 550—900 мм. Для подвода воздуха в расплав служат фурменные трубки с внутренним диаметром от 36 до 51 мм и толщиной стенки 3—5 мм, установленные в кладке под углом 3—11° к горизонтальной плоскости.

Напыльник устанавливают непосредственно над горловиной. Он представляет собой составленную из металлических листов камеру, свободно соединяющую горловину с газоотводящей системой. Передняя стенка камеры делается обычно подвижной, что позволяет производить очистку горловины и задней стенки напыльника от настылей. Для плотного прилегания напыльника к корпусу конвертера и защиты системы подвода воздуха от брызг расплавленного материала в области горловины устанавливают вспомогательный защитный кожух (фартук).

Фундаментом для конвертера служат две массивные бетонные плиты, на которых расположены специальные опорные устройства с несущими роликами из литой стали и привод механизма поворота. Установку корпуса конвертера на опорные ролики осуществляют с помощью двух стальных бандажей, жестко скрепленных с кожухом. Около одного из бандажей на корпусе конвертера установлена большая кольцевая шестерня, которая является последним звеном приводного механизма.

Загрузка флюсов в горловину конвертера производится из сборного бункера с помощью ленточного или пневматического питателя.

Основные технические характеристики конвертера представлены в табл. 40-1.

Т а б л и ц а 40-1. Техническая характеристика конвертеров

Параметры	Емкость конвертера, т				
	40	40	40	75	75
Размеры конвертера, мм:					
длина	7875	6100	7875	9150	10 200
диаметр	3050	3660	3050	4000	3 950
Число фурм	32	32	30	46	53
Диаметр фурм, мм	44	44	44	48	51
Размеры горловины, мм	1980×	2500×	1700×	2500×	2000×
	× 1740	× 1700	× 2000	× 2000	× 3000
Мощность привода, кВт	33	30	24	55	50

К основным достоинствам конвертирования можно отнести: автогенный характер протекания процесса, возможность переработки большой массы скрапа и холодных присадок, высокое содержание сернистого ангидрида в технологических газах, позволяющее направлять их на производство серной кислоты. Недостатками являются: плохой отстой шлаков и связанное с ним пониженное прямое извлечение металлов, загрязнение атмосферы выбивающимися из поднапыльника технологическими газами, периодичность работы и необходимость прочистки фурм.

Один из основных недостатков — загрязнение воздушного бассейна технологическими газами может быть полностью ликвидирован с применением конвертера с боковым отводом газов

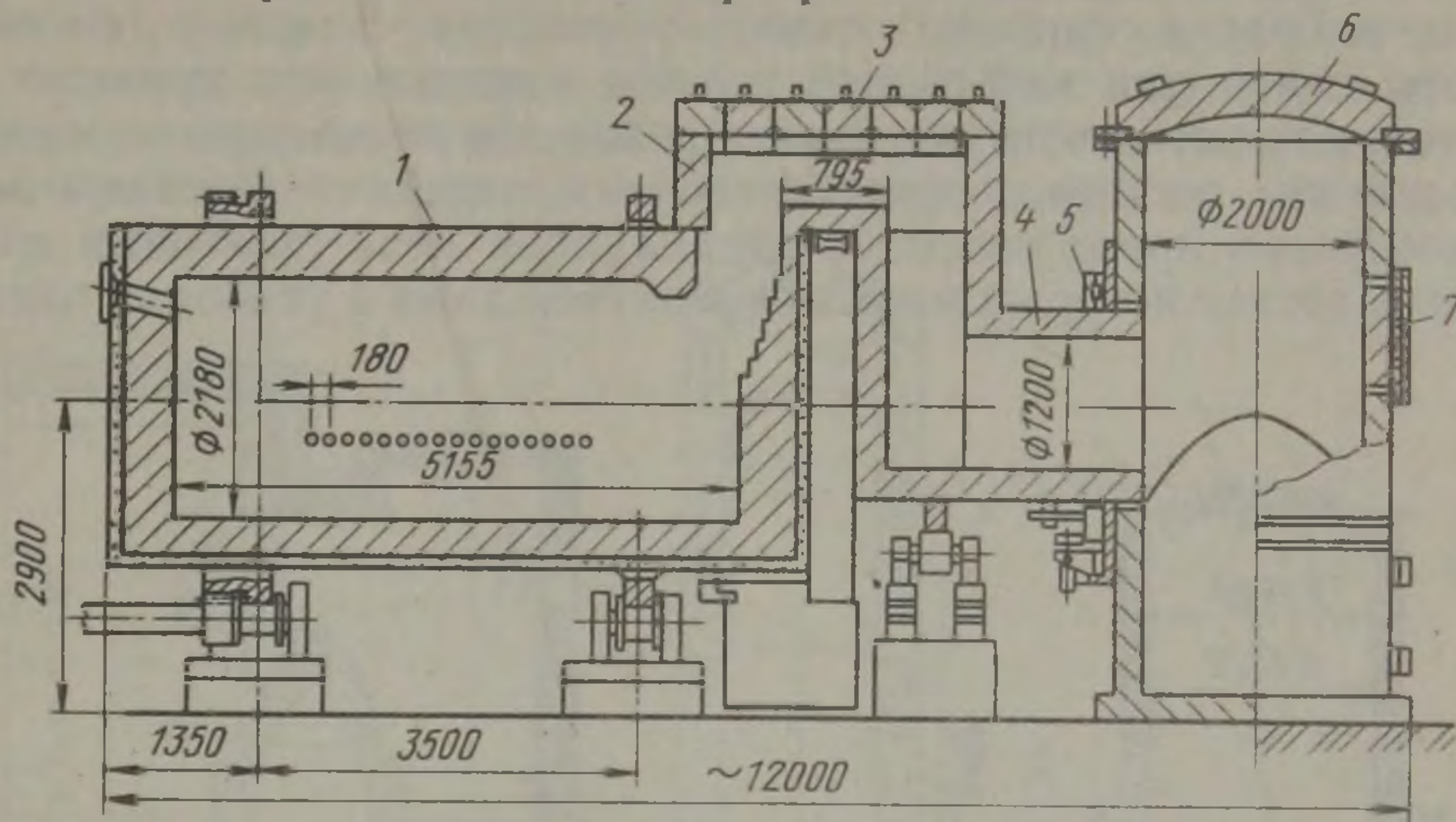


Рис. 40-2. Конвертер с боковым отводом газов:

1 — корпус конвертера; 2 — П-образный футерованный газоход; 3 — съемные арочные блоки; 4 — горизонтальный цилиндрический газоход (царга); 5 — уплотнение; 6 — стационарная камера; 7 — люк для очистки камеры и газохода от пыли

(рис. 40-2). В отличие от обычного конвертера на одной из торцевых сторон его имеется специальное устройство для отвода газов, заключенное в стационарную камеру, соединенную с газоходной системой.

Глава 41

ПЕЧИ ДЛЯ АВТОГЕННОЙ ПЛАВКИ МЕДНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ НА ШТЕЙН И ЧЕРНОВУЮ МЕДЬ

СРС

1. Общие сведения и принцип работы печей для плавки на штейн

Автогенными принято называть технологические процессы, идущие за счет химической энергии сырьевых материалов. Традиционным является, например, использование этой энергии на нагрев воздушного дутья и расплавление холодных присадок при конвертировании штейнов, а также при протекании процессов обжига сульфидов в кипящем слое. Многолетние работы по расширению области применения химической энергии сульфидов в производстве меди привели в начале пятидесятых годов к созданию принципиально новых промышленных агрегатов для плавки на штейн. Эти агрегаты имеют ряд существенных преимуществ

перед топливными и электрическими печами аналогичного назначения, которые заключаются в значительном (примерно в два раза) сокращении энергозатрат на переработку шихты и полной ликвидации выбросов сернистого газа в атмосферу. Вместе с тем опыт работы печей для автогенной плавки показал, что принцип их работы, а также конструктивные и режимные параметры во многом зависят от состава перерабатываемого сырья. Чрезвычайное разнообразие применяемых в металлургии меди шихтовых материалов, состав которых может изменяться даже в условиях одного

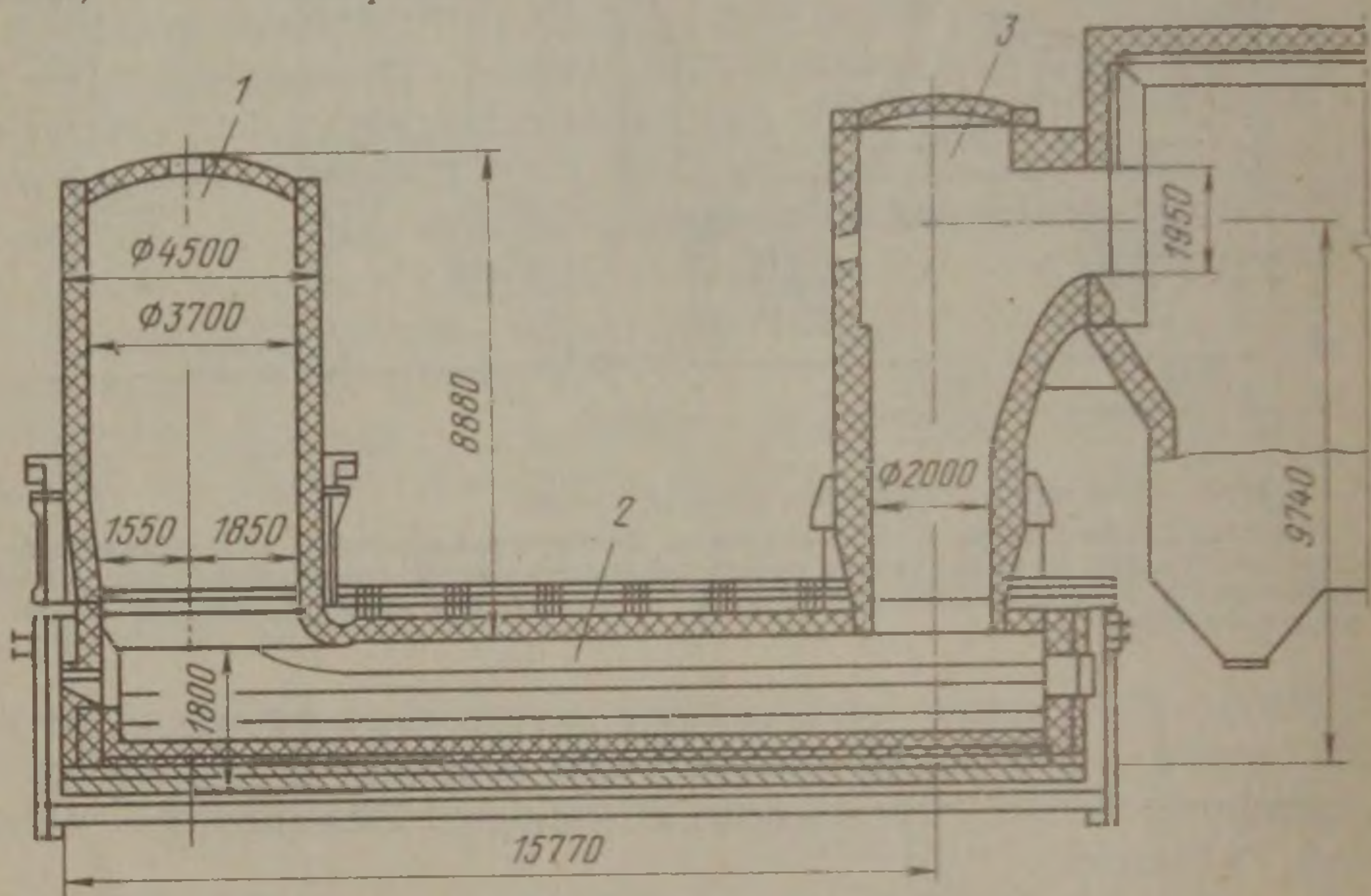


Рис. 41-1. Общий вид печи взвешенной плавки на воздушном дутье:
 1 — вертикальная плавильная шахта; 2 — зона отстаивания расплава; 3 — вертикальный газоход (сепарационная камера)

предприятия, создало предпосылки для создания в промышленности целой серии агрегатов для автогенной плавки различных конструкций.

По принципу работы различают три основных типа агрегатов для автогенной плавки на штейн:

1) печи для плавки концентратов во взвешенном состоянии в потоке предварительно нагретого воздуха или дутья, обогащенного кислородом, именуемые печами взвешенной плавки (ПВП);

2) печи для плавки концентратов во взвешенном состоянии в потоке технически чистого кислорода, которые иногда называют печами кислородно-взвешенной плавки (КВП);

3) печи для плавки шихтовых материалов в среде барботируемого газообразным окислителем шлакового расплава, более известные под названием печей для плавки в жидкой ванне (ПЖВ).

Печь взвешенной плавки на воздушном дутье представляет собой агрегат (рис. 41-1), состоящий из вертикально расположенной реакционной камеры цилиндрической формы, горизонтального отстойника и соединенной с газоходной системой сепарацион-

ной шахты. Сущность технологического процесса, протекающего в печи, заключается в следующем. Сухая шихта вместе с предварительно нагретым дутьем сверху через специальные горелки подается в реакционную камеру агрегата, где происходит частичное окисление содержащихся в ней сульфидов. За счет выделившегося в процессе окисления железа и серы тепла в технологическом факеле происходит нагрев и расплавление шихтовых материалов.

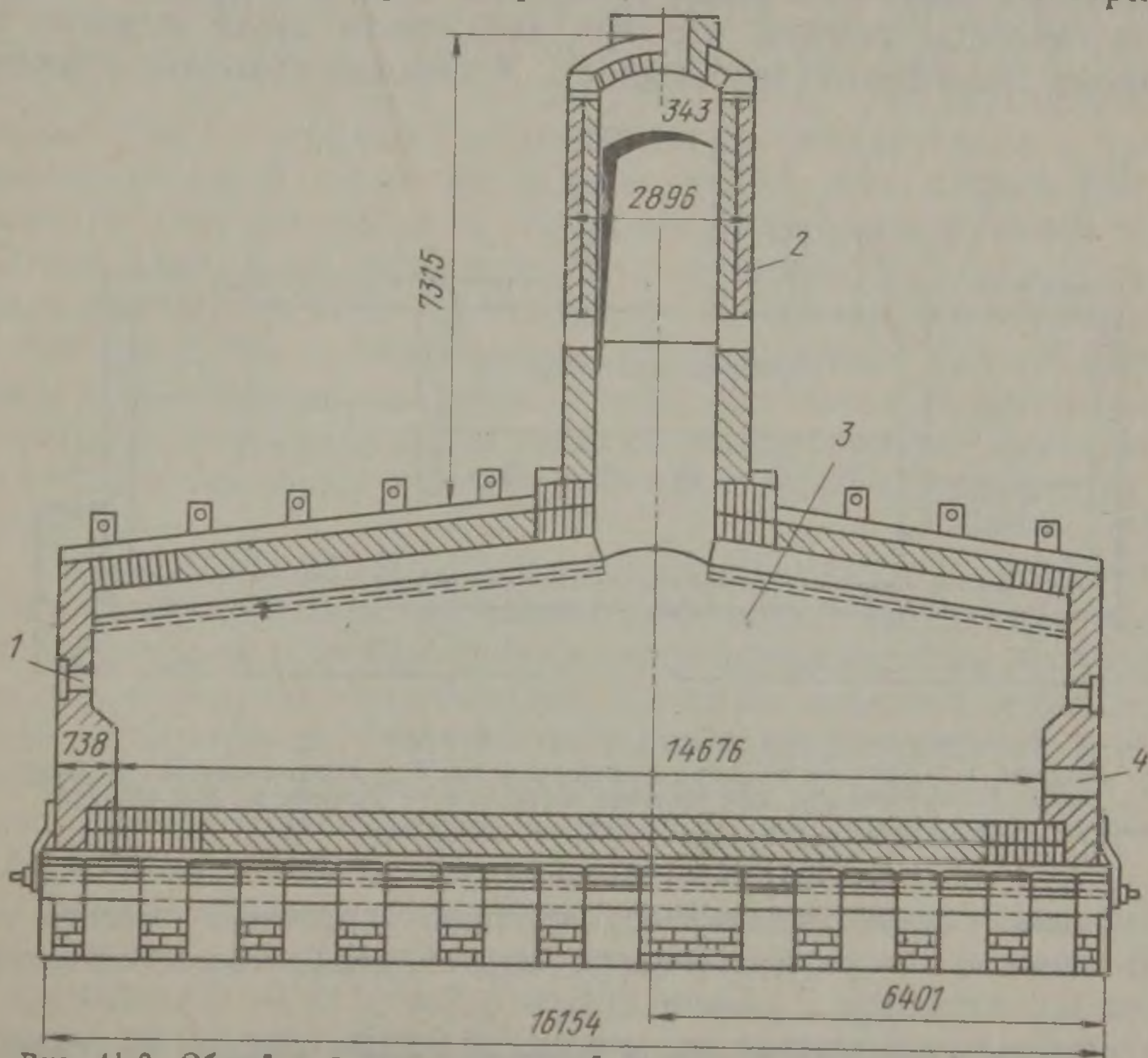


Рис. 41-2. Общий вид печи взвешенной плавки на кислородном дутье:
1 — шихтово-кислородная горелка; 2 — вертикальный газоход; 3 — плавильная зона; 4 — устройство для выпуска шлака

Образовавшиеся капли расплава под действием сил тяжести выпадают из газового потока и поступают на поверхность ванны расплава, расположенную на подине отстойника. В ванне происходит завершение процессов формирования шлака и разделение жидких продуктов плавки на штейн и шлак, которые по мере накопления выводятся из печи и направляются на дальнейшую переработку. Технологические газы проходят над ванной и удаляются из печи через сепарационную шахту, предназначенную для частичного удаления из газового потока увлекаемых им сравнительно крупных частиц шихты и капель расплава. Далее технологические газы, содержащие большое количество сернистого ангидрида, направляются на производство серной кислоты.

Печь взвешенной плавки на кислородном дутье (рис. 41-2) представляет собой прямоугольную камеру, в центре которой

над сводом размещен вертикальный газоход. Переход с воздушного на кислородное дутье дает возможность несколько упростить конструкцию печи взвешенной плавки без изменения принципа ее работы. Применение кислородного дутья позволяет значительно (по сравнению с воздушным) сократить количество технологических газов, приходящихся на единицу массы перерабатываемого материала, и вести окисление сульфидов шихты в горизонтальном технологическом факеле, что при воздушном дутье привело бы к резкому повышению пылевых выносов. Установка газохода в центре

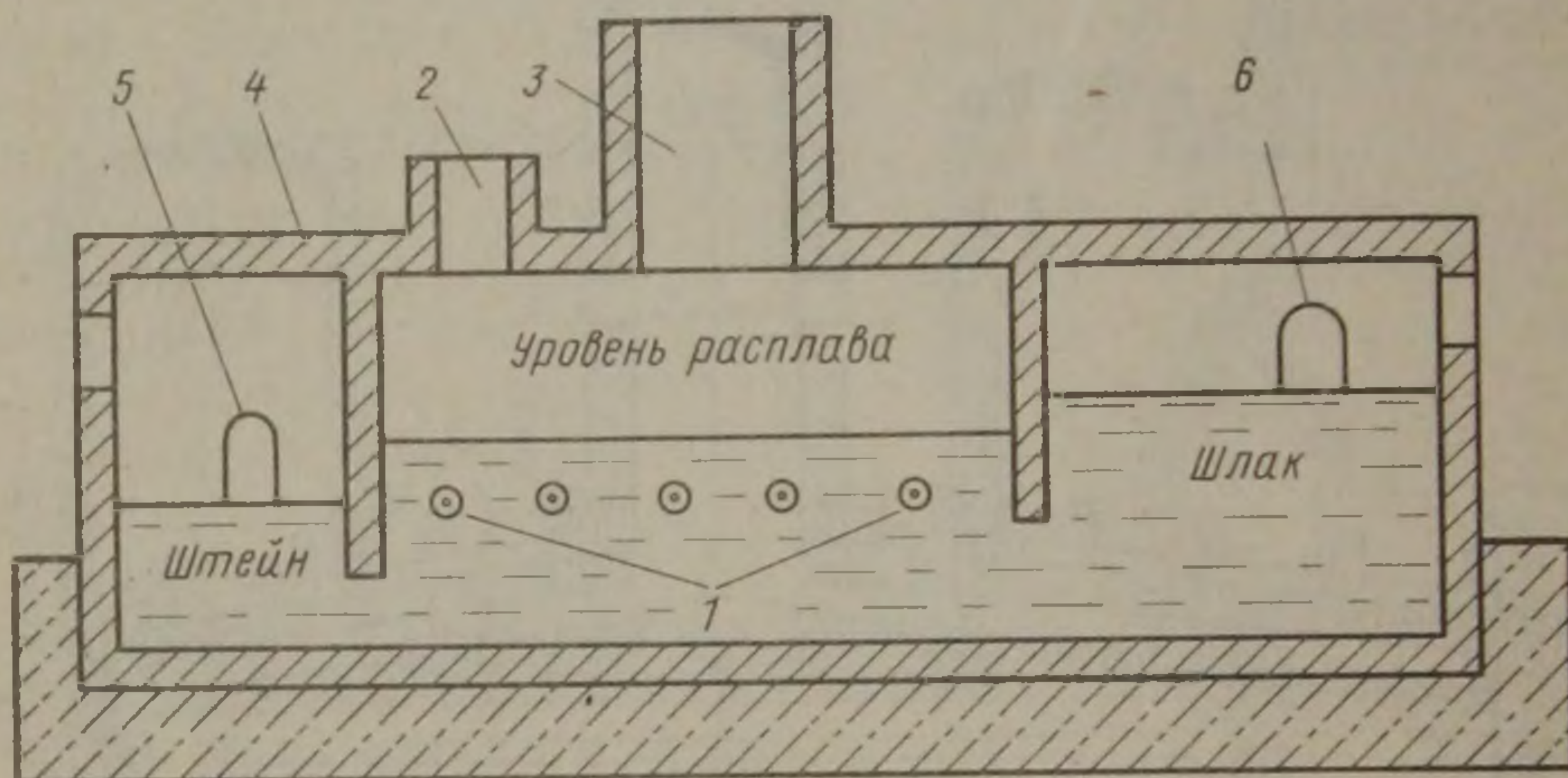


Рис. 41-3. Схема печи для плавки в жидкой ванне:

1 — фурмы; 2 — устройство для загрузки шихты; 3 — вертикальный газоход; 4 — свод; 5 — устройство для выпуска штейна; 6 — устройство для выпуска шлака

печи связана с необходимостью защиты футеровки (ее задней торцевой стенки) от разрушающего воздействия технологического факела.

В печи для плавки шихты в жидкой ванне (рис. 41-3) технологический процесс осуществляется за счет тепловой энергии, выделяемой непосредственно в среде барботируемого газообразным окислителем шлак-штейнового расплава. В качестве окислителя в печи в зависимости от состава сырья используются воздух, дутье, обогащенное кислородом, или технически чистый кислород. Дутье подается в расплав через специальные фурмы, расположенные по обе стороны ванны в боковых стенках печи. Образующиеся в результате протекания технологического процесса газы всплывают на поверхность ванны, способствуя ее интенсивному перемешиванию, и удаляются через вертикальный газоход, установленный в центре печи. Перерабатываемая шихта без предварительной подготовки (тонкий помол, глубокая сушка и т. п.) подается в печь сверху через загрузочное устройство. Попадая на поверхность ванны шихта перемещается вглубь расплава, энергично перемешивается с ним и расплавляется под действием высоких температур. Жидкие продукты плавки в подфурменной зоне раз-

деляются на штейн и шлак, которые по мере накопления выводятся из агрегата через отстойники сифонного типа, расположенные с торцевых сторон печи.

2. Тепловой и температурный режимы работы печей для плавки на штейн

По энергетическому признаку агрегаты для автогенной плавки на штейн относятся к печам смешанного типа, так как в них газообразный окислитель и компоненты шихты, участвующие в экзотермических реакциях, нагреваются непосредственно в процессе теплогенерации, тогда как остальные продукты плавки получают тепло за счет теплообмена. Тепловая работа печей такого типа во многом зависит от характера распределения тепла между продуктами плавки, т. е. от соотношения интенсивности протекающих в них процессов теплогенерации и теплообмена. Как теплогенераторы они относятся к печам с массообменным режимом работы, в которых интенсификация массообменных процессов достигается за счет максимального увеличения реакционной поверхности сульфидов.

При анализе работы этих агрегатов в качестве печей-теплообменников необходимо учитывать, что в той части рабочего пространства печи, где происходит интенсивное окисление сульфидов кислородом дутья, преобладают процессы переноса тепла конвекцией и излучением. В ванне, где происходит завершение процессов формирования расплава и его разделение на штейн и шлак, передача тепла осуществляется в основном теплопроводностью через шлак и конвекцией за счет осаждения штейна.

Закономерность тепло- и массопереноса в печах для автогенной плавки отличаются крайним разнообразием и сложностью. К сожалению из-за относительной новизны процесса пока отсутствуют надежные экспериментальные данные о тепловой работе рассматриваемых печей, что в значительной степени затрудняет теоретические расчеты в этой области. В реальной практике оценка режимных параметров агрегата осуществляется, как правило, на основе анализа материального и теплового балансов протекающего в нем технологического процесса.

Печи для автогенной плавки являются агрегатами непрерывного действия с относительно неизменными во времени параметрами теплового и температурного режимов работы. При составлении теплового баланса протекающего в печи технологического процесса могут быть использованы понятия тепловых эквивалентов сырьевых материалов и продуктов плавки. В этом случае уравнение теплового баланса плавки приобретает вид:

$$0,28A [Q_{\text{э.ш}}^{\text{г}} + Q_{\text{э.ш}}^{\text{т}} - n (Q_{\text{э.пр}}^{\text{г}} + Q_{\text{э.пр}}^{\text{т}}) - Q_{\text{ш}} - Q_{\text{д}}] - Q_{\text{пот}} = 0, \quad (41-1)$$

где A — производительность агрегата по проплавляемой шихте, т/ч; $Q_{э.ш}^r$, $Q_{э.ш}^t$, $Q_{э.пр}^r$, $Q_{э.пр}^t$ — соответственно теплогенерационные и теплообменные составляющие тепловых эквивалентов шихтовых материалов и продуктов плавки, кДж/кг; n — коэффициент, равный отношению массы штейна к массе переплавляемой шихты; $Q_{ш}$, $Q_{д}$ — соответственно теплотребление шихты и дутья, идущего на ее окисление, кДж/кг шихты; $Q_{пот}$ — потери тепла через ограждение печи, кВт.

Из уравнения (41-1) следует, что интенсивность теплообмена в рабочем пространстве печи (величина теплового потока $Q_{п}^r$) будет равна, кВт

$$Q_{п} = 0,28A (Q_{э.ш}^r - nQ_{э.пр}^r). \quad (41-2)$$

Ее величина должна соответствовать технологическим параметрам процесса, которые выбираются таким образом, чтобы в печи были созданы условия для наиболее полного разделения продуктов плавки. Известно, что повышение средней температуры в зоне технологического процесса с одной стороны ведет к снижению вязкости шлака и тем самым способствует ускорению разделения продуктов плавки, с другой — к увеличению растворимости штейна в шлаке и (в окислительной среде) к росту так называемых химических потерь меди со шлаком. В случае переработки конкретного сырья в зоне окисления сульфидов, как правило, стремятся поддерживать оптимальную температуру, значение которой определяется экспериментально. Так как соединения, полученные в результате окисления сульфидов, являются одновременно продуктами плавки, то их действительная температура должна быть равна средней температуре зоны технологического процесса. Из определения теплового эквивалента шихтовых материалов следует, что это условие соблюдается, когда поток тепла, отводимого от продуктов окислительных реакций, достигает своего максимального значения и будет равен, кВт

$$Q_{п} = 0,28A [Q_{х.ш} - Q_{э.ш}^r - n(Q_{х.пр} - Q_{э.пр}^r)], \quad (41-2')$$

где $Q_{х.ш}$ и $Q_{х.пр}$ — соответственно теплота сгорания шихты и продуктов плавки, кДж/кг.

Расчеты величин, входящих в уравнение (41-2), производятся по данным материального и теплового балансов плавки. Для приближенных расчетов могут быть использованы значения тепловых эквивалентов шихты и штейна, кВт

$$Q_{п}^r = 0,28A \left\{ 119,4S + 20,4Cu - 4001,5Sn \left[(2,90S + 0,17Cu - 53,40n) (T_0 - T_n^c) + (1,20S + 0,26Cu - 40,80n) (T_0 - T_n^d) \frac{100}{O_2} \right] 10^{-2} \right\}, \quad (41-3)$$

Тепло, которое поступает в зону технологического процесса за счет теплообмена (отводится от продуктов окисления сульфидов), расходуется в рабочем пространстве печи на нагрев и плавление сульфидных соединений, образующих штейн, флюсов и порообразующих компонентов шихты, а также на компенсацию потерь тепла через ограждение печи в окружающую среду.

Зная состав шихты и продуктов плавки и задаваясь производительностью печи, нетрудно определить, какое количество тепла в единицу времени необходимо подвести к компонентам шихты, не участвующим в экзотермических реакциях, для того, чтобы нагреть их до средних температур процесса. Для приближенных расчетов могут быть использованы следующие формулы:

$$Q_{п.с}^T = 0,28A (53,40n - 0,17Cu) (T_0 - T_H^c) 10^{-2}; \quad (41-5)$$

$$Q_{п.ф}^T = 0,28A [Q_{ш}(T_0) - Q_{ш}(T_H^c)] - Q_{п}^T(c), \quad (41-6)$$

где $Q_{п.с}^T$, $Q_{п.ф}^T$ — соответственно потоки тепла, поступающие на поверхность сульфидных частиц и флюсов, кВт.

Расчеты по формулам (41-4)—(41-6) позволяют установить взаимосвязь между основными параметрами технологического, теплового и температурного режимов работы печей для автогенной плавки, а также могут быть использованы при количественной оценке экспериментальных данных, полученных в процессе их эксплуатации.

В качестве примера возможного применения предложенной расчетной модели может быть рассмотрена типичная производственная ситуация, возникающая при необходимости повышения концентрации меди в штейне с целью уменьшения количества поступающего на конвертирование материала. Из формулы (41-1) следует, что рост степени десульфурации (снижение величины коэффициента n) при прочих равных условиях ведет к увеличению тепловой нагрузки агрегата и улучшению его теплового баланса. В этом случае, если согласно уравнениям (41-4) и (41-6) увеличение тепловой нагрузки сопровождается интенсификацией теплообмена в зоне технологического процесса, создаются благоприятные условия для сокращения энергозатрат на производство черновой меди за счет снижения температуры дутья или концентрации содержащегося в нем кислорода.

Изменение технологических параметров процесса без соответствующей коррекции его энергетических характеристик влечет за собой, как показал опыт работы промышленных печей, значительное ухудшение тепловой работы агрегата, связанное с серьезными нарушениями температурного режима плавки. Например, при переработке типового концентрата, содержащего 35 % S и 19 % Cu, в печи взвешенной плавки на кислородном дутье изменение концентрации меди в штейне с 35—40 до 45—50 % ведет сначала к возникновению промежуточного магнетитового слоя между шлаком и штейном, а затем к интенсивному образованию

настылей на подине печи, представляющих собой смесь застывшего шлака и штейна с большим содержанием магнетита.

Появление магнетитового слоя можно объяснить тем, что с повышением степени десульфурации в технологическом факеле стало больше окисляться сульфидов железа. Насыщение ванны расплава магнетитом повлекло за собой увеличение скорости эндотермических реакций и как следствие охлаждение и затвердевание шлак-штейнового расплава в области их протекания. Оценка этого явления с помощью расчетных формул (41-4) и (41-6) показала, что переход к получению богатых штейнов в рассматриваемом случае должен был сопровождаться интенсификацией теплообмена в зоне окисления сульфидов на 30 %, а в зоне протекания эндотермических реакций в полтора раза.

В печах взвешенной плавки на штейн интенсификация процессов теплообмена в ванне расплава представляет собой сложную научно-техническую задачу. Поэтому при повышении степени десульфурации соответствие параметров теплового режима плавки и ее технологических показателей достигается обычно за счет уменьшения производительности печи. Удельная производительность современных печей взвешенной плавки на штейн в зависимости от состава перерабатываемого сырья колеблется в пределах 4,5—15 т/м² в сутки, т. е. находится примерно на том же уровне, что и удельная производительность отражательных печей, отнесенная к единице площади зеркала ванны, расположенной между откосами. Для целого ряда шихтовых материалов снижение производительности агрегата ведет к резкому ухудшению его теплового баланса. В этих случаях становится необходимым сжигание в рабочем пространстве печи традиционных видов топлива, как это делается, например, в печи взвешенной плавки на штейн, работающей на медеплавильном заводе фирмы «Норддойче Аффинери». С той же целью на аналогичной печи фирмы «Тамано» в отстойнике установлены электроды, позволяющие организовать электрообогрев ванны, одновременно интенсифицируя в ней процессы тепло- и массопереноса.

В печах для плавки в жидкой ванне интенсивность процессов теплообмена в зоне технологического процесса на порядок выше, чем в газовой среде. Кроме того, процессы, протекающие в ванне, поддаются управлению при изменении параметров продувки. Поэтому в печах такого типа достигается высокая удельная производительность при широком диапазоне регулирования содержания меди в штейне.

Анализ тепловой работы печи, основанный на использовании балансных уравнений, позволяет оценить средние значения параметров, характеризующих интенсивность теплогенерационных и теплообменных процессов при автогенной плавке сульфидных материалов, но не дает информации о способах их достижения в условиях конкретного технологического процесса. В реальной

практике выбор основных параметров плавки, энергетических характеристик и конструкции печи производится, как правило, по данным экспериментальных исследований.

3. Конструкция печей взвешенной плавки на штейн

Печи для взвешенной плавки имеют различное конструктивное оформление, зависящее от характера применяемого окислителя и состава сырья. Использование предварительно нагретого воздушного дутья позволяет варьировать в широком диапазоне соотношение между интенсивностями протекающих в печи теплогенерационных и теплообменных процессов и тем самым создает возможность перерабатывать в ней шихтовые материалы различного состава. В этом случае в печи образуется большое количество технологических газов, движущихся в рабочем пространстве агрегата с высокими скоростями. Поэтому в целях снижения пылевывноса в печах взвешенной плавки на воздушном и обогащенном кислородом дутье обычно применяют вертикальное расположение технологического факела, заключая его в специальную реакционную камеру. С той же целью отвод газов из печи осуществляется через вертикальный газоход шахтного типа.

При использовании кислородного дутья возможности агрегата с точки зрения изменения его теплотехнических параметров в ходе плавки значительно ниже, чем при воздушном дутье. Однако сравнительно небольшое количество технологических газов, образующихся в процессе окисления сульфидов, дает возможность применить более компактную конструкцию агрегата с горизонтальным расположением технологического факела.

Конструкция печей взвешенной плавки на воздушном дутье

Основным элементом печи (см. рис. 41-1) является плавильная шахта, представляющая собой цилиндрическую камеру с внутренним диаметром от 3 до 8 м, высотой 7—12 м и толщиной стен 250—380 мм. Реакционная камера выложена из магнезитохромитового или хромомagneзитового кирпича и заключена в металлический кожух из листовой стали. Чтобы исключить смещение кладки кожух жестко скреплен с футеровкой и установленными в ней медными водоохлаждаемыми кессонами, которые расположены на стыке шахты со сводом отстойника. Шахта может иметь арочный или распорно-подвесной свод, выложенный из магнезитохромитового кирпича. Свод обычно делается двухслойным. Второй слой состоит из легковесного шамота толщиной 75—150 мм. Общая толщина свода 525 мм. Сверху кладка закрывается стальным листом, что улучшает герметичность свода и исключает возможность попадания пыли на его поверхность. В своде имеются четыре отверстия для установки шихтовых горелок. Кроме того, в центре свода расположено отверстие для установки горелки, предназначенной для сжигания традиционных видов топлива,

и ряд отверстий по периферии для подачи в печь конвертерной пыли.

Нижняя часть шахты плавно переходит в свод отстойника. Опорой шахты служит скрепленная с ее футеровкой и кожухом специальная сварная балка, которая с помощью стальных туг соединена со стоечным каркасом реакционной камеры. Отстойная зона печи имеет площадь пода от 40 до 300 м². В конструктивном отношении отстойник аналогичен анодным печам стационарного типа. Внутреннюю футеровку печи отстойника выполняют из магнезитохромитового кирпича. Для наружной кладки применяют шамот. Между шамотной и магнезитохромитовой кладкой по всему периметру печи на уровне ванны установлены медные водоохлаждаемые кессоны. Общая толщина кладки на уровне расплава составляет около 800 мм. Над ванной толщина кладки ступенчато уменьшается до 450—600 мм. В торцевой и боковых стенках печи предусмотрено несколько (9—11) шпуровых отверстий для выпуска продуктов плавки. Штейн выпускается в головной части печи, шлак — со стороны вертикального газохода. Выпускные отверстия обычно расположены на разных уровнях: высота шлаковых шпуров над подом составляет 500—600 мм, штейновых шпуров 25, 100 и 250 мм.

Под печи состоит из нескольких слоев и выкладывается из магнезитохромитового кирпича в виде обратной арки. Для его теплоизоляции используют легковесный шамот. Общая толщина кладки пода вместе с бетонным основанием 1,4 м. Свод печи имеет арочную или распорно-подвесную конструкцию. Кладка свода производится в два слоя: нижний слой состоит из магнезитохромитового кирпича, верхний — из теплоизоляционного огнеупорного материала. С целью герметизации сверху свод накрывают листовой сталью. Печь-отстойник имеет сварной металлический кожух и снаружи заключена в подвижный металлический каркас стоечного типа. Вертикальная сепарационная камера отличается от плавильной только формой и основными размерами. Ее длина равна 9 м, ширина 7 м, высота 17 м. В верхней части камеры имеется плавный переход к горизонтально расположенной газоходной системе.

Основой перерабатываемых в печи шихтовых материалов являются концентраты, содержащие, как правило, от 28 до 37 % S. Предварительно они сушатся и нагреваются до 100—120 °С, после чего подаются в печь. Для их окисления и транспортировки в печи используется нагретое дутье. Температура дутья и концентрация в нем кислорода зависят от состава шихты и колеблются в широких пределах, соответственно от 200 до 1000 °С и от 21 до 35 %. За счет тепла, выделившегося при окислении сульфидов, в технологическом факеле развиваются температуры порядка 1350—1450 °С. Технологические газы зависимости от параметров процесса содержат от 14 до 20 % сернистого ангидрида и около 340 г/м³ пыли. Из печи газы поступают в котел-

утилизатор, где охлаждаются с 1300—1350 до 350 °С, а затем после очистки в электрофильтрах от пыли направляются в сернокислотное производство.

Конструкция печей взвешенной плавки на кислородном дутье

Конструктивно эта печь (см. рис. 41-2) отличается от печи, работающей на воздушном дутье, и представляет собой прямоугольную камеру с полезным объемом 720 м³, в которой 600 м³ занимает реакционное пространство и 120 м³ — ванна расплавленного материала. Внутренняя длина печи 20 м, ширина 6 м, глубина ванны 1,0—1,5 м, высота рабочего пространства 4,0—4,5 м. Вертикальный газоход размещен над сводом печи, примерно на расстоянии 12 м от ее передней торцевой стенки. Нижняя часть газохода опирается на медную кессонированную арку, вверху он плавно переходит в горизонтальный газоход, по которому технологические газы поступают в котел-утилизатор.

Для повышения стойкости стен, выложенных из периклазошпинелидного кирпича, на глубину шлакового пояса в кладку заделаны медные водоохлаждаемые кессоны. Штейн выпускается через сифон или шпуровые отверстия, расположенные в боковой стенке печи. Выпуск шлака производится через шпуровые отверстия в задней торцевой стенке печи.

Печь оснащена двумя инжекционными прямоочными шихтовыми горелками. Они дают узкий технологический факел с углом раскрытия порядка 16°.

Основные параметры автогенной плавки на кислородном и воздушном дутье практически совпадают. При использовании кислородного дутья предварительно высушенная и нагретая до 100—150 °С шихта через горелки вдувается в печь, в рабочем пространстве которой температура достигает 1450—1550 °С. В технологическом факеле происходит разделение продуктов плавки на жидкую и газообразную фазы. Жидкая фаза разделяется в ванне расплава на штейн и шлак, средние температуры которых соответственно равны 1100 и 1280—1300 °С. Технологические газы, содержащие до 80 % сернистого ангидрида и около 300—500 г/м³ пыли, непрерывно выводятся из печи при температуре 1400—1450 °С. Далее они попадают в котел-утилизатор (или специальную камеру для охлаждения газов), проходят через систему электрофильтров и направляются в сернокислотное производство.

Суточная производительность печей взвешенной плавки на воздушном и кислородном дутье зависит от размеров агрегата и состава шихты. В среднем ее величина колеблется в пределах от 600 до 1900 т.

4. Принцип работы печей для плавки на черновую медь

От плавки на штейн процессы получения черновой меди отличаются только тем, что при их протекании происходит полное окисление содержащихся в шихте серы и железа. До настоящего

времени многочисленные попытки получить черновую медь в печах взвешенной плавки пока не увенчались успехом. Эксперименты показали также, что существует принципиальная возможность для реализации процесса непрерывного производства черновой меди в печах для плавки в жидкой ванне. Известна целая серия опытно-промышленных установок различного типа, работающих по этому принципу. Однако в промышленных условиях опробована пока только одна печь для плавки на черновую медь конструкции фирмы «Норанда» (рис. 41-4).

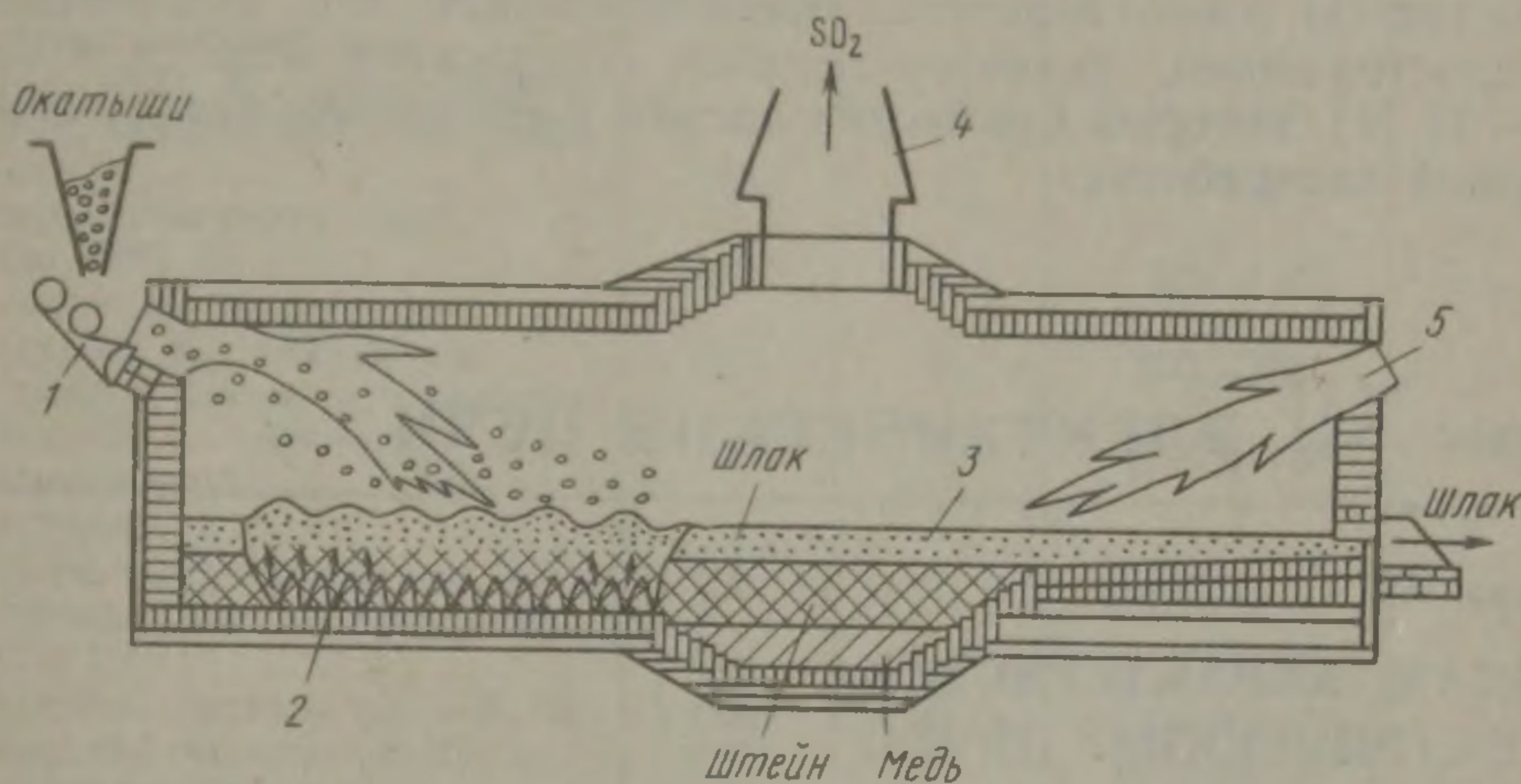


Рис. 41-4. Схема печи для плавки на черновую медь конструкции фирмы «Норанда»: 1 — загрузочное устройство; 2 — фурмы; 3 — отстойная зона; 4 — напыльник; 5 — горелочное устройство

В конструктивном отношении печь напоминает конвертер и представляет собой заключенную в металлический кожух реакционную камеру цилиндрической формы, выложенную из основного огнеупорного кирпича. Ванна расплава наводится на подине печи, в центральной части которой имеется специальное углубление — копильник, где скапливается черновая медь, периодически выпускаемая из агрегата через шпуровое отверстие. Слева от копильника установлен ряд фурм для подачи газообразного окислителя, справа в задней торцевой стенке печи расположена летка для выпуска шлака.

Технологические процессы в печи протекают по следующей схеме. Шихта, содержащая 28 % S и 24 % Cu, в виде окатышей поступает в рабочее пространство печи через специальное загрузочное устройство, установленное в ее передней торцевой стенке над ванной. Материал попадает в расплав, где интенсивно окисляется под действием дутья, подаваемого через фурмы. За счет выделившегося в результате протекания экзотермических реакций тепла происходит нагрев и расплавление шихты. Технологические газы удаляются через горловину, расположенную в центре печи над ванной.

Для отопления хвостовой части печи используется традиционное топливо, которое подается через горелки, установленные в ее задней торцевой стенке. Отходящие газы, представляющие собой смесь продуктов сгорания топлива и сульфидных материалов, содержат около 7—8 % сернистого ангидрида. Пылевынос составляет примерно 5 % от массы перерабатываемой шихты. Жидкими продуктами плавки являются черновая медь и богатый по меди шлак. Длина печи 21 м, диаметр 4 м. Производительность печи составляет примерно 730 т концентрата в сутки. Основным недостатком этого агрегата, препятствующим его дальнейшему распространению, является высокое содержание меди в шлаке (10—12 %), который неизбежно должен быть подвергнут дополнительной переработке.

Раздел XII. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЕЧИ

Глава 42

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

1. Общие сведения

Электронагрев достаточно широко используют в промышленности, сельском хозяйстве и в быту, что обусловлено энергетическими, технологическими, социальными и экологическими преимуществами, присущими этому виду теплогенерации. Электрические печи, установки и агрегаты разнообразны по назначению, конструктивному исполнению, размерам и характерным признакам. Электрические печи классифицируют по способу преобразования электрической энергии в тепловую с учетом взаимного расположения зоны генерации тепла и зоны технологического процесса, схемы подвода энергии для теплогенерации и режима тепловой работы согласно общей теории печей М. А. Глинкова:

Печи сопротивления, в которых в результате кондукционного (контактного) подвода энергии W за время t теплогенерация происходит по закону Ленца — Джоуля при прохождении тока I по активному сопротивлению R

$$W = I^2 R t. \quad (42-1)$$

Печи сопротивления с прямым подводом энергии, когда обеспечивается теплогенерация в зоне технологического процесса, являются печами — теплогенераторами, работающими в электрическом режиме (табл. 42-1). Печи сопротивления с косвенным подводом энергии, когда теплогенерация происходит во вспомо-

Т а б л и ц а 42-1. Теплотехническая характеристика электрических печей некоторых типов

Тип печи	Энергетические условия ¹	Режим тепловой работы ²	Интенсивность теплогенерации	
			кВт/м ²	МВт/м ²
Печи сопротивления прямого действия	ТГ	Э	—	До 20
Печи сопротивления косвенного действия:				
низкотемпературные (до 1000 К), циркуляционные, калориферы, сушильные шкафы	ТО	К	5—30	—
среднетемпературные (до 1500 К)	ТО	Р	80—120	—
высокотемпературные (>1500 К), вакуумные соляные ванны, печи электрошлакового переплава	ТО	Р	250—750	—
ТО	К	(2—3) · 10 ³	—	
Индукционные печи прямого действия:				
промышленной частоты (50 Гц) повышенной частоты (150—250 Гц)	СМ	С	(0,7—1) · 10 ³	—
средней частоты (0,5—8 Гц)	СМ	С	(1—1,5) · 10 ³	—
высокой частоты (>10 Гц)	СМ	С	(1,5—10) · 10 ³	—
СМ	С	(30—40) · 10 ³	—	
Установки диэлектрического нагрева	ТГ	Э	—	5—15
Дуговые печи прямого действия:				
сталеплавильные	ТО	Р	(1—2,5) · 10 ³	—
переплавные вакуумные	СМ	С	~ 10 ⁴	—
плазменно-дуговые	ТО	С	10 ⁶ —10 ¹⁰	—
Электронно-лучевые установки:				
нагревательные	СМ	С	10 ³	—
плавильные	СМ	С	10 ⁴ —10 ⁵	—
Лазерные установки	СМ	С	10 ¹⁰ —10 ¹²	—

¹ ТГ — печи-теплогенераторы; ТО — печи-теплообменники; СМ — печи со смешанными энергетическими условиями. ² Э — электрический режим; К — конвективный режим; Р — радиационный режим; С — смешанный режим тепловой работы электрической печи.

гательной зоне генерации тепла в виде твердого или жидкого нагревателя, являются печами-теплообменниками, работающими в конвективном (низкотемпературные циркуляционные печи) или радиационном (средне- и высокотемпературные печи) режиме.

Индукционные печи, в которых теплогенерация происходит по закону Ленца — Джоуля в результате индукционного подвода энергии переменного электромагнитного поля, создаваемого специальным устройством в виде индуктора. Индукционные печи могут быть печами — теплогенераторами с электрическим режимом тепловой работы. Однако промышленные индук-

ционные нагревательные и плавильные печи имеют смешанные энергетические условия (см. табл. 42-1), поскольку теплогенерация зависит от условий преобразования электрической энергии в зоне технологического процесса, в которой нагреваемый материал может иметь различное агрегатное состояние: твердый в индукционных нагревательных установках, жидкий в индукционных плавильных печах, ионизированный в высокочастотных плазмохимических установках. В ряде случаев, когда прямой индукционный подвод энергии в зону технологического процесса невозможен по электротехническим причинам или нежелателен по технологическим причинам, применяют индукционные печи-теплообменники, имеющие зону генерации тепла в виде специального нагревателя. Режим тепловой работы таких печей определяется теплопроводностью в индукционных плавильных печах с электропроводным (металлическим или графитовым) тиглем или излучением в индукционных нагревательных печах для спекания керамики.

Установки диэлектрического нагрева, в которых теплогенерация происходит за счет электрической поляризации диэлектрика, расположенного в переменном электрическом поле конденсатора. Установки диэлектрического нагрева являются печами-теплогенераторами, обеспечивающими равномерный или избирательный нагрев в зависимости от распределения диэлектрических свойств по объему зоны технологического процесса.

Дуговые печи, в которых теплогенерация происходит за счет энергетических преобразований дугового разряда, существующего в воздухе, инертной атмосфере или парах переплавляемых материалов. Дуговой разряд является зоной генерации тепла. В дуговых печах прямого действия дуговой разряд существует на границе (печи с открытой дугой) и даже внутри зоны технологического процесса, под слоем шихтовых материалов (печи с закрытой дугой). При нагреве в таких печах материалов с достаточной электрической проводимостью в зоне технологического процесса возможна дополнительная теплогенерация по закону Ленца — Джоуля. Поэтому тепловой режим работы дуговых печей прямого действия может иметь смешанную схему. Дуговые печи косвенного действия, имеющие некоторое применение в машиностроении, являются печами-теплообменниками и работают в радиационном режиме. Разновидностью дуговых печей являются плазменно-дуговые печи, в которых в качестве энергоносителя используют потоки газоразрядной низкотемпературной плазмы с температурой $(0,5—2) \cdot 10^4$ К и которые работают как печи-теплообменники в конвективном или радиационном режиме в зависимости от силы тока и длины столба дуги.

Электронно-лучевые установки, в которых происходит преобразование энергии электрического поля высокого напряжения в кинетическую энергию быстролетающих электронов,

формируемых в виде электронного луча, с последующим ее рассеянием в тепло при попадании на поверхность нагреваемого металла. Такие установки могут рассматриваться как печи-теплогенераторы условно, поскольку для зоны технологического процесса в виде массивного твердого или жидкого тела прямая теплогенерации имеет место только в поверхностном слое на глубине внедрения ускоренных электронов в кристаллическую решетку нагреваемого тела (для металлов — несколько микрометров), а остальной объем зоны нагревается в результате теплопереноса (см. табл. 42-1).

Л а з е р н ы е у с т а н о в к и, т. е. установки нагрева когерентным излучением оптического квантового генератора.

2. Основные понятия и закономерности

Электрическая энергия, вводимая в печь того или иного способа электронагрева, должна иметь определенные параметры.

Например, в дуговую сталеплавильную печь или установку электрошлакового переплава электрическую энергию переменного тока промышленной частоты вводят при относительно низком напряжении и большой силе тока, хотя экономная передача электрической энергии от энергосистемы возможна только при высоких напряжениях. Поэтому для питания электрических печей такого типа применяют преобразователь электрической энергии в виде понижающего трансформатора. Для питания индукционных печей электрической энергией средней или высокой частоты необходим преобразователь частоты. Дуговые вакуумные печи питают от преобразователя постоянного тока низкого напряжения. Для работы электронно-лучевых установок необходим повышающий трансформатор и высоковольтный выпрямитель для получения постоянного тока напряжением 15—35 кВ.

Для улучшения характеристик печей как объектов потребления электрической энергии применяют вспомогательное электрооборудование в виде реакторов, конденсаторных батарей, феррорезонансных стабилизаторов и т. п. Для включения, отключения и переключений электрооборудования устанавливают коммутационную аппаратуру в виде выключателей, разъединителей, контакторов и т. п. Для измерения, контроля и регулирования параметров электрического режима работы печи, сигнализации и защиты электрооборудования и самой печи от перегрузок, коротких замыканий и возможных аварий применяют контрольно-измерительную, регулирующую, сигнальную и защитную аппаратуру.

Таким образом, нормальная работа электрической печи возможна в комплексе с силовым и вспомогательным электрооборудованием и соответствующей аппаратурой. Все это входит в понятие «электроречная установка» как комплекса теплотехнического

и электротехнического оборудования, состоящего из трех частей:

1) собственно печи, в которой происходит преобразование электрической энергии в тепловую и нагрев металла;

2) печной электрической подстанции, где размещают необходимое электрооборудование и всю вышеперечисленную аппаратуру;

3) пульты управления, на которых выводят кнопки и ручки управления электропечной установкой и вспомогательными механизмами печи, а также приборы контрольно-измерительной аппаратуры.

Основными параметрами электропечной установки являются:

а) мощность преобразователя электрической энергии или пропорциональная ей тепловая мощность, вводимая в печь;

б) размеры печи (например, объем или определяющий линейный размер);

в) вместимость (садка), т. е. количество металла, выдаваемого печью периодического действия за один цикл или за одну плавку. Для печей непрерывного действия в качестве параметра принимают часовую производительность, характеризующую массовую скорость нагрева.

При работе электропечной установки имеют место два вида потерь энергии — тепловые потери (в рабочем пространстве печи) и электрические потери (в составных частях электропечной установки). Это делает необходимым составлять дополнительно к тепловому балансу энергетические балансы:

а) баланс энергии в виде сопоставления количества W_c технологической электрической энергии, подводимой к электропечной установке от энергосистемы за какой-то период времени, и расхода этой энергии за то же время

$$W_c = W_{\text{пол}} + W_{\text{всп}} + W_{\text{т.п}} + W_{\text{э.п}} = (W_{\text{пол}} + W_{\text{всп}} + W_{\text{т.п}}) / \eta_{\text{э}} = W_{\text{пол}} / (\eta_{\text{э}} \eta_{\text{т}}) = W_{\text{пол}} / \eta_0; \quad (42-2a)$$

б) баланс мощности в виде сопоставления мощности P_c , забираемой из энергосистемы в данный момент времени, и расхода ее внутри электропечной установки

$$P_c = P_{\text{пол}} + P_{\text{всп}} + P_{\text{т.п}} + P_{\text{э.п}} = (P_{\text{пол}} + P_{\text{всп}} + P_{\text{т.п}}) / \eta_{\text{э}} = P_{\text{пол}} / (\eta_{\text{э}} \eta_{\text{т}}) = P_{\text{пол}} / \eta_0; \quad (42-2б)$$

где $W_{\text{пол}}$ ($P_{\text{пол}}$) — полезная энергия (мощность), расходуемая на проведение технологического процесса¹; $W_{\text{всп}}$ ($P_{\text{всп}}$) — энергия (мощность), расходуемая на нагрев футеровки и конструкции в рабочем пространстве печи; $W_{\text{т.п}}$ ($P_{\text{т.п}}$) — расход энергии (мощности) на компенсацию тепловых потерь из рабочего про-

¹ С учетом тепловых эффектов эндотермических и экзотермических процессов.

странства печи; $W_{в.п}$ ($P_{в.п}$) — расход энергии (мощности) на компенсацию электрических потерь в составных частях электропечной установки и токоподвода; $\eta_{э}$, $\eta_{т}$, $\eta_{о}$ — электрический, тепловой и общий к. п. д. соответственно.

Оба баланса (42-2) состоят из качественно одинаковых статей прихода и расхода, но количественное соотношение их в различные моменты процесса электронагрева может быть различным.

Годовая производительность электропечной установки M равна

$$M = m_0 T (1 - 0,01 \text{Пр}) / (t_1 + t_2 + t_3), \quad (42-3)$$

где m_0 — масса садки; T — годовой фонд времени (при круглосуточной работе 8760 ч); Пр — количество горячих и холодных простоев, %; t_1 — период подготовки печи к нагреву; t_2 — период нагрева или плавления; t_3 — период технологической обработки изделия.

Из баланса энергии периода нагрева согласно (42-2а) имеем

$$t_2 = (im_0 + P_{т.п}t_1) / (P_{в.ср} - P_{т.п}), \quad (42-4)$$

где i — энергия, теоретически необходимая на нагрев (или плавление) единицы массы садки, т. е. удельная энтальпия; $P_{в.ср}$ — средняя тепловая мощность, вводимая в печь и равная

$$P_{в.ср} = k_{в} S_{ном} \cos \varphi \eta_{э}; \quad (42-5)$$

$S_{ном}$ — номинальное значение полной электрической мощности электропреобразователя; $k_{в}$ — коэффициент использования номинальной мощности за период нагрева t_2 , равный

$$k_{в} = \left[\int_0^{t_2} P_{в}(t) dt \right] / (S_{ном} \cos \varphi \eta_{э} t_2); \quad (42-6)$$

$\cos \varphi$ — коэффициент мощности как отношение активной мощности P к полной мощности S установки переменного тока; $P_{в}(t)$ — переменное согласно графику энергетического режима печи значение тепловой мощности в период нагрева t_2 .

Таким образом, годовая производительность электропечной установки, определяющая технико-экономические показатели работы, зависит от двух основных параметров — массы садки m_0 и номинальной мощности электропреобразователя $S_{ном}$.

Важным показателем работы электрической печи является удельный (на единицу массы продукции) расход электроэнергии W_y , который определяют из баланса энергии проектируемой электропечной установки [см. (42-2а)] или по показаниям счетчика электрической энергии действующей установки:

$$W_y = W_{э} / m_0 = [i + i_p + (P_{1т.п} t_1 + P_{2т.п} t_2 + P_{3т.п} t_3) / \eta_{э}], \quad (42-7)$$

где i_p — энергия, теоретически необходимая для проведения технологического процесса в период t_3 ; $P_{1т.п}$, $P_{2т.п}$ и $P_{3т.п}$ —

мощность тепловых потерь печи соответственно в периоды t_1 , t_2 и t_3 .

Зависимости $M = f_1(m_0, S_{\text{ном}})$ согласно (42-3) и $W_y = f_2(m_0, S_{\text{ном}})$ согласно (42-7) с учетом (42-4), дополненные анализом тех-

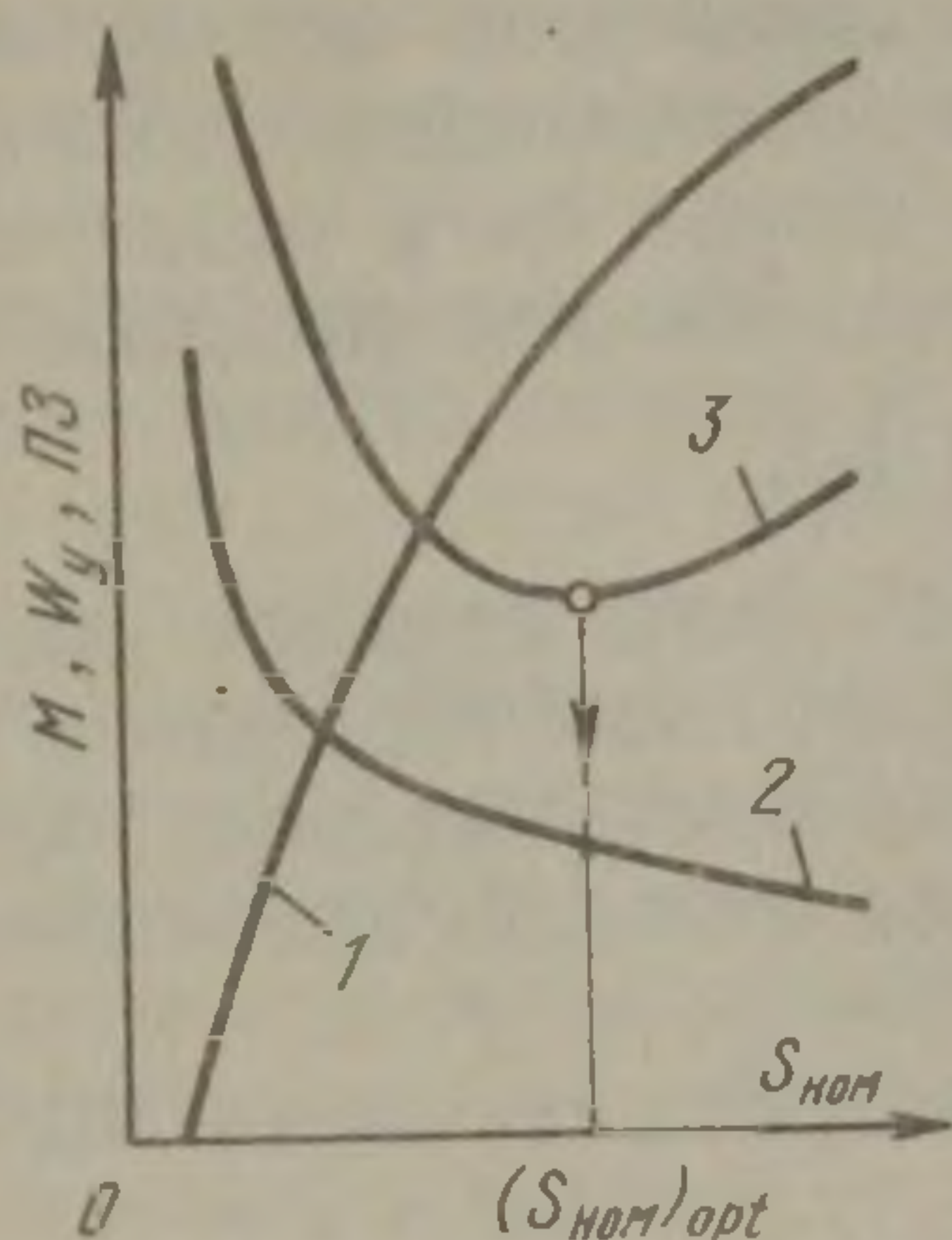


Рис. 42-1. Зависимость технико-экономических показателей электропечной установки заданной вместимости ($m_0 = \text{const}$) от номинальной мощности электропреобразователя $S_{\text{ном}}$:

1 — $M = f_1(S_{\text{ном}})$; 2 — $W_y = f_2(S_{\text{ном}})$; 3 — $\text{ПЗ} = f_3(S_{\text{ном}})$.

нико-экономических показателей, в частности, приведенных затрат $\text{ПЗ} = f_3(m_0, S_{\text{ном}})$ позволяют определить экономически оптимальные параметры установки (рис. 42-1).

3. Общая характеристика электрических печей, применяемых в черной и цветной металлургии

На заводах черной и цветной металлургии электрические печи применяют для извлечения металлов из руд (рудовосстановительные печи), выплавки металлов (плавильные печи), рафинирования (рафинировочные печи), нагрева перед пластической деформацией (нагревательные печи) и для термической обработки (термические печи).

В рудовосстановительных печах путем энергоемкого восстановления природных руд и концентратов при высоких температурах получают ферросплавы, продукты цветной металлургии (медные и медно-никелевые штейны, титановые и кобальтовые шлаки, никель, силикоалюминий и др.) и ряд специальных продуктов (карбид кальция, фосфор, плавленые огнеупоры и др.). Рафинировочные ферросплавные печи периодического действия работают с открытой дугой, имеют мощность 2,5—5 МВ·А и предназначены для производства безуглеродистого феррохрома, ферровольфрама, марганца и др. Рудовосстановительные печи непрерывного действия работают с дугой под слоем шихтовых материалов, в режиме смешанного нагрева и имеют мощность до 100 МВ·А. В некоторых странах такие печи мощностью 30—60 МВ·А применяют для выплавки чугуна (так называемые электродомны).

Разновидностью рудовосстановительных печей является созданный в СССР агрегат для кислородно-взвешенной электротермической плавки измельченных сульфидных и оксидных концен-

тратов цветных металлов с целью получения шлака, штейна и легколетучих металлов. В настоящее время разрабатывают рудовосстановительные печи с применением плазмохимических генераторов, называемых струйными плазматронами.

Высококачественную легированную электросталь выплавляют из скрапа и металлизированной шихты в основных дуговых сталеплавильных печах. Стальные отходы переплавляют в индукционных тигельных печах средней или высокой частоты, а также в плазменно-дуговых печах с огнеупорной футеровкой. Рафинирование стали и сплавов производят путем переплава в водоохлаждаемый кристаллизатор в переплавных печах — электрошлаковых, плазменно-дуговых, дуговых вакуумных, электронно-лучевых.

Чистые сплавы выплавляют в вакуумных индукционных печах. Чистые тугоплавкие редкие металлы получают в дуговых вакуумных печах. Дуплекс-процесс: вакуумная индукционная печь — электронно-лучевая установка применяют для получения особо чистых цветных и редких металлов, сплавов на основе железа никеля и кобальта.

Цветные металлы (цинк, медь, алюминий и их сплавы) выплавляют в индукционных канальных печах промышленной частоты. Применяемые для этих целей более простые плавильные печи сопротивления косвенного действия имеют худшие технико-экономические показатели.

Электрические печи достаточно широко (при соответствующем технико-экономическом обосновании) применяют для нагрева заготовок черных и цветных металлов перед пластической деформацией и для последующей термообработки в прокатных, кузнечно-прессовых, термических и метизных цехах. Камерные печи с выдвижным подом применяют для термообработки стального проката, шахтные — для отжига и охлаждения слитков переплавных процессов, колпаковые — для отжига и отпуска листов, рулонов ленты и бунтов проволоки. Для нагрева мерных заготовок простого сечения возможно применение электроконтактных кондукционных установок прямого нагрева.

В условиях непрерывного производства и однородного нагрева под горячую деформацию эффективно применение проходных печей сопротивления косвенного нагрева (конвейерных, рольганговых, карусельных и с пульсирующим подом), индукционных нагревателей прямого нагрева.

При термообработке металлопроката находят применение толкательные проходные печи сопротивления, протяжные с жидким теплоносителем (щелочи, соли, свинец, цинк, алюминий) для нагрева проволоки, тонких труб или лент. Барабанные печи обеспечивают равномерный нагрев сыпучих материалов в порошковой металлургии.

Цветные металлы до 600—800 К целесообразно нагревать в печах сопротивления косвенного нагрева с преобладанием конвективной теплопередачи в рабочем пространстве, которые также

могут быть садочными (камерная с выкатным подом) или проходными (конвейерная).

В разнообразных электрических печах проводят высокотемпературные технологические процессы получения и обработки тугоплавких металлов, полупроводниковых и сверхпроводящих материалов: спекание, вакуумный переплав, вытягивание монокристаллов из расплава, зонная плавка и перекристаллизация, испарение, напыление покрытий и пленок, диффузия, транспортные реакции и т. д.

В цветной металлургии печи сопротивления прямого нагрева применяют для графитации (при 2800 К) углеграфитовых изделий (например, электроды для дуговых печей).

4. Общая характеристика электрических печей, применяемых в машиностроении

Развитие машиностроения, связанное с увеличением единичной мощности агрегатов и повышением параметров выпускаемой продукции, определяет масштабы и уровень требований к своему металлургическому производству, применяемому металлургическому оборудованию. На машиностроительных заводах электрические печи используют для плавления, выдержки и дозированной разливки чугуна, стали, вторичных цветных металлов и сплавов при получении из них фасонного литья (в литейных цехах), для нагрева заготовок перед пластической деформацией (в кузнечных цехах), для термохимической обработки деталей и изделий (в термических цехах) и др. Парк электрических печей в машиностроении по разнообразию, количеству и параметрам превосходит парки всех других отраслей, вместе взятых.

В современных литейных цехах чугун и цветные металлы плавят в индукционных канальных и тигельных печах, выполняющих роль миксеров. Возможно применение для плавки чугуна дуговых печей прямого действия, для плавки меди и ее сплавов — дуговых печей косвенного действия, для плавки алюминия и его сплавов — камерных (радиационный режим тепловой работы) или тигельных (теплопередача теплопроводностью через стенку тигля) печей сопротивления косвенного действия.

В сталелитейных цехах сталь выплавляют в кислых дуговых печах вместимостью от 0,5 до 100 т. При необходимости получения большого количества жидкой стали применяют внепечные агрегаты для дугового или плазменного подогрева и рафинирования стали в ковше с электромагнитным перемешиванием, используя жидкий полупродукт из плавильных печей других типов (мартеновской печи, конвертера). Также широко применяют индукционные тигельные печи.

Крупные кузнечные слитки из высококачественной стали получают в переплавных печах. Для особо ответственных изделий сталь рафинируют в крупных вакуумных индукционных печах и элект-

тронно-лучевых установках по схеме дуплекс-процесса с другими плавильными печами.

Тугоплавкие редкие металлы для фасонного литья плавят в так называемых гарнисажных дуговых вакуумных печах и электронно-лучевых установках.

В качестве нагревательных и термических печей используют печи сопротивления и индукционные нагреватели прямого и косвенного нагрева садочные и проходные, периодического и непрерывного действия. Камерные электропечи с выдвижным подом применяют для термообработки крупногабаритных тяжелых литых, сварных, кованных и штампованных изделий. Шахтные электропечи часто komponуют в агрегаты для комплексной термообработки. Элеваторные печи применяют для отжига чугунных и стальных отливок в защитной атмосфере, для цементации крупногабаритных изделий, для нагрева изделий из алюминиевых сплавов.

Карусельные печи удобно использовать для нагрева заготовок под ковку или штамповку. Толкательные печи применяют для процессов длительной термической и химико-термической обработки (цементации, отжига отливок из белого чугуна, стальных поковок и отливок).

Необходимо отметить, что взаимосвязь процесса нагрева со смежными технологическими процессами, а также характер и организация производства обуславливают целесообразность объединения отдельных электропечей в электротермические агрегаты непрерывного действия.

В литейных цехах для сушки стержней и форм массой до 10—50 кг применяют конвейерные электропечи сопротивления косвенного нагрева и установки диэлектрического нагрева с частотой 6—50 МГц.

Для спекания изделий из порошков тугоплавких и легкоокисляющихся металлов, магнитных материалов и проведения технологических процессов с материалами высокой чистоты применяют высокотемпературные вакуумные и компрессионные электропечи сопротивления косвенного нагрева до 2800—3300 К (муфельные, трубчатые, многокамерные, протяжные).

Глава 43

ДУГОВЫЕ И ПЛАЗМЕННЫЕ ПЕЧИ

1. Дуговые сталеплавильные печи

Общая характеристика

Современные дуговые сталеплавильные печи (рис. 43-1) работают на трехфазном токе промышленной частоты. В дуговых печах прямого действия электрические дуги возникают между каждым из трех вертикальных графитированных электродов и металлом. Футерованный кожух ДСП образует сфероконическую ванну и

рабочее пространство, перекрытое сверху купольным сводом. Кожух опирается на опорную конструкцию с гидравлическим (реже с электромеханическим) механизмом наклона печи для

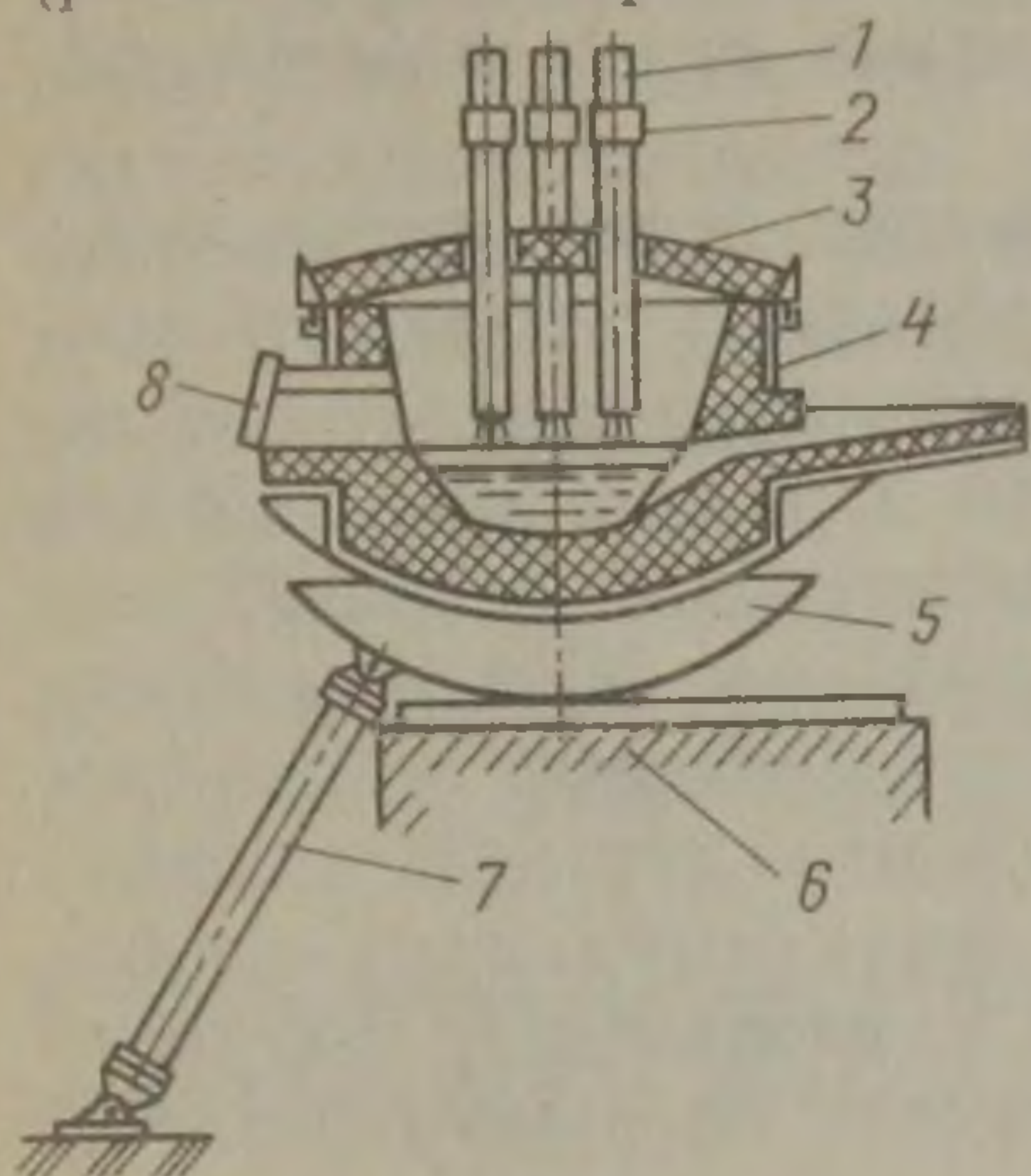


Рис. 43-1. Схема дуговой сталеплавильной печи:

1 — графитированные электроды; 2 — механизм передвижения электродов; 3 — свод; 4 — корпус; 5 — опорная конструкция; 6 — фундамент; 7 — механизм наклона; 8 — рабочее окно

слива металла на $40-45^\circ$ и для скачивания шлака на $10-15^\circ$ (в другую сторону). Печи имеют механизмы подъема и поворота свода для загрузки шихты через верх печи, передвижения электродов для изменения длины дуги и регулирования мощности, вводимой в печь. Крупные печи оборудованы устройствами для электромагнитного перемешивания жидкого металла в ванне, системами удаления и очистки печных газов.

После загрузки металлошихты в печь электроды опускают до короткого замыкания с шихтой и зажигают электрические дуги (рис. 43-2). По мере оплавления шихты под и вокруг электродов образуются «колодцы» в слое шихты, в которые опускаются дуги

и электроды. Наступает этап «закрытого» горения дуг, когда плавление шихты происходит в «колодцах» снизу, путем теплопередачи излучением на близлежащие слои шихты и теплопроводностью

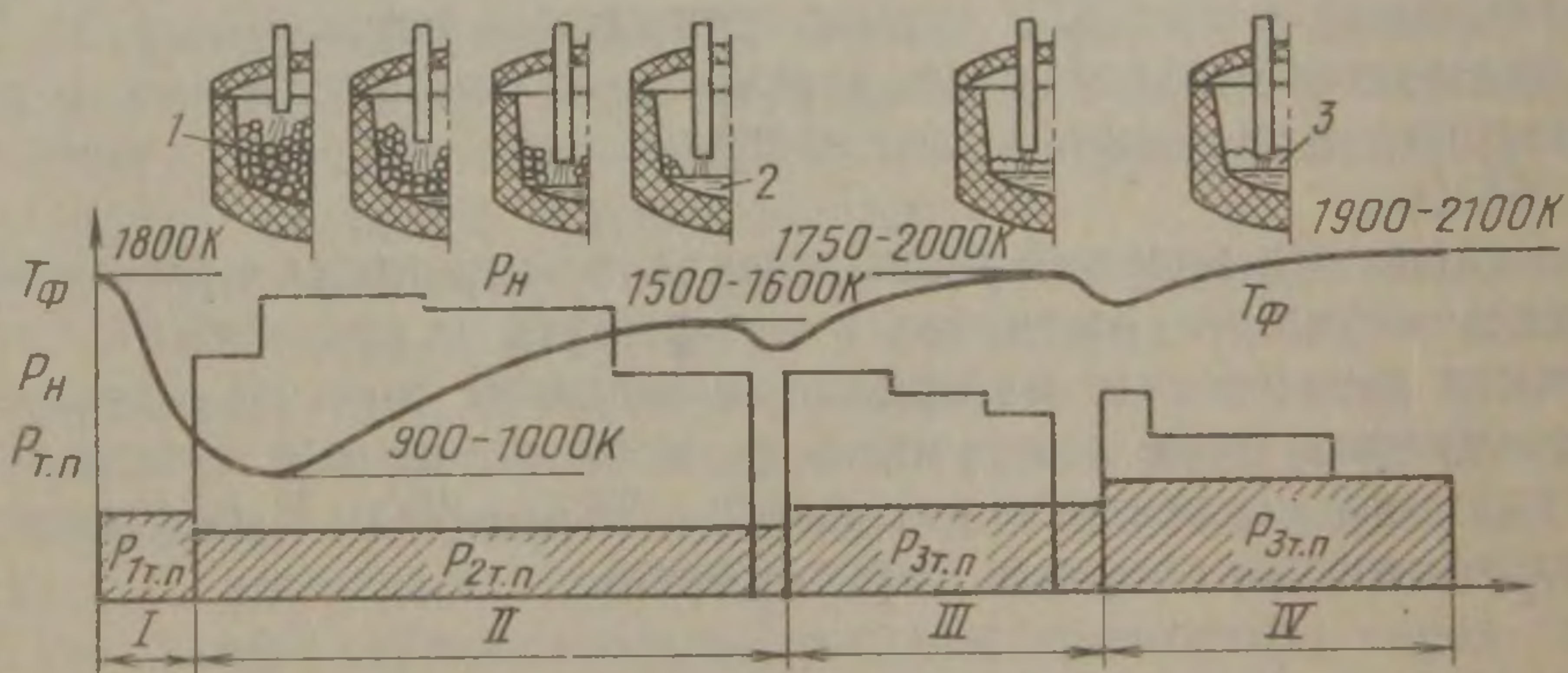


Рис. 43-2. Изменение условий тепловой работы печи в различные периоды плавки:

I — подготовка печи; II — плавление; III — окислительный; IV — восстановительный;
1 — шихта; 2 — жидкий металл; 3 — шлак

через слой жидкого металла, накопившегося на подине. В этот этап футеровка рабочего пространства экранирована от излучения дуг и целесообразно вводить максимальную тепловую мощность P_H [см. (42-5)] с учетом электротехнических возможностей печного трансформатора.

По мере наплавления количества жидкого металла, достаточного для заполнения пустот между кусками твердой шихты, элек-

трические дуги открываются и горят над зеркалом металлической ванны. Наступает этап «открытого» горения дуг, когда происходит интенсивное прямое излучение дуг на футеровку стен и свода и возникает необходимость снижения электрической мощности дуг в соответствие с тепловоспринимающей способностью футеровки.

Отечественные дуговые сталеплавильные печи, в которых в настоящее время выплавляют до 10 % всей стали, имеют вместимость m_0 от 0,5 до 200 т, номинальную мощность $S_{ном}$ от 0,63 до 125 МВ·А. Уровень электрической мощности оценивают удельной величиной $S_{ном}/m_0$ (табл. 43-1).

Т а б л и ц а 43-1. Энергетическая характеристика дуговых сталеплавильных печей

Уровень мощности	Удельная мощность, кВ·А/т	Максимальная мощность периода плавления		
		кВт/т жидкого металла	кВт/м ³ рабочего пространства	кВт/м ² площади зеркала ванны
Обычный	200—300	130—210	180—300	650—1000
Высокий	350—450	220—290	320—420	1000—1300
Сверхвысокий	500—750	330—500	530—1100	1300—2000

Особенности тепловой работы

Согласно классификации электрических печей (см. гл. 42) дуговые сталеплавильные печи являются печами-теплообменниками с радиационным режимом тепловой работы, поскольку энергетические условия на границе зоны технологического процесса, т. е. на зеркале ванны жидкого металла, создают электрические дуги и огнеупорная футеровка рабочего пространства. Особенность радиационного теплообмена связана с тем, что его условия определяются не только теплотехническими свойствами внутренней поверхности футеровки — степенью черноты, температурой T_{ϕ} (см. рис. 43-2) и коэффициентом развития футеровки, но и условиями существования дуг — длина дуги, электродинамическое выдувание из под торца электрода, экранирование кусками шихты в период плавления или слоем шлака в окислительный и восстановительный периоды плавки, химический состав и температура металла и шлака, влияющие на электрофизические условия формирования дугового разряда на переменном токе.

Другая особенность связана с влиянием на эксцентриситет излучения дуг параметров электрического режима печи и диаметра электродов $D_{эд}$ в виде соотношения $D_{эд}/l_d$ или $D_{эд}/U_d$, где l_d — длина дуги, зависящая от напряжения дуги U_d . Поэтому в дуговых сталеплавильных печах возможно создание направленного радиационного теплообмена — прямого и косвенного.

Режим прямого направленного теплообмена возникает, когда короткие дуги при низких степенях напряжения горят под толстым слоем шлака в вогнутом мениске на зеркале жидкометаллической ванны и передают тепловой поток излучения металлу и шлаку вблизи электродов; нагрев металла происходит за счет внутренней теплопередачи теплопроводностью и электродинамической конвекцией; шлак нагревается за счет более нагретого металла; свободное излучение дуги на футеровку практически отсутствует и

$$T_{\text{ф}} < T_{\text{ш}} < T_{\text{м}}. \quad (43-1)$$

Такой режим способствует повышению стойкости футеровки, но затягивает расплавление шихты на откосах ванны в конце периода плавления, создает градиент температуры по радиусу шлаковой ванны и затрудняет проведение технологического процесса плавки. При недостаточной мощности дуг при условии (43-1) возможно даже снижение температуры жидкого металла.

Режим косвенного направленного теплообмена имеет место при работе печи на длинных дугах, на высоких степенях напряжения, с малым количеством шлака, когда преобладает свободное тепловое излучение дуг в рабочее пространство печи, на футеровку стен и свода. Нагретая до 1900—2100 К футеровка (см. рис. 43-2) становится мощным излучателем для зеркала шлаковой ванны; металл нагревается частично от горячих зон под дугами за счет теплопроводности и электродинамической конвекции и в основном теплопроводностью через шлаковую ванну, т. е.

$$T_{\text{ф}} > T_{\text{ш}} > T_{\text{м}}. \quad (43-2)$$

Условие (43-2) менее благоприятно для стойкости огнеупорной футеровки, но способствует более равномерной теплопередаче на поверхность ванны, повышению температуры и химической активности шлака. Если $T_{\text{ф}} > T_{\text{м}}$, металл получает дополнительное количество тепла от футеровки и коэффициент теплоусвоения в виде отношения мощности, израсходованной на нагрев металла, к мощности, введенной в печь, может быть больше единицы.

Рассмотренные режимы тепловой работы зависят от электрических параметров печи — степени вторичного напряжения и силы тока, которые при заданных значениях активного и индуктивного сопротивления токоподвода определяют напряжение и длину дуги. Поэтому управление электрическим режимом дуговых сталеплавильных печей связано с регулированием температуры футеровки $T_{\text{ф}}$ по верхнему [условие (43-2)] и нижнему [условие (43-1)] пределам.

В условиях радиационного режима тепловой работы дуговых сталеплавильных печей большое значение имеет расположение дуг в рабочем пространстве, определяемое взаимным расположением электродов (рис. 43-3). В круглых трехфазных дуговых печах три электрода располагают по вершинам равностороннего

треугольника. Такое расположение характеризуют диаметром описанной окружности, называемым диаметром распада электродов D_p .

Примерные значения плотности тепловых потоков излучения на футеровку дуговых сталеплавильных печей в различные периоды плавки приведены в табл. 43-2.

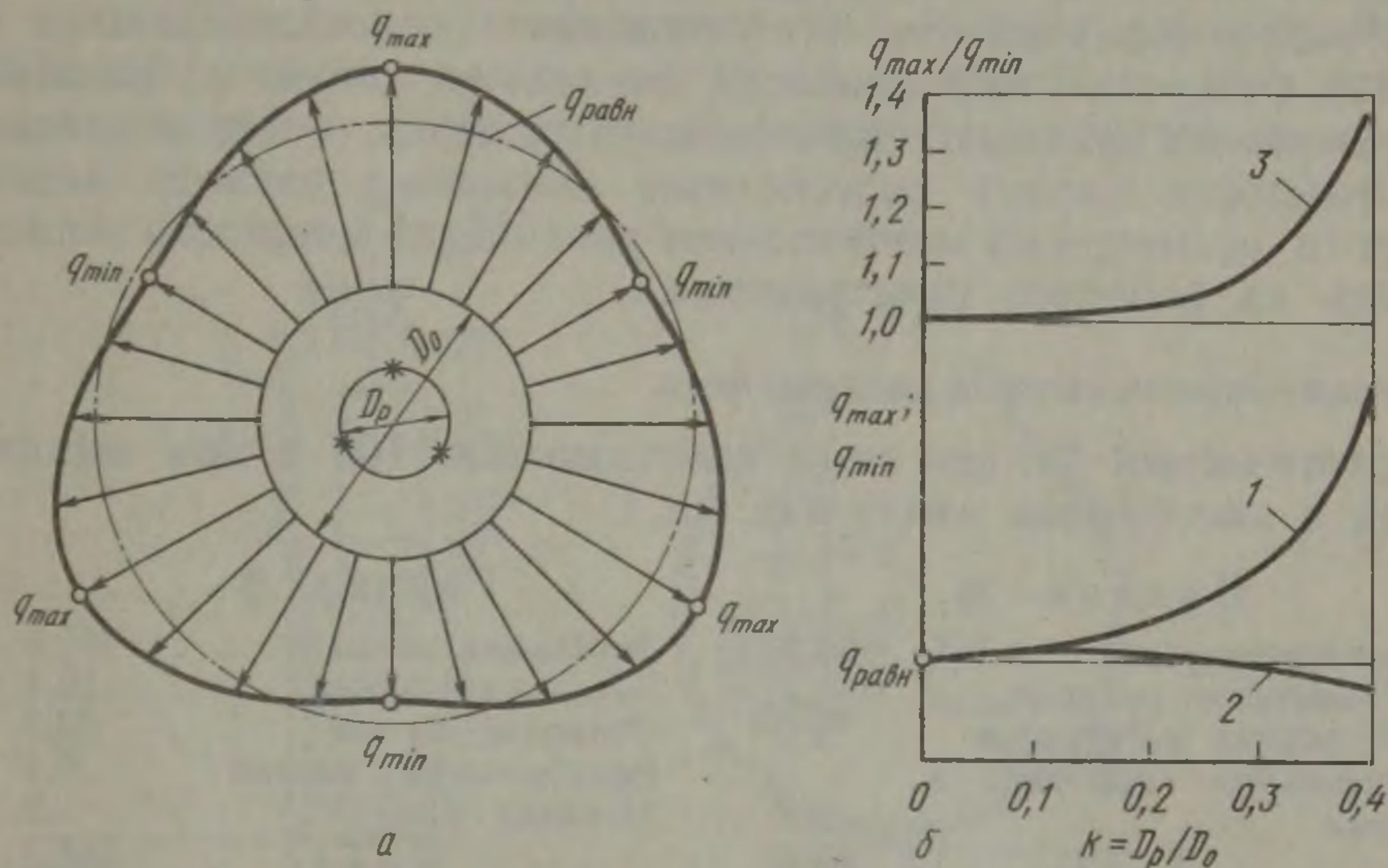


Рис. 43-3. Эпюра (а) и сравнение (б) облученности стен:
1 — q_{max} ; 2 — q_{min} ; 3 — q_{max}/q_{min}

Стойкость футеровки подины составляет 1200—5000 плавов (один-два года); стойкость футеровки стен из термостойкого магнезитохромитового кирпича типа МХСП снижается с увеличением вместимости печей:

Вместимость, т	До 12	25—50	100—200
Стойкость, число плавов	350—1650	110—190	60—115

Купольный свод (см. рис. 43-1) круглой печи выкладывают в сводовом водоохлаждаемом кольце в один слой магнезитохроми-

Т а б л и ц а 43-2. Тепловая нагрузка футеровки дуговых сталеплавильных печей

Период плавки	Тепловая нагрузка, кВт/м ²		
	Свода $q_{св}$	Стен	
		q_{max}	q_{min}
Конец периода плавления	100—130	170—220	140—185
Окислительный период	70—100	100—140	85—120
Восстановительный период (выдержка металла)	40—50	70—90	60—75

товым, динасовым или высокоглиноземистым кирпичом без тепловой изоляции. Толщина футеровки свода может быть 230—460 мм. Стойкость кирпичного свода составляет 50—250 плавов, уменьшаясь с увеличением вместимости печей. Освоение конструкции водоохлаждаемых металлических сводов позволит довести стойкость до 1500—2000 плавов и более, т. е. до одного года.

Необходимо отметить, что применение водоохлаждаемых элементов футеровки экономически оправдано только на мощных и сверхмощных дуговых сталеплавильных печах, когда сокращение длительности плавки способствует снижению расхода электроэнергии, несмотря на значительное увеличение мощности тепловых потерь из рабочего пространства.

Технико-экономические показатели

Энергетический баланс печи вместимостью 100 т при выплавке стали с кислородом имеет вид:

Приход, %:		Расход, %:	
Электроэнергия	66,9	Энтальпия металла	51,9
Химические реакции	31,2	Энтальпия шлака	10,4
Энтальпия материалов	1,6	Тепловые потери	29,2
Энтальпия кислорода и воздуха	0,3	Электрические потери	6,6
		Невязка	1,9
	<u>Всего</u>		<u>Всего</u>
	100,0		100,0

Для современных печей электрический к. п. д. η_e составляет 0,90—0,95, тепловой к. п. д. $\eta_T \approx 0,65—0,70$, общий к. п. д. 0,55—0,65, удельный расход электроэнергии на расплавление твердой шихты $W_{2y} \approx 400—650$ кВт·ч/т, на всю плавку $W_y \approx \approx 450—700$ кВт·ч/т при различной технологии выплавки стали.

Повышение технико-экономических показателей действующих дуговых сталеплавильных печей возможно за счет совершенствования технологии выплавки стали и применения внепечных методов обработки стали в ковше, интенсификации тепловой работы печи, особенно в период плавления. Такими мероприятиями может быть предварительный подогрев шихты (до 900—1100 К), применение топливно-кислородных горелок (для ускорения нагрева холодной шихты в печи), ускорение теплообменных процессов в жидком металле путем электромагнитного перемешивания, сокращение простоев электропечной установки.

2. Дуговые вакуумные печи

Общая характеристика

В дуговых вакуумных печах (рис. 43-4) электрическая дуга постоянного тока горит в разреженных газах и парах переплавляемого металла между электродом — катодом и жидкометаллической ванной — анодом, расположенными в герметичном рабочем пространстве. Рабочее пространство формирует водоохлаждаемая

стальная вакуумная камера, в которой с помощью системы вакуумных насосов создают давление порядка 0,01—1 Па.

Электрод изготовляют из переплавляемого металла (так называемый расходуемый электрод) или из тугоплавких электропроводных материалов — вольфрама, графита, карбидов (так называемый нерасходуемый электрод). Во втором случае переплавляемый кусковой материал засыпают в зону из питающего бункера.

Жидкий металл накапливается в водоохлаждаемом тигле с гарнисажем для фасонного литья или формируется в слиток

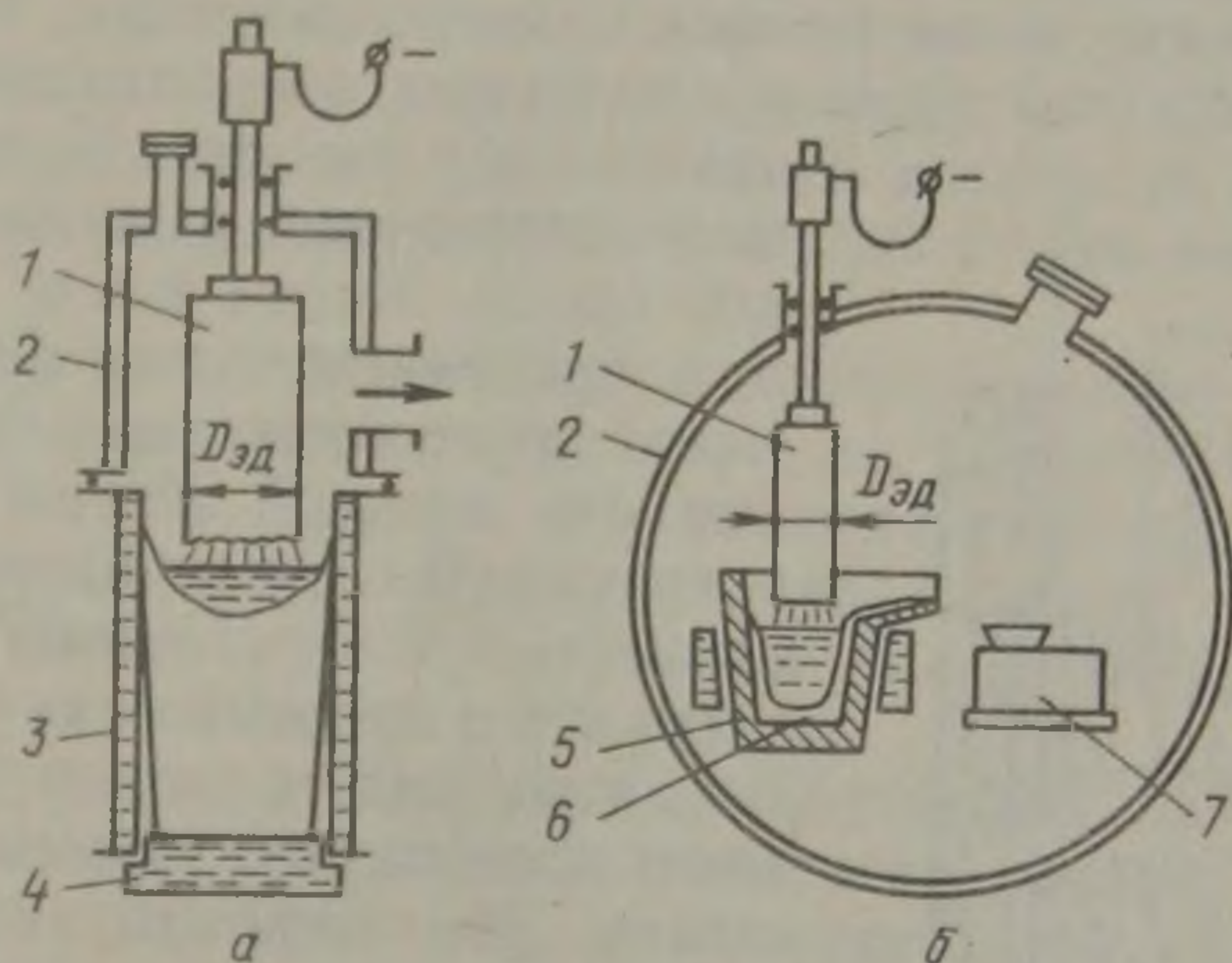


Рис. 43-4. Схемы дуговых вакуумных печей:

а — для получения слитков в кристаллизаторе; *б* — для плавки в тигле с гарнисажем; 1 — электрод (расходуемый или нерасходуемый); 2 — вакуумная камера; 3 — кристаллизатор; 4 — поддон; 5 — тигель; 6 — гарнисаж; 7 — литейная форма

в водоохлаждаемой изложнице — кристаллизаторе. В кристаллизаторе с неподвижным поддоном слиток наплавляется снизу вверх, при этом длина кокиля кристаллизатора должна быть больше высоты слитка. В таких кристаллизаторах аэродинамическое сопротивление кольцевого радиального зазора создает перепад давлений между зоной дуги и вакуумной камерой и затрудняет рафинирование металла. Поэтому для рафинирующего переплава химически активных металлов применяют кристаллизаторы с подвижным поддоном, чтобы по мере наплавления слиток вытягивать вниз, а уровень жидкого металла поддерживать вблизи верхнего фланца короткого кристаллизатора в зоне рабочего давления.

Необходимо отметить, что в обоих случаях слиток формируется в результате направленной кристаллизации, что является важным технологическим свойством вакуумно-дугового переплава.

Особенностью эксплуатации дуговых вакуумных печей является повышенная взрывоопасность из-за возможного попадания воды из системы охлаждения кристаллизаторов в зону дуги. Поэтому соотношение диаметров электрода $D_{эд}$ и кристаллиза-

тора $D_{кр}$, определяющее величину кольцевого радиального зазора Δ , принимают равным 0,7—0,8, чтобы $\Delta > l_d$, где l_d — длина дуги. Печи, переплавляющие химически активные металлы (титан, ниобий и др.), помещают в стальной или бетонный взрывозащитный кожух и оснащают оптическими системами дистанционного наблюдения за процессом.

Особенности тепловой работы

В дуговых вакуумных печах, являющихся согласно классификации (см. гл. 42) дуговыми печами прямого действия, теплогенерация происходит в основном на границах зоны технологического

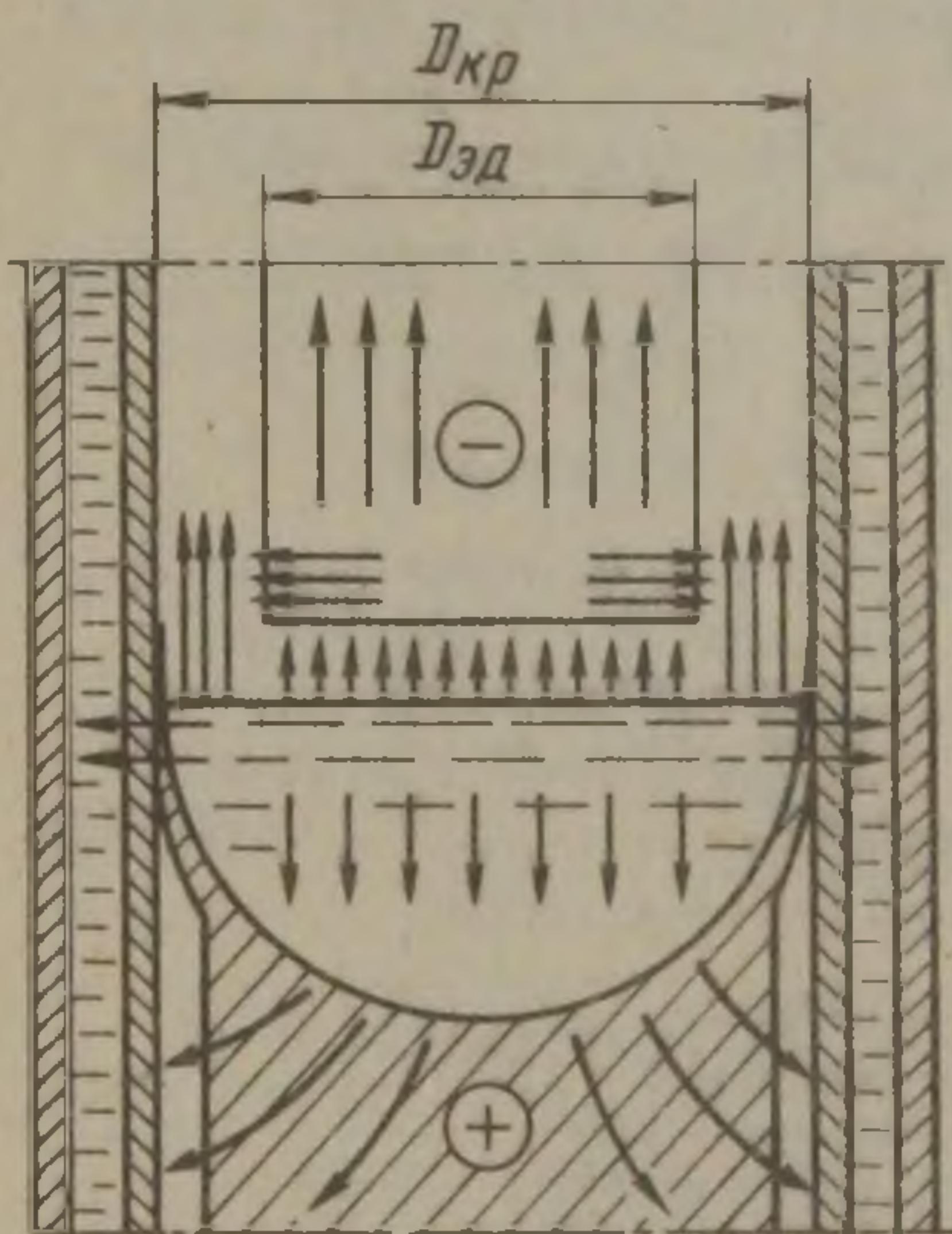


Рис. 43-Б. Схема теплообмена в рабочем пространстве дуговой вакуумной печи

процесса, т. е. на торце расходуемого электрода и на зеркале жидкой ванны. Кроме этого, в электроде при протекании тока дуги I_d имеет место дополнительная теплогенерация по закону Ленца — Джоуля, повышающая температуру электрода на 200—300 К. Поэтому можно считать, что в дуговых вакуумных печах с расходуемым электродом имеет место смешанное взаимное расположение зон технологического процесса и генерации тепла. Распределение тепла в зоне технологического процесса связано с переносом тепла теплопроводностью в расходуемом электроде как в стержне, нагреваемом с одного конца, и в ванне жидкого металла с учетом электродинамической конвекции в магнитном

поле соленоида, особенно в гарнисажных печах. Смешанный режим тепловой работы дуговых вакуумных печей, имеющих холодное охлаждение в виде водоохлаждаемых вакуумной камеры и кристаллизатора, практически имеет только задачу внутреннего теплообмена при фазовых превращениях, связанных с изменением агрегатного состояния металла, т. е. плавления на электроде и кристаллизации на слитке.

Тепло, генерируемое дуговым разрядом на катоде, расходуется на нагрев и плавление расходуемого электрода диаметром $D_{эд}$ с массовой скоростью Q_m в виде полезной мощности $P_{пол.к}$ и на компенсацию тепловых потерь излучением с боковой поверхности электрода при температуре T_z в виде потока $\Phi_{изл.к}$ (рис. 43-5). Торцы электрода воспринимают тепловые потоки плотностью 1—10 МВт/м², которые создают значительный аксиальный градиент температуры. Нагрев электрода до температуры 1000 К и выше имеет место на ограниченной длине, не более одного-двух диаметров электрода $D_{эд}$. При вакуумно-дуговом

переплаве с постоянной массовой скоростью Q_m на рабочем этапе плавки все тепловые процессы приобретают квазистационарный режим. Аксиальное температурное поле расходуемого электрода (вдоль оси z) описывают эмпирическим уравнением

$$T_z = T_{\text{в}} + (T_{\text{к}} - T_{\text{в}}) \exp(-vz/a), \quad (43-3)$$

где $T_{\text{в}} \approx 500-600$ К — установившаяся температура нагрева в результате теплогенерации по закону Ленца—Джоуля; $T_{\text{к}}$ — температура торца электрода, при которой капли жидкого металла стекают с электрода в ванну; $v = Q_m / (d \cdot 0,785 D_{\text{эд}}^2)$ — линейная скорость плавления расходуемого электрода; a и d — коэффициент температуропроводности и плотность материала электрода.

В результате дополнительной теплогенерации на аноде происходит перегрев жидкого металла на $200-500$ К с затратой полезной мощности $P_{\text{пол. А}}$ и компенсация тепловых потерь излучения с зеркала ванны $\Phi_{\text{изл. А}}$ и теплопередачи через жидкую ванну $\Phi_{\text{ж}}$. Часть потока излучения $\Phi_{\text{А-к}}$ попадает на торец электрода и способствует его нагреву.

Вакуумно-дуговая плавка в гарнисажном тигле происходит в условиях неустановившегося теплового режима, чтобы массовые скорости плавления $Q_{m \text{ пл}}$ и кристаллизации $Q_{m \text{ кр}}$ были неодинаковые:

$$Q_{m \text{ пл}} > Q_{m \text{ кр}}, \text{ причем } Q_{m \text{ кр}} \rightarrow 0.$$

Плотность тепловых потоков, проходящих через зеркало ванны, достигает при плавке титана $1,5-1,8$ МВт/м², при плавке ниобия и молибдена $4,0-5,5$ МВт/м². В таких условиях необходимую толщину гарнисажа $2-6$ см обеспечивают интенсивным охлаждением медного или графитового тигля.

Технико-экономические показатели

Дуговые вакуумные печи являются теплотехнически несовершенными, взрывоопасными агрегатами с достаточно высокими эксплуатационными расходами; вакуумно-дуговой переплав — сравнительно дорогой рафинирующий процесс (в то же время единственный технологический процесс получения химически активных и тугоплавких металлов в компактном виде). Тепловой к. п. д. $\eta_{\text{т}}$, получаемый из теплового баланса мощности печи с кристаллизатором в виде отношения

$$\eta_{\text{т}} = (P_{\text{пол К}} + P_{\text{пол А}}) / P_{\text{д}} = i Q_{m \text{ пл}} / P_{\text{д}},$$

представляет собой практически постоянную для данного металла величину, составляющую при вакуумно-дуговом переплаве стали $0,5-0,55$.

Для гарнисажной печи η_T определяют из теплового баланса энергии за плавку $t_{пл}$ по энтальпии сливаемого жидкого металла массой $m_{сл}$

$$\eta_T = im_{сл}/(P_d t_{пл}).$$

Эффективность гарнисажной плавки зависит от соотношения масс сливаемого $m_{сл}$ и наплавленного $m_{пл}$ металла за время $t_{пл}$. Это соотношение составляет 0,65—0,75 при формировании гарнисажа в новом тигле и 0,90—0,95 на последующих плавках. Значение теплового к. п. д. при плавке титана достигает 0,25—0,45; ниобия — 0,20—0,25; молибдена — 0,15—0,25.

Электрический к. п. д. $\eta_{э}$, учитывающий электрические потери в токоподводе и в электропреобразователе, составляет 0,7—0,8, где большее значение при работе на полупроводниковых выпрямителях. Поэтому общий к. п. д. $\eta_0 = \eta_{э}\eta_T$ невысокий.

Удельный расход технологической энергии W_y в 2—4 раза превышает удельную энтальпию i переплавляемого металла и составляет при плавке стали 0,7—1 кВт·ч/кг; титана 1,7—2,3; молибдена 2,4—4,6 и т. д. Кроме этого, при работе дуговых вакуумных печей расходуют значительное количество силовой (технологической) электроэнергии на привод вакуумных и водяных насосов, механизма передвижения электрода и др. Затраты на электроэнергию при вакуумно-дуговом переплаве достигают 15—25 % от всех расходов по переделу.

3. Рудовосстановительные печи

Общая характеристика

Рудовосстановительные печи весьма разнообразны по технологическому назначению, принципу теплогенерации, величине электрической и тепловой мощности, конструктивному исполнению. Технологические процессы могут быть непрерывные (восстановительные) и периодические (рафинировочные). При ведении непрерывного процесса электроды постоянно погружены в шихту, шихту подают в печь непрерывно по мере ее проплавления, а получаемые продукты сливают из печи порциями через летку. Рафинировочные процессы обычно ведут с проплавлением шихты: в начале плавки электроды погружены в шихту, а затем по мере проплавления шихты их поднимают, электрические дуги между электродами и расплавом горят открыто, обеспечивая высокую температуру реакционной зоны и колошника печи. После окончания процесса металл и шлак полностью сливают из печи путем ее наклона.

Различные физико-химические условия технологических процессов, количества и электрофизические свойства шихтовых материалов и продуктов вызывают разнообразие теплоэнергетических процессов. Профессор М. С. Максименко предложил класси-

фикацию на основе распределения тепловой энергии, генерируемой при прохождении электрического тока в различных зонах (горизонтальных) ванны:

- а) в электроде по закону Ленца—Джоуля — $P_{эд}$;
- б) в контакте между электродом и шихтой или шлаком (за счет электрической дуги) — $P_{д}$;
- в) в шлаке, расплаве или нагретой электропроводной шихте по закону Ленца—Джоуля — $P_{ш}$;
- г) в металле или другом полезном продукте по закону Ленца—Джоуля — $P_{м}$.

Все рудовосстановительные процессы по теплоэнергетике разделяют следующим образом:

- 1) процессы, требующие концентрации энергии в реакционной зоне («тигле»), т. е. печь работает с закрытыми дугами и холодным колошником и

$$P_{ш} > (P_{эд} + P_{д} + P_{м}), \quad (43-4)$$

как, например, при выплавке ферросилиция, углеродистого ферромарганца, чугуна и др.;

- 2) процессы, для которых необходимо выделение энергии в объеме шлака, т. е. печь работает с закрытыми дугами и горячим колошником и

$$P_{ш} \gg (P_{эд} + P_{д} + P_{м}), \quad (43-5)$$

причем практически $P_{д} \approx 0$, как, например, при выплавке углеродистого феррохрома, никелевого штейна, при возгонке фосфора и др.;

- 3) процессы, требующие выделения энергии на поверхности ванны, т. е. печь работает с открытыми дугами и горячим колошником и

$$P_{д} > (P_{эд} + P_{ш} + P_{м}) \quad (43-6)$$

в случае периодических процессов производства металлического марганца, безуглеродистого феррохрома, при обеднительной плавке штейнов и др.

Таким образом, печи типа 3 — дуговые, типа 2 — сопротивления, типа 1 — смешанного нагрева.

Конструкция рудовосстановительной печи (рис. 43-6) включает кожух ванны, футерованный различными огнеупорными материалами; механизм вращения или наклона ванны; водоохлаждаемый металлический или бетонный свод для закрытой печи; электроды с механизмом передвижения и токоподводом, системы загрузки шихты, улавливания и очистки печных газов.

По конструктивному исполнению рудовосстановительные печи могут быть с круглой, треугольной, прямоугольной или кольцевой ванной — стационарной, вращающейся вокруг вертикальной оси или наклоняющейся, открытые или закрытые сводом; одно-

фазные с одним или двумя электродами или трехфазные с тремя, шестью или двенадцатью электродами — угольными, графитированными или самообжигающимися.

В настоящее время работают рудовосстановительные печи для выплавки ферросилиция и углеродистого феррохрома с электрической мощностью до 105 МВ·А (тепловая мощность 65 МВт),

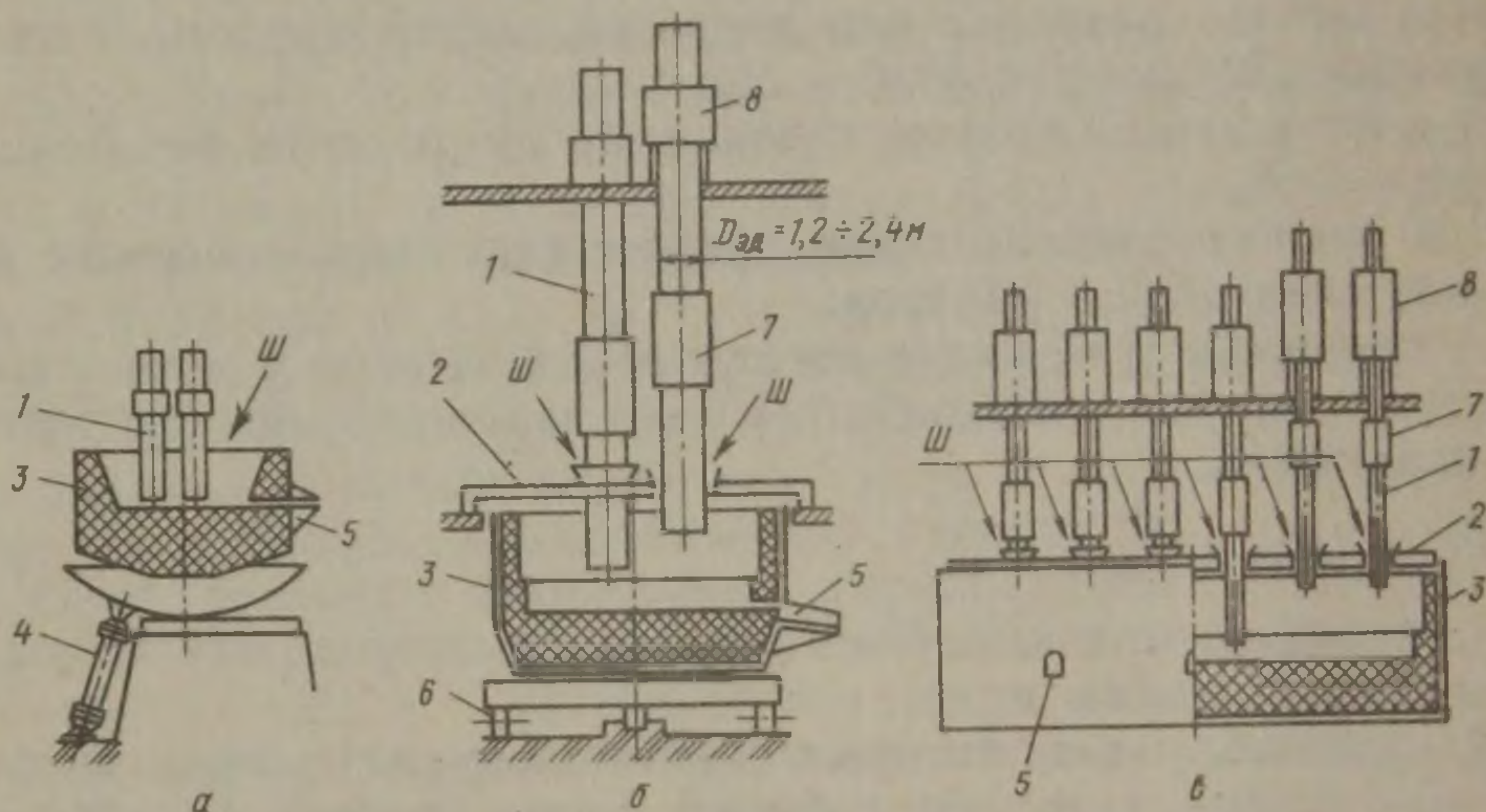


Рис. 43-6. Схемы рудовосстановительных печей:

a — рафинировочной круглой открытой типа РКО; *б* — круглой закрытой типа РКЗ; *в* — прямоугольной закрытой типа РПЗ; 1 — электроды; 2 — свод; 3 — ванна; 4 — механизм наклона; 5 — летка; 6 — механизм вращения; 7 — система токоподвода; 8 — механизм подъема; Ш — система загрузки шихты

ферромарганца и силикомарганца — 80 МВ·А (58 МВт), карбида кальция — 67 МВ·А (60 МВт); для возгонки фосфора — 80 МВ·А (72 МВт) и т. д.

Особенности тепловой работы

Рудовосстановительные печи в целом являются печами-теплогенераторами, поскольку теплогенерация происходит в объеме зоны технологического процесса. Однако состояние зоны технологического процесса может быть, как уже отмечалось, различным: твердые материалы в сыпучем состоянии, жидкие продукты, газовая фаза. Все это влияет на электрический режим тепловой работы таких печей.

В печах смешанного нагрева закрытая мощная дуга образует высокотемпературный «тигель» с температурой стенок 2100—2300 К в зависимости от температуры плавления шихтовых материалов. Внутренние стенки «тигля», состоящие из жидкой и полужидкой магмы, обогреваются лучистой энергией дугового разряда и в результате теплогенерации при протекании электрического тока с электрода на электрод через нагретую выше 1300 К шихту.

Часть тепла, получаемого стенками «тигля», расходуется в близлежащих слоях шихтовых материалов на эндотермические вос-

становительные реакции, остальное тепло передается в глубь шихты теплопроводностью. Образующиеся в «тигле» печные газы и пары различных оксидов, металлов и металлоидов, имеющих температуру 2200—2500 К, проходят вверх ванны через слой (толщиной 0,5—1,5 м) шихтовых материалов, также подготавливая их к плавлению и восстановлению в нижележащих слоях. При этом печные газы и пары выходят на колошник печи с температурой 500—1300 К.

Технико-экономические показатели

Тепловой к. п. д. η_T зависит от конструкции печи и технологического процесса, а электрический к. п. д. η_E — от мощности трансформатора и конструкции токоподвода:

	η_T	η_E	η_0
Рафинировочная печь (мощность 3,5 МВ·А)	0,5	0,8	0,40—0,45
Бесшлаковый процесс (мощность 21 МВ·А)	0,55—0,60	0,85—0,90	0,45—0,55
Шлаковый процесс (мощность 72 МВ·А)	0,5 (0,75)	0,95	0,5 (0,7)

В скобках показана эффективность утилизации энергии колошниковых газов на закрытых рудовосстановительных печах.

Удельный расход электроэнергии в большой степени зависит от тепловых эффектов эндотермических восстановительных процессов:

Вы плавка	Удельный расход, кВт·ч/кг
Выплавка:	
ферросилиция марки ФС 65	7,0—7,3
кристаллического кремния	12—13
безуглеродистого феррохрома	3,3—3,5
чугуна	2,2—2,6
Получение медно-никелевого штейна	0,7—1,0
Передел NiO на анодный никель	1,5—2,0

4. Плазменные печи

Общая характеристика

Работа плазменных печей (установок плазменного нагрева) основана на использовании газоразрядной плазмы в качестве теплоносителя. Достаточная электрическая проводимость плазмы обеспечивает преобразование электрической энергии в тепловую за счет токов проводимости $I_{пр}$, подводимых через электроды (кондукционный способ) или возбуждаемых переменным электромагнитным полем (индукционный способ). Поскольку формирование плазмы связано с эндотермическими процессами диссоциации и ионизации газов, плазма характеризуется достаточно высоким энергосодержанием (см. т. I), позволяющим использовать ее в энергоемких пиromеталлургических процессах, в том числе

для плавки высоколегированных сталей и сплавов, прямого восстановления металлов из руд и получения ферросплавов.

Плазматрон — устройство для преобразования электрической энергии источника питания в тепловую энергию струи (потока) плазмы, т. е. плазменный генератор. В зависимости от способа преобразования электрической энергии в тепловую различают плазматроны: дуговые, индукционные (высокочастотные) и электронные (сверхвысокочастотные).

Наибольшее распространение получили дуговые плазматроны, в которых возможно достижение температуры плазмы порядка 10^4 К путем сжатия столба дуги стенками канала (гидродинамическое сжатие), газовым потоком (аэродинамическое сжатие) или внешним магнитным полем (электромагнитное сжатие). Для получения дугового разряда можно применять как постоянный, так и переменный ток. Стремясь получить стабильную работу плазматрона, чаще всего используют постоянный ток (во избежание обрыва дуги при переменном токе). Различают плазматроны с независимой дугой (косвенного действия) и с зависимой дугой (прямого действия). Выбор схемы работы плазматрона зависит от назначения печи и необходимых требований по эффективности ее работы.

Принцип работы плазматронов косвенного действия

Плазматроны косвенного действия используют в тех случаях, когда замкнуть электрическую цепь между электродом плазматрона и нагреваемым материалом нельзя. Схема такого плазматрона показана на рис. 43-7. Вокруг водоохлаждаемого катода 1 находится водоохлаждаемый корпус 3. В щель между катодом и корпусом подают плазмообразующий газ 2. Корпус отделяют от водоохлаждаемого сопла—анода 6 изоляционной вставкой 4. Катод и анод соединяют с электрической сетью 9. Между катодом и анодом зажигается электрическая дуга 5. Дуга ионизирует плазмообразующий газ главным образом путем термической ионизации. Конструктивное оформление катодно—анодного участка выполнено так, что дуга сжимается относительно холодными слоями газа и собственным магнитным полем дуги. Это противодействует расширению площади дуги (как это наблюдается при свободно горящей дуге) и повышает плотность тока в дуге.

Все элементы плазматрона охлаждаются водой. Поэтому часть тепла, которое выделяется в горящей дуге, передается системе охлаждения, вследствие чего к. п. д. η плазматрона сравнительно невысок. Его можно повысить расходом плазмообразующего газа Q_0 (рис. 43-8), однако при этом падает средняя температура струи плазмы, выходящей из сопла плазматрона. Среднюю температуру плазмы можно повысить увеличением подводимой мощности P (рис. 43-9). Нелинейность повышения температуры при этом, в первую очередь, объясняется повышением теплопроводности и излучения столба плазмы.

Одним из недостатков плазматронов с независимой дугой является высокая тепловая нагрузка в месте анодного пятна, что может привести к разрушению материала анода. Поэтому иногда на анод устанавливают магнитную катушку, которая своим полем вращает анодное пятно по поверхности анодного сопла, что увеличивает время службы плазматронов.

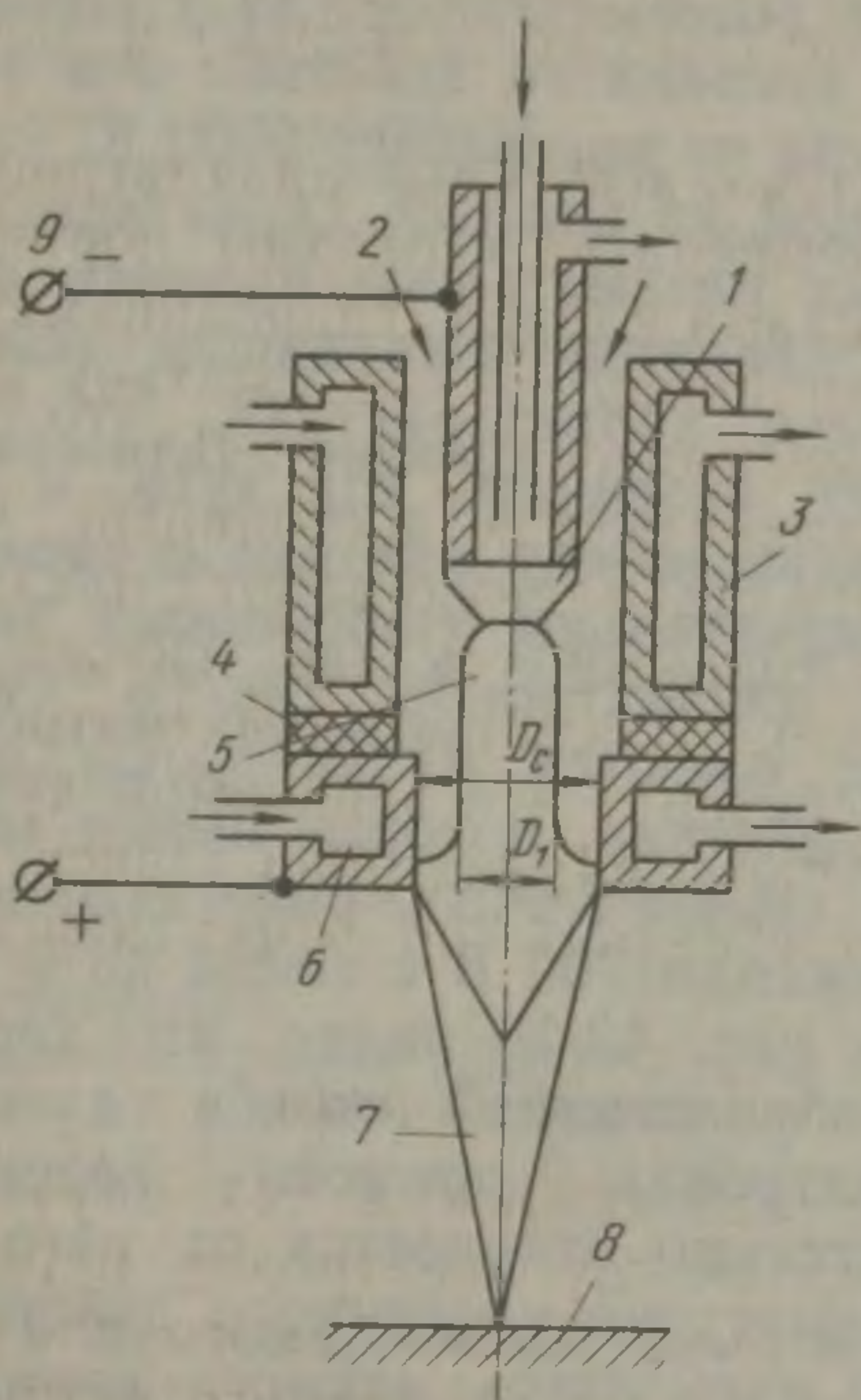


Рис. 43-7. Плазматрон с независимой дугой (косвенного действия): 1 — катод; 2 — плазмообразующий газ; 3 — водоохлаждаемый корпус; 4 — электрическая дуга; 5 — изоляционная вставка; 6 — водоохлаждаемый анод; 7 — плазменная струя; 8 — нагреваемый материал; 9 — электрическая сеть

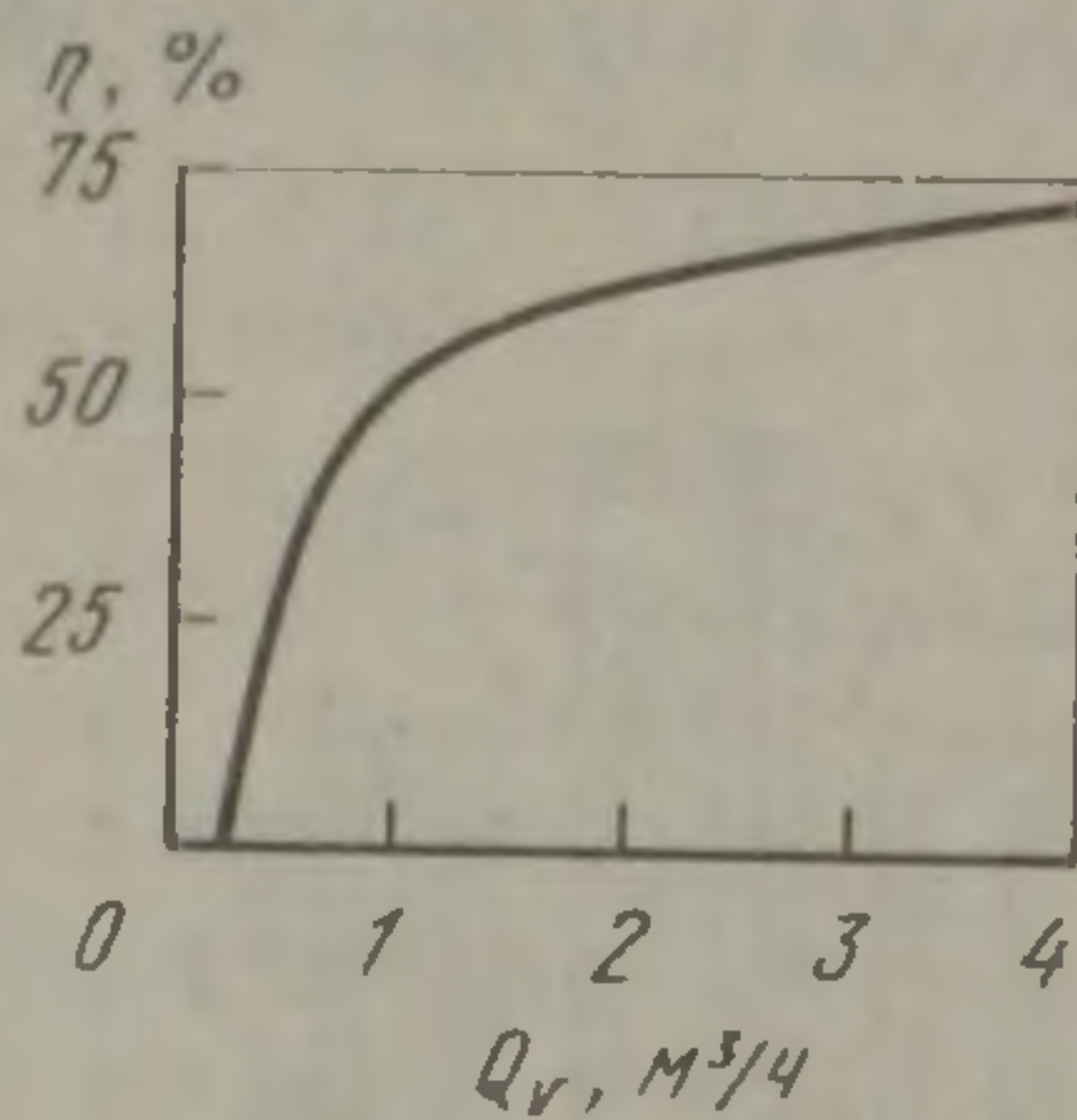


Рис. 43-8. Зависимость к. п. д. плазматрона косвенного действия от расхода аргона

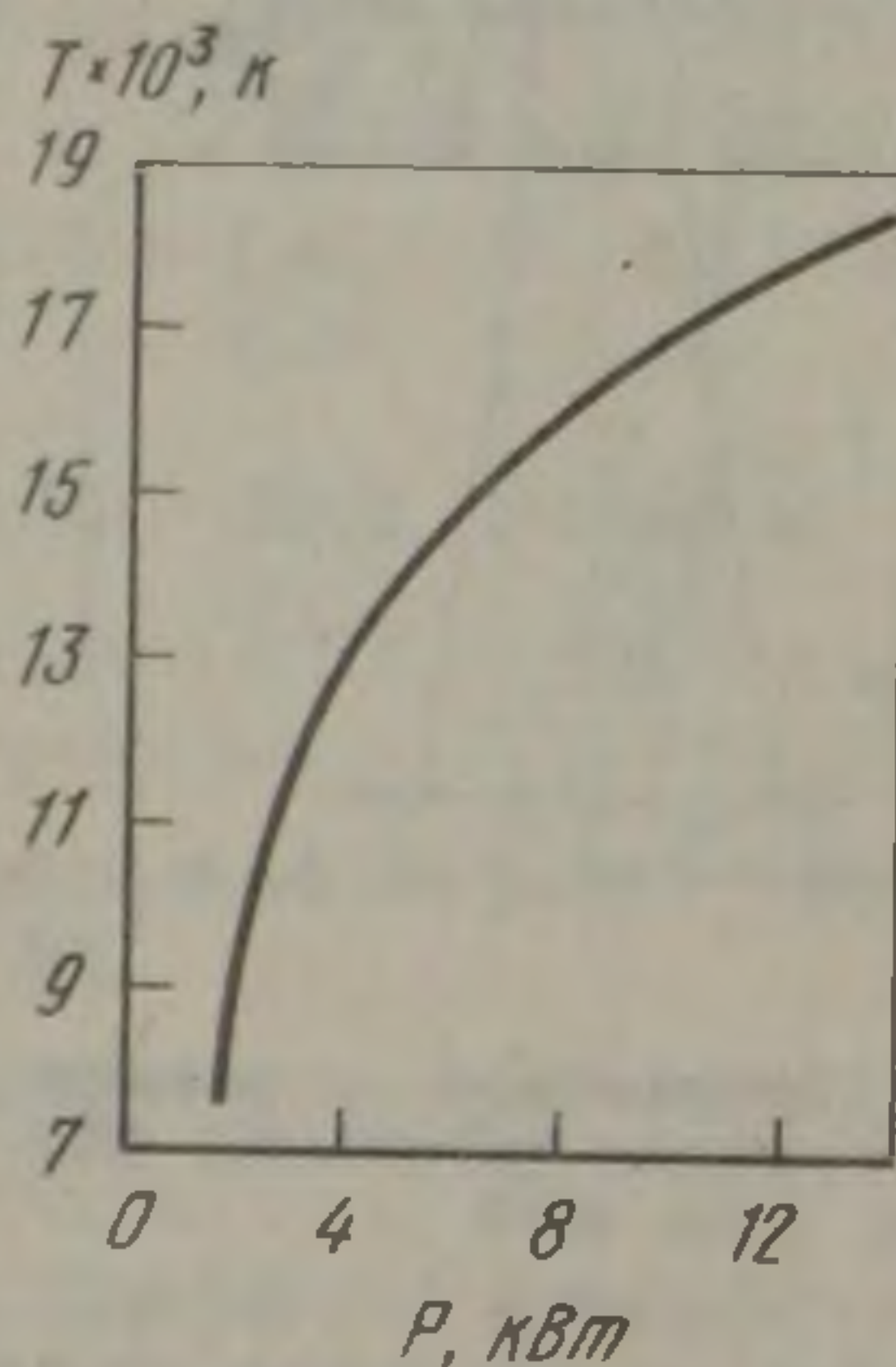


Рис. 43-9. Зависимость средней температуры плазменной струи от подводимой мощности

Таким образом, для правильного конструирования плазматронов необходимо знать их вольт-амперные характеристики, от которых зависят размеры рабочих частей плазматрона, вид и расход плазмообразующего газа, длину дуги и другие параметры.

Принцип работы плазматронов прямого действия

В настоящее время для металлургических целей, особенно для переплава металла, применяют мощные плазматроны, работающие с зависимой дугой (рис. 43-10). При помощи таких плазматронов можно достичь гораздо большей мощности, чем при использовании плазматронов косвенного действия. Надо однако учитывать, что при этом конструкция должна выдерживать более высокие тепловые нагрузки во всех основных частях плазматрона. Высокая концентрация тепловой энергии достигается дросселирова-

нием электрической дуги с помощью сопла. Сопло одновременно стабилизирует дугу. При использовании таких плазматронов 75 % тепла передается материалу электрической дугой и лишь 25 % потоком плазмы. Дросселирование столба дуги повышает плотность тока, концентрацию энергии и напряжение дуги, что в свою очередь повышает температуру выходящего из плазматрона потока плазмы до 16 000 К и выше, тогда когда у плазматрона косвенного действия эта температура не превышает 5500 К.

Одной из важных характеристик мощных плазматронов прямого действия является восходящая вольт-амперная характеристика, что позволяет повышать ток дуги и напряжение между катодом и анодом. Это значительно увеличивает мощность плазматронов такого типа. Сейчас имеются плазматроны прямого действия, которые имеют мощности свыше 6 МВт, работающие на напряжении 700 В с током до 9 кА.

Из рис. 43-10 видно, что характер образования столба дуги в плазматронах прямого действия значительно отличается от него же в плазматроне косвенного действия. Столб дуги здесь намного длиннее, что существенно влияет на распределение напряжения. Из рис. 43-10 также видно, что столб дуги в сопле

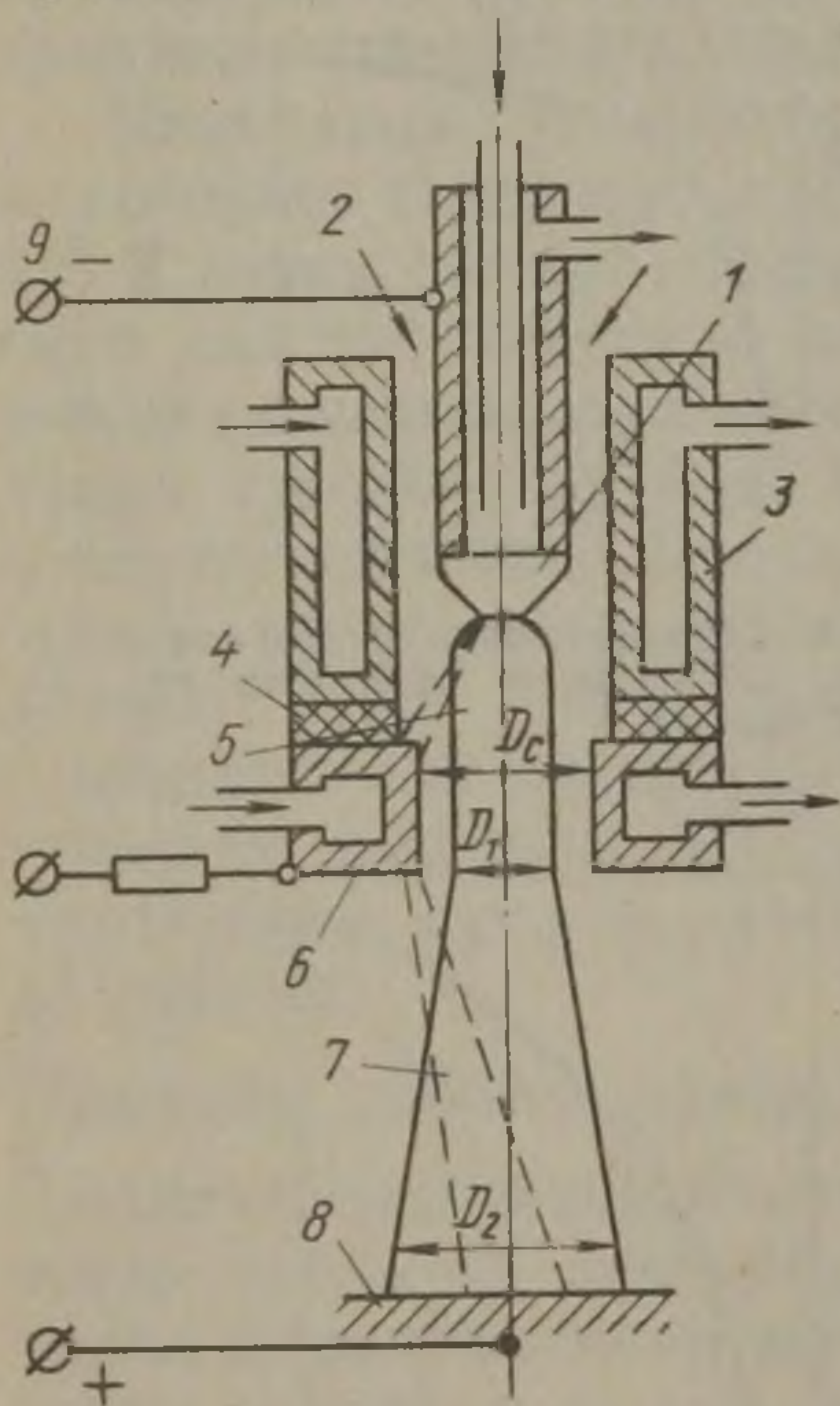


Рис. 43-10. Плазматрон с зависимой дугой (прямого действия), обозначения см. рис. 43-7

изолирован от хорошо проводящего материала сопла лишь тонким слоем газа. Хотя этот слой газа намного холоднее, чем ионизированная плазма, он, как изоляция, весьма ненадежен. Из этого следует, что надо исключить возможность раздвоения дуги при пробое, когда образуются дуги между катодом и соплом, а также между соплом и анодом. Пробои и последующее раздвоение дуги нарушают режим работы, являются опасными для стойкости элементов плазматрона и снижают мощность. Поэтому основным требованием при эксплуатации плазматронов прямого действия является исключение пробоев.

Плазмообразующие газы

В металлургической практике могут использоваться такие инертные плазмообразующие газы как аргон, азот, водород, гелий, характеристики которых представлены в табл. 43-3.

Из табл. 43-3 следует, что состав плазмообразующей смеси сильно влияет на энергетические параметры электрического разряда и плазменной струи. Кроме того необходимо учитывать хими-

Т а б л и ц а 43-3. Характеристики плазмообразующих газов

Параметры	Плазмообразующие газы			
	аргон	азот	водород	гелий
Молекулярная (атомная) масса	39,940	28,016	2,016	4,002
Плотность, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$, при:				
нормальных условиях	1,78	1,25	0,084	0,178
$T = 10^4 \text{ К}$ и $p \sim 0,1 \text{ МПа}$	0,048	0,018	—	—
Удельная теплоемкость при нормальных условиях, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})^{-1}$	0,52	1,04	14,2	5,26
Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}\times\text{X}(\text{м}\cdot\text{К})^{-1}$ при:				
нормальных условиях	0,0163	0,0243	0,174	0,151
$T = 10^4 \text{ К}$ и $p \sim 0,1 \text{ МПа}$	0,42	2,63 *	3,45 **	2,29
Электропроводность, $\text{см}/\text{м}^{-1}$, при $T = 10^4 \text{ К}$ и $p \sim 0,1 \text{ МПа}$	3650	2740	1400	6300
Энергия диссоциации, $\text{МДж}\cdot\text{моль}^{-1}$	—	0,72	0,43	—
Потенциал ионизации, В:				
однократной	15,76	14,53	13,595	24,59
двукратной	27,7	29,6	—	54,38
Энергия ионизации, $\text{МДж}\cdot\text{моль}^{-1}$:				
однократной	1,50	1,40	1,35	2,36
двукратной	2,65	2,83	—	5,22
Энтальпия плазмы, $\text{кДж}\cdot\text{г}^{-1}$, при:				
$T = 10^4 \text{ К}$ и $p \sim 0,1 \text{ МПа}$	6,15	50,3	460,9	49,9
$T = 1,5\cdot 10^4 \text{ К}$ и $p \sim 0,1 \text{ МПа}$	34,6	121,5	1383	74,4

* Максимальное значение при $T = 7\cdot 10^4 \text{ К}$ равно $6,08 \text{ Вт}(\text{м}\cdot\text{К})^{-1}$ ** Максимальное значение при $T = 3,8\cdot 10^4 \text{ К}$ равно $13,4 \text{ Вт}(\text{м}\cdot\text{К})^{-1}$

ческое воздействие плазмообразующих газов на металл и на процесс эрозии катодного материала. Можно ожидать, что в будущем будут широко использоваться плазмообразующие смеси, которые с одной стороны энергетически более выгодны и с другой стороны менее дефицитны и более дешевы, чем атомарные газы (аргон, гелий). Из табл. 43-3 видно, что двухатомные газы имеют преимущества перед атомарными газами.

В настоящее время в основном используется два типа плазменно-дуговых печей: с огнеупорной футеровкой и с водоохлаждаемым кристаллизатором. В обоих типах плазменно-дуговых печей переплав можно осуществить в вакууме или в регулируемой газовой атмосфере.

Плазменно-дуговые печи с огнеупорной футеровкой (рис. 43-11) эксплуатируют как промышленно-производственные агрегаты (табл. 43-4). Самые крупные 35-т плазменно-дуговые печи, разработанные совместно ГДР и СССР, сооружены с использованием четырех плазматронов мощностью 6 МВт каждый. Плазматроны поставлены по бокам под наклоном. Расход аргона на все работающие плазматроны составляет $45 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($22,5 \text{ г}/\text{с}$). Расход воды

соответственно 167 м³/ч. Скорость расплавления составляет 20 000 кг/ч и расход электроэнергии на расплавление соответственно 500 кВт·ч/т. Огнеупоры выдерживают около 150 плавов

и плазматроны профилактически возобновляются через 30 ч. Печи уже несколько лет работают стабильно. Их эксплуатация протекает практически бесшумно, что значительно облегчает работу у печей. Годовая производительность 35-т печей составляет 80 000 т высоколегированной стали. На основании опыта печей вместимостью 15 и 35 т в ГДР проводились исследования с целью создания более крупных печей вместимостью 65 и 110 т.

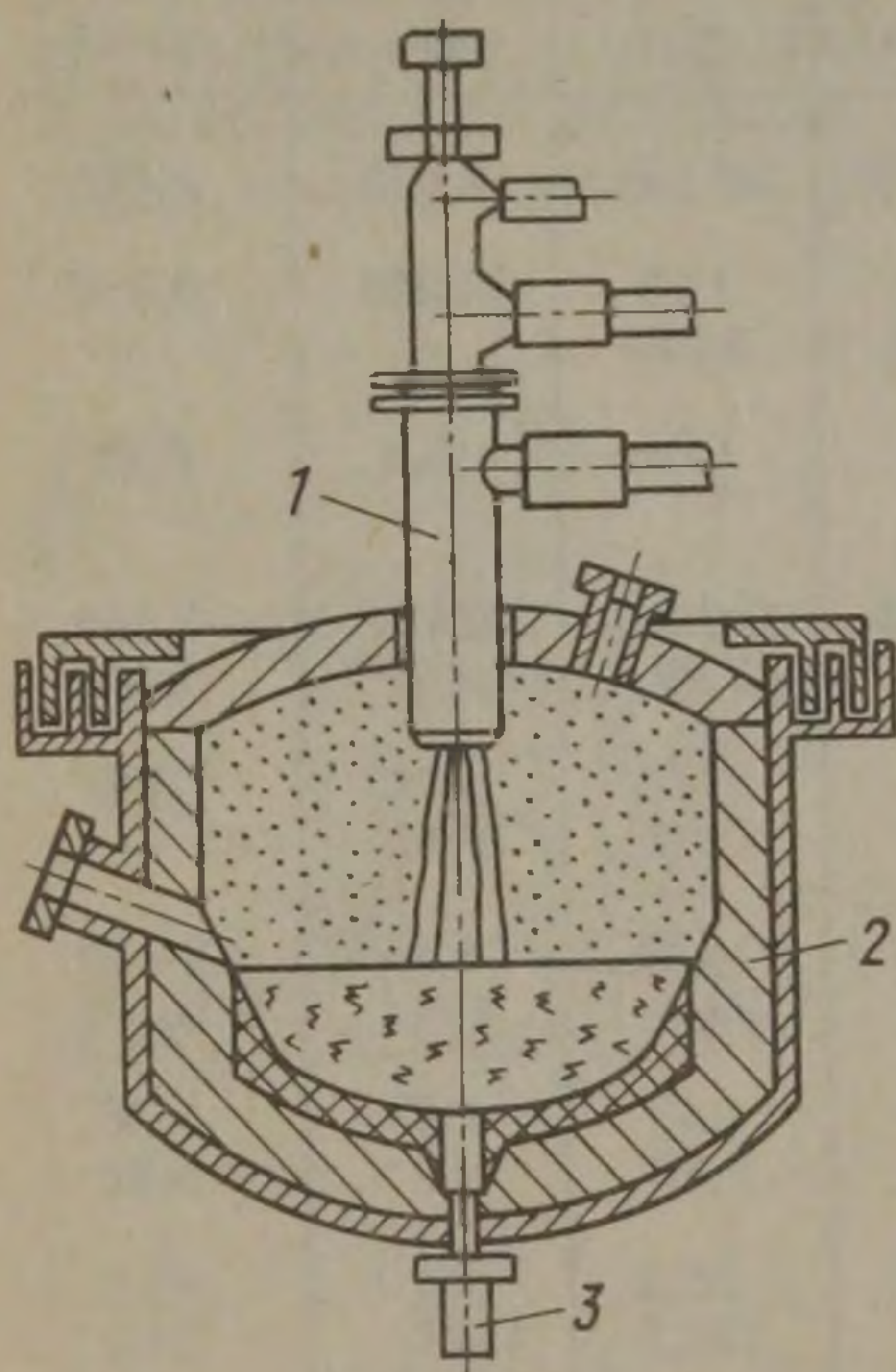


Рис. 43-11. Плазменно-дуговая печь с огнеупорной футеровкой:
1 — плазматрон; 2 — футеровка; 3 — анод

исследования тепловой работы крупных печей показали, что они работают эффективно только тогда, когда плазменная струя передает тепло в расплавленные каналы шихты, так как мощность дуги, передаваемая шихте излучением, конвекцией и теплопроводностью характеризуются следующим отношением $R_{изл} : R_k : R_T = 40 : 8 : 1$. Для обеспечения надежного зажигания плазматронов часто в крупных печах применяют дополнительную (вспомогательную) горелку.

Таблица 43-4. Характеристика плазменно-дуговых печей с керамическим тиглем

Страна	Вместимость, кг	Глубина металла, мм	Диаметр ванны, мм	Высота, мм	Мощность, кВт	Сила тока, кА	Напряжение дуги, В
СССР	300 30 000	130 —	640 —	390 —	300 До 24 000	2 —	50—150 —
ГДР	250 15 000 35 000	160 550 —	510 2900 —	470 1400 —	3×100 3×4000 4×6000	— 6 9	— До 700 До 700
США	23 136 900	— 150 —	305 560 1525	205 — 1525	— 120 —	0,5—0,6 1,5 2,5	110 — 160—177

Плазменно-дуговые печи (ПДП) с кристаллизатором

Плазменно-дуговые печи с кристаллизатором имеют большие перспективы, так как плазменный нагрев успешно применяется как при переплаве высококачественных сталей и сплавов, так и тугоплавких металлов. В водоохлаждаемом кристаллизаторе непосредственно получается слиток. Процесс хорошо регулируется в широких пределах скорости переплава, печное устройство сравнительно простое. Эти печи используют при пониженном, нормальном и повышенном давлении. Слитки производят с массой от 100 кг до 5 т (табл. 43-5). Путем изменения скорости вытягивания слитка можно создать различные условия кристаллизации и перегрева жидкого металла. Регулированием атмосферы печи легко осуществить различные технологические операции (дегазацию, азотирование и т. п.). Такие печи строят в двух вариантах: с боковой подачей шихты (рис. 43-12, а) и с центральной подачей шихты (рис. 43-12, б). Строят также печи с горизонтальными кристаллизаторами. Из-за отсутствия огнеупорной футеровки обслуживание этих печей облегчается, но энергетические показатели их хуже, чем в печах с футеровкой. К подготовке шихты здесь также предъявляются более высокие требования. Но из-за отсутствия огнеупорной футеровки можно плавить металлы, температура расплавления которых превышает температуру эксплуатации огнеупоров. Одним из преимуществ таких печей является возможность выплавления слитков весьма высокой чистоты.

Т а б л и ц а 43-5. Характеристика плазменно-дуговых печей с кристаллизатором конструкции института электросварки им. Патона

Параметры	Тип печи				
	У-365	У-487	У-400	У-500	У-555
Мощность плазматронов, кВт	240	240	240	2000	2800
Число плазматронов	6	6	6	6	6
Мощность вспомогательного оборудования, кВт	18,5	29	32	35	35
Напряжение питания, В	—	80	—	—	До 200
Максимальная масса слитка, кг	130	170	380	3500	5000
Максимальная длина слитка, мм	950	1200	1000	1500	2100
Максимальный диаметр слитка, мм	150	150	250	630	630
Максимальная длина переплавляемой заготовки, мм	1150	2000	2000	3000	3500
Скорость вытягивания слитка, мм·мин ⁻¹	1—40	1,5—15	1,5—15	1,5—15	1,5—15
Высота установки, мм	3550	7600	10 350	10 000	11 500

Особенности тепловой работы. Теплообменные условия характеризуют теплопередачу от плазменной дуги в рабочее пространство ПДП: на боковую поверхность футеровки происходит, в основном излучение (до 85—95 % всего теплового потока) от плазменной дуги как линейного высокотемпературного (100 000—25 000 К) излучателя; на ванну в зоне анодного пятна поступает 35—50 % тепла в результате конвективного переноса плазмы из столба дуги. Тепловая мощность,

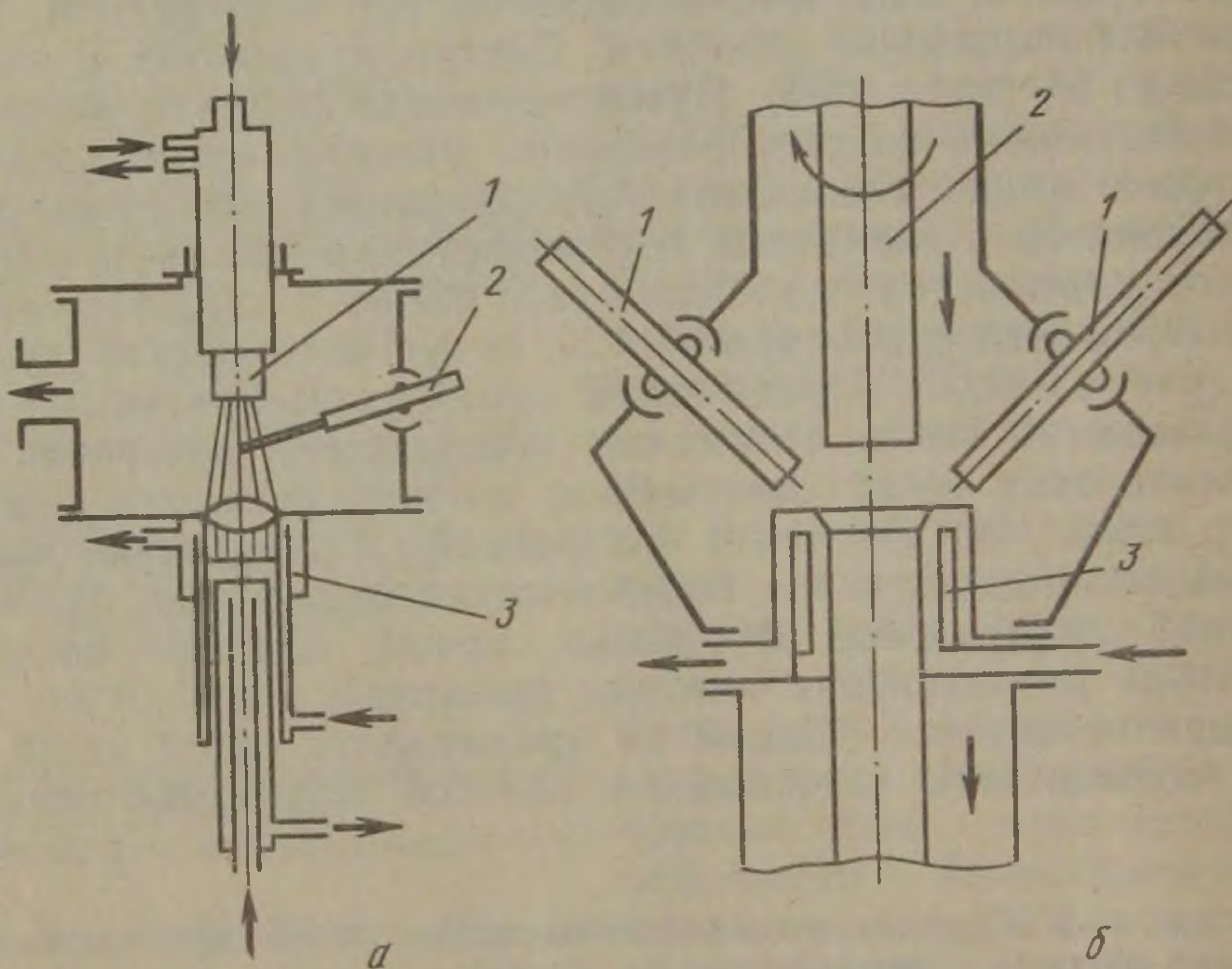


Рис. 43-12. Плазменно-дуговая печь с водоохлаждаемым кристаллизатором: а — боковая подача шихты; б — центральная подача шихты; 1 — плазматрон; 2 — шихта; 3 — кристаллизатор

передаваемая металлу в анодном пятне, P_a зависит от силы тока и длины дуги, возрастая до максимума при такой длине дуги, когда закончено формирование конического участка столба со стороны катодного пятна. По данным М. М. Крутянского

$$P_{a.\max} = 0,4P_d \text{ при } l_d^{\max} = (4 \div 5) D_{ст},$$

где $D_{ст}$ — диаметр цилиндрической части столба дуги.

Особенность распределения теплового излучения от вертикальной плазменной дуги между поверхностями свободного пространства ПДП по сравнению с ДСП заключается в меньшей направленности излучения высокотемпературного столба на ванну ($\leq 30\text{—}40\%$), практическом отсутствии экранирования тепловых потоков на свод и в наличии опасной для тепловой работы футеровки стены зоны «горячего пояса» на высоте, равной половине длины дуги, т. е. $h_{\text{гор}} = 0,5l_d$.

Неравномерность облучения свода зависит не только от длины дуги l_d , но и от высоты расположения свода. Поэтому при кон-

струировании ПДП необходимо выбирать рациональное соотношение $(h_{ст}/D_0)_{равн}$, обеспечивающее равномерную облученность поверхности свода при данной длине плазменной дуги.

С учетом вышеизложенного, рациональный тепловой режим ПДП зависит от параметров плазменной дуги. Вся мощность дуги P_d складывается из мощности, передаваемой ванне в анодном пятне P_a , мощности, выделяемой в столбе дуги $P_{ст}$ и мощности, выделяемой в катодной области P_k . Как уже отмечалось, мощность P_a полностью поглощается металлом и не зависит от геометрических размеров рабочего пространства ПДМ. Мощность P_k составляет 1—2 % от величины P_d и ее значением можно пренебречь. Поэтому мощность, передаваемая от плазменной дуги на ванну $P_v = P_a + \chi P_{ст}$, где χ — доля мощности, передаваемая ванне от столба дуги, которая в условиях лучистого теплообмена (с точностью до 5—15 %) является угловым коэффициентом, зависящим от отношения l_d/D_0 и определяемым, например, методом светового моделирования.

Результаты расчетов, выполненных Л. Н. Кузнецовым для ПДП вместимостью до 12 т, показывают:

1) для каждого значения силы тока дуги существует рациональное значение ее длины $l_d^{рац} \approx 2l_d^{max}$, при котором мощность P_v максимальная и составляет от всей мощности дуги 42—45 %;

2) наибольшее отношение P_v/P_d , равное 56 %, достигается при наиболее короткой дуге, равной $l_d = l_d^{max}$. Однако меньшее напряжение дуги в этом случае является причиной абсолютного снижения мощности P_v ;

3) чрезмерное удлинение дуги ($l_d > 2l_d^{max}$) приводит к резкому снижению P_v , несмотря на соответствующее увеличение U_d (при неизменной температуре футеровки), так как мощность, передаваемая через анодное пятно, постепенно уменьшается до нуля, снижая эффективность плазменного нагрева.

Следует особо отметить, что рациональную длину плазменной дуги следует устанавливать, когда металл почти расплавлен. В начале периода расплавления возможно работать и на более длинных дугах, чтобы ввести в печь максимально возможную мощность P_d , которую можно получить от источника питания.

Геометрические размеры свободного пространства согласуют с выбранным $l_d^{рац}$ или заданным значением (по электрическим условиям) длины дуги, чтобы высота стены, определяющая расположение пят свода, соответствовала условию: $h_{ст}^{кр} < h_{ст} < h_{ст}^{равн}$, где $h_{ст}^{кр}$ — наименьшая допустимая высота расположения свода, при которой происходит равнозначное облучение плазменными дугами футеровки свода и стены в «горячем поясе».

Условие $h_{ст} > h_{ст}^{равн}$ при данной длине дуги l_d связано с увеличением заглубления плазматронов в свободное пространство и возрастанием тепловых потерь с охлаждающей водой, тогда

как облученность поверхности свода практически не изменяется.

Как уже отмечалось, параметры электрического режима ПДП, определяемые вольт-амперной характеристикой плазменной дуги, зависят от целого ряда внешних факторов — состава и расхода плазмообразующего газа, температурной ситуации в рабочем пространстве, длины дуги.

В отличие от ДСП в рабочем режиме ПДП не требуется непрерывного передвижения плазматрона, так как существует определенная длина дуги $l_d^{\text{рац}}$, зависящая от силы тока, при которой происходит наиболее эффективная передача тепла от плазменной дуги к ванне, т. е. P_v максимальна. Передвижение плазматрона необходимо для зажигания дуги. Последовательность операций такая: сначала производят пробой промежутка между катодом и соплом высоковольтным искровым разрядом, возбуждаемым специальным разрядником — высокочастотным осциллятором и зажигают вспомогательную дугу с силой тока до 200 А; затем при помощи, например, гидравлического привода передвигают плазматрон в сторону шихты до тех пор, пока под действием напряжения холостого хода источника питания не произойдет пробой рабочего промежутка, ионизируемого потоком плазмы вспомогательной дуги, и зажигание плазменной дуги между катодом и шихтой—анодом. После зажигания основной дуги устанавливают плазматрон в рабочем положении, характеризуемом рациональной для заданной силы тока длиной дуги $l_d^{\text{рац}}$.

Электротехническим недостатком ПДП является снижение U_d с увеличением температуры рабочего пространства и соответствующее уменьшение мощности нагрева по ходу плавки (при неизменных значениях силы тока и массового расхода плазмообразующего газа). В ряде случаев удается стабилизировать или даже повысить напряжения и мощность плазменной дуги путем введения второго компонента в плазмообразующий газ — водорода или азота, поскольку в этих газах дуговой разряд имеет более высокую вольт-амперную характеристику. Но водород, кроме того, что увеличивает взрывоопасность, оказывает вредное влияние на ход технологического процесса и качество некоторых марок сталей. В таких случаях возможно вдувание в рабочее пространство ПДП дополнительного объема холодного газа с последующей его откачкой и охлаждением. Потери тепла с откачиваемым газом могут быть компенсированы снижением тепловых потерь во всех элементах печи в результате ускорения плавки при более высокой мощности плазменных дуг.

В печах с огнеупорной футеровкой максимальное значение мощности дуг P_d ограничено допустимой температурой T_ϕ из-за особых условий теплопередачи от плазменных дуг. Поэтому эксплуатация ПДП возможна только с системой автоматического регулирования величины P_d по непрерывно измеряемой температуре футеровки T_ϕ .

Технико-экономические показатели. ПДП с огнеупорной футеровкой имеют худшие энергетические показатели по сравнению с ДСП из-за дополнительных тепловых потерь в плазматронах и подовом электроде. Общие потери энергии в водоохлаждаемых элементах достигают 35—40 %, из которых 15—20 % — в уплотнителе плазматрона; 8—10 % — в самом плазматроне (корпус, сопло, катод); 1—2 % — в подовом электроде. Для малых печей (емкостью до 5 т) тепловой к. п. д. составляет по данным ВНИИЭТО 0,3—0,35.

Электрический к. п. д. η_a учитывает электрические потери при формировании плазменной струи (η_c) в токоведущих элементах плазматрона ($\eta_{пл}$), во вторичном токоподводе ($\eta_{к.с}$) и в источнике питания ($\eta_{и.п}$), т. е. $\eta_a = \eta_{и.п} \eta_{к.с} \eta_{пл} \eta_c$.

Обычно к. п. д. дуговых плазматронов прямого действия $\eta_c \approx 1$, а для плазматронов косвенного действия не превышает 0,7—0,8 (в зависимости от состава и расхода плазмообразующего газа).

По данным ВНИИЭТО, удельный расход электроэнергии в плазменно-дуговых печах различной вместимости m_0 и разной мощности P составляет:

m_0 , т	5	10	30
P , МВт	3,5	7—8,5	12—15
$W_{зy}$, МВт·ч/т	0,7	0,65	0,625
W_y , МВт·ч/т	0,9—1,1	Нет св.	Нет св.

В ПДП с кристаллизатором диаметром $D_{кр}$ величина W_y составляет:

$D_{кр}$, мм	150	250	320
W_y , МВт·ч/т	2,4	1,2	0,96

По технологическим инструкциям рекомендуемая скорость вытягивания слитка и соответствующая массовая скорость Q_m плазменно-дугового переплава зависит от размера (диаметра $D_{кр}$) кристаллизатора, сортамента переплавляемых сталей и сплавов, электрического режима, составляя, например, для печи типа У-400 (мощность 240 кВт) 2,5—9 мм/мин и 50—200 кг/ч. При этом годовая производительность достигает 100—260 т «черных» слитков диаметром 150 мм.

Значительную долю (до 60—75 % в зависимости от стоимости заданного при переплаве) в себестоимости металла плазменной плавки занимают расходы по переделу из-за значительных затрат на электроэнергию (технологическую и техническую), плазмообразующий газ, амортизацию основных средств (в случае недостаточной производительности печи).

Для дуговых плазматронов различной мощности принимают $Q_v \approx 15\text{--}60 \text{ м}^3/\text{ч}$. Поэтому удельный расход плазмообразующих газов при низкой производительности ПДП может быть чрезмерно большим (до 20—30 $\text{м}^3/\text{т}$), определяя при высоких ценах на аргон значительные затраты. Эти затраты снижают за счет: применения смесей более дешевых плазмообразующих газов (например, аргон

с азотом); регенерации отработанных газов; удаления воздуха из рабочего пространства герметичной ПДП путем вакуумирования вместо обычной продувки плазмообразующим газом.

Сравнительный экономический анализ различных методов электроплавки показывает, что:

1) плазменная плавка в печах с футеровкой может быть самой экономичной, поскольку за счет снижения угара (при плавке) и увеличения выхода годного (при дальнейшем переделе) по сравнению с плавкой в ДСП возможно уменьшение сквозного расхода металла, снижение себестоимости (на 10—1,5 %) при меньших удельных капитальных затратах (на 10—12 %);

2) плазменный переплав в печах с кристаллизатором занимает промежуточное положение между вакуумно-дуговым переплавом и электронной плавкой. Однако при использовании ПДП с «расходуемым» плазматроном экономичность процесса возрастает.

Глава 44

ИНДУКЦИОННЫЕ ПЕЧИ

1. Канальные печи

Общая характеристика

Канальные печи (рис. 44-1) как и все индукционные печи работают на принципе теплогенерации по закону Ленца—Джоуля в прямом индукционном подводе энергии переменного электромагнитного поля (см. том 1). Многовитковый индуктор 2, намотанный на стержень замкнутого магнитопровода 3, создает цилиндрические электромагнитные волны, которые падают на внутреннюю поверхность металла в кольцевом канале 5. Радиальный поток энергии, определяемый комплексным вектором Пойнтинга, обеспечивает необходимую теплогенерацию и создает электродинамическое воздействие на жидкий металл в виде сжимающего эффекта. Во избежание разрыва замкнутого электропроводного кольца каналы располагают вертикально, наклонно или горизонтально под объемом жидкого металла в ванне 1 печи, уравновешивая действие поля гидростатическим давлением металла и атмосферным давлением на поверхность зеркала ванны.

Технологическим недостатком канальных печей является необходимость оставлять в печи некоторое количество жидкого металла для постоянного заполнения канала (условие теплогенерации), что осложняет переход к плавке металлов и сплавов другого химического состава. Поэтому канальные печи более пригодны для непрерывного технологического процесса. Часто создают плавно-раздаточные агрегаты на основе одной-двух плавных канальных печей, канального миксера и литейной

машины, причем переливные желоба оборудуют электрообогревом (нагревателями сопротивления) и электромагнитными насосами.

Другим технологическим недостатком является трудность изготовления футеровки канала (так называемый подовый камень 4 на рис. 44-1) и низкая ее стойкость для высокотемпературных металлов и сплавов.

Собственно печь представляет собой футерованную ванну шахтного или барабанного типа. Для слива жидкого металла из

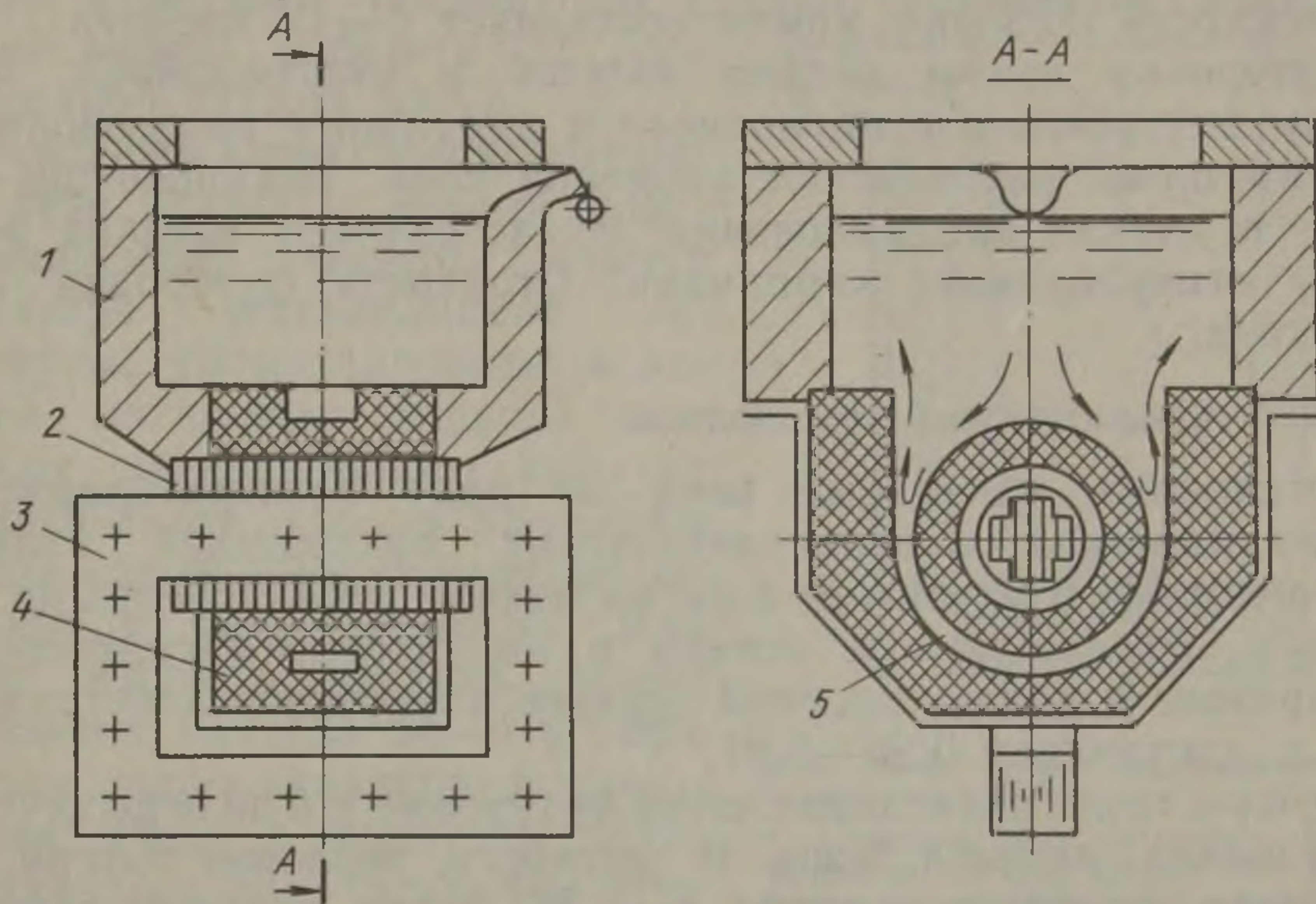


Рис. 44-1. Схема индукционной канальной печи

ванны шахтную печь наклоняют на угол до 90° , а барабанную — вращают (вокруг горизонтальной оси) на угол около 45° соответствующим механизмом.

Электропечные установки канальных печей питают через понижающие трансформаторы током промышленной частоты 50 Гц. Для компенсации реактивной мощности индуктора параллельно ему включают конденсаторную батарею.

Полезная вместимость отечественных канальных печей для плавки черных и цветных металлов и их сплавов достигает 16—60 т и более. Удельная мощность достигает 100 кВт/т.

Особенности тепловой работы

Индукционные канальные печи являются печами-теплогенераторами, в которых зона технологического процесса может находиться только в жидком состоянии. Электрический режим тепловой работы канала сопровождается интенсивным массо- и теплообменом между каналом и ванной в результате электродинамической конвекции, дополняемой естественной конвекцией вследствие существующей разности температур (до 100—200 К) металла

в канале, где происходит теплогенерация, и в ванне, где находится основное количество жидкого металла (полезная вместимость, составляющая 70—75 % всей вместимости печи).

Высокая температура и интенсивное движение жидкого металла в условиях гидростатического давления снижают стойкость футеровки канала. В зависимости от свойств жидкого металла в качестве футеровочных материалов для подового камня применяют огнеупорные массы на основе шамота, кварцита, магнезита и корунда.

Стойкость подового камня составляет 6—12 месяцев.

Футеровку ванны делают толстой и многослойной: между слоями внутреннего огнеупорного и наружного теплоизоляционного кирпичей располагают набивной слой, защищающий футеровку в случае проникновения жидкотекучего металла в швы между огнеупорными кирпичами. Стойкость футеровки ванны 1—2 года.

Технико-экономические показатели

Индукционные каналные печи по ряду электротехнических, теплотехнических и технологических показателей являются совершенными и удобными в эксплуатации электропечными установками. Электрические потери в индукторе, магнитопроводе, токопроводе и конденсаторной батарее невелики и электрический к. п. д. составляет 0,95—0,97.

Потери тепла происходят через футеровку и в виде физического тепла шлака, паров и газов. В частности, тепловые потери через футеровку ванны составляют 4—6 %, через подовый камень — до 8—12 %, из которых 5—10 % уносит вентиляторный воздух, применяемый в каналных печах для охлаждения футеровки канала.

2. Тигельные печи

Общая характеристика

В индукционных тигельных печах (рис. 44-2) расплавляемый или подогреваемый металл находится в тигле 1, расположенном в полости многовиткового цилиндрического индуктора 2. Цилиндрические электромагнитные волны падают на боковую поверхность металла, вызывая теплогенерацию в поверхностных слоях и интенсивную циркуляцию во всем объеме в результате сжимающего электродинамического воздействия. Под действием радиальных сил поверхность зеркала жидкого металла в тигле приобретает форму выпуклого мениска, высота которого может достигать 5—15 % глубины металла в тигле. Выпуклый мениск затрудняет создание шлака на зеркале ванны и способствует излишнему окислению, что ограничивает металлургические возможности индукционных тигельных печей.

В таких печах невозможно применять замкнутый магнитопровод. Неизбежное увеличение магнитного потока рассеяния требует соответствующего увеличения частоты изменения электромагнитного поля. Поэтому печи вместимостью до 25 кг работают на токах высокой частоты — 440 и 67 кГц, более крупные печи для плавки твердой шихты — на токах средней частоты от 10 до 0,5 кГц от соответствующих преобразователей, что удорожает электропечную установку.

В крупных индукционных тигельных печах, оставляя в тигле 65—90 % металла предыдущей плавки (аналогично канальным печам), можно работать на промышленной частоте 50 Гц.

Основным элементом конструкции печи является медный водоохлаждаемый индуктор. Вокруг индуктора устанавливают незамкнутые магнитопроводы в качестве магнитных экранов для защиты металлического корпуса от магнитного потока рассеяния во избежание нагрева (перемагничивание и вихревые токи). Для слива жидкого металла тигель наклоняют на угол 95—100° при помощи гидроцилиндров, шарнирно связанных с корпусом печи.

Индукционные тигельные печи применяют для плавки черных и цветных металлов и их сплавов. Отечественные промышленные сталеплавильные печи типа ИСТ работают в периодическом режиме на частоте 500—2400 Гц, расплавляя твердую шихту и сливая металл полностью после каждой плавки. Как уже отмечалось, печи промышленной частоты (например, для чугуна типа ИЧТ) работают практически в непрерывном режиме с частичным сливом готового металла. Плавку цветных металлов с низким удельным электросопротивлением, в том числе и драгоценных металлов, проводят по схеме косвенного индукционного нагрева, обеспечивая теплогенерацию в электропроводном тигле. Например, магниевые сплавы выплавляют в печах типа ИГТ со стальным тиглем, некоторые металлы — в высокочастотных печах с графитовым или карбидкремнеграфитовым тиглем. Удельная мощность индукционных тигельных печей достигает 300 кВт/т.

Особенности тепловой работы

Для индукционных тигельных печей, являющихся печами-теплогенераторами с электрическим режимом тепловой работы, характерно полное совмещение зон теплогенерации и технологического процесса. Однако теплогенерация характеризуется поверхност-

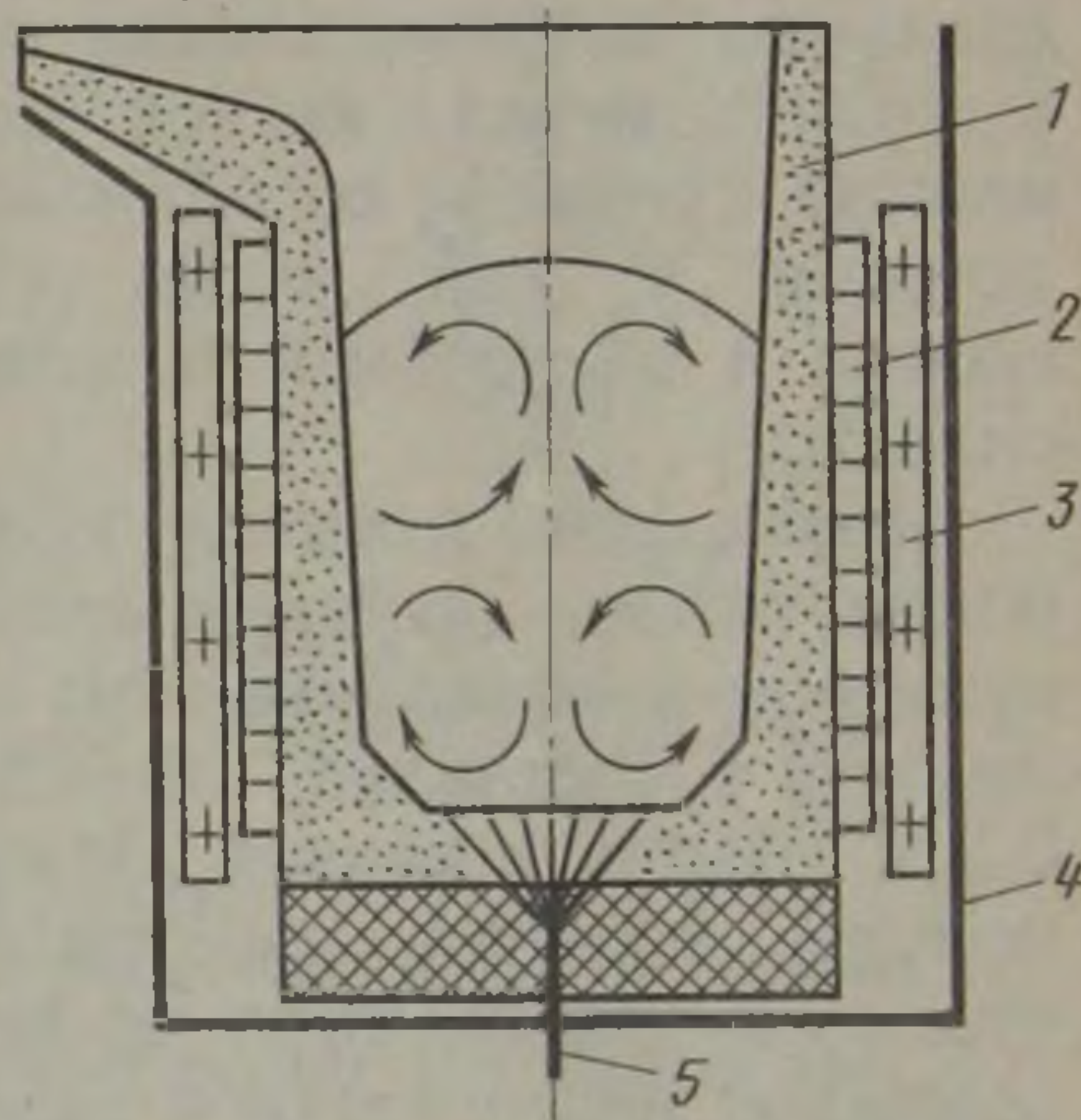


Рис. 44-2. Схема индукционной тигельной печи:

1 — тигель; 2 — индуктор; 3 — магнитопровод; 4 — корпус; 5 — сигнализатор состояния футеровки тигля

ным эффектом, что вызывает внутренний теплообмен теплопроводностью в твердом теле (при плавке шихты) или конвекцией в жидком металле.

Вертикальная составляющая скорости в пристеночном потоке металла (см. рис. 44-2) преимущественно определяет интенсивность эрозионного износа футеровки тигля, особенно в нижнем контуре циркуляции, где больше гидростатическое давление на футеровку, турбулентное течение в центральной части тигля со скоростью 0,5—2,5 м/с при числе Рейнольдса $Re > 20\ 000$ — массо- и теплообменные процессы в объеме ванны; скорость радиальных потоков вблизи зеркала ванны — плавление вносимой в жидкий металл легкой шихты (например, стружка) и массообменные процессы со шлаком и атмосферой; скорость радиальных потоков у дна тигля — плавление тяжеловесной кусковой шихты и массообмен с тяжелыми добавками (например, ферросплавы).

Необходимо отметить тяжелые условия тепловой работы футеровки тигля. Толщина стенки, определяющая зазор между индуктором и металлом, ограничена по электротехническим соображениям и составляет 10—25 % от диаметра металла, т. е. 0,05—0,3 м. Малая тепловая инерция тигля, особенно в печах периодического действия, обуславливает склонность к растрескиванию, что при повышенном эрозионном износе футеровки является причиной недостаточной надежности эксплуатации индукционных тигельных печей и даже взрывоопасностью в случае проникновения жидкого металла к виткам водоохлаждаемого индуктора. Наиболее распространена набивная футеровка тигля.

Индукционные тигельные печи оборудуют сигнализаторами состояния футеровки тигля (см. рис. 44-2), которые дают сигнал на отключение печи при уменьшении толщины стенки ниже допустимой величины, а также в случае прохода металла в трещины.

Стойкость тиглей составляет 50 (основная футеровка) — 100 (кислая футеровка) плавов при выплавке стали, 4—5 мес. при плавке чугуна, 1—1,5 года при плавке алюминиевых сплавов.

Технико-экономические показатели

Индукционные тигельные печи характеризуются сравнительно низким электрическим к. п. д. $\eta_e \approx 0,4 \div 0,85$ в зависимости от величины удельного электрического металла и типа электропреобразователя. Тепловой к. п. д. $\eta_t \approx 0,5 \div 0,95$, возрастая с увеличением толщины футеровки тигля в более крупных индукционных печах. При общем к. п. д. $\eta_o \approx 0,2 \div 0,8$ удельный расход электроэнергии составляет при плавке стали 650—1150 кВт·ч/т, при плавке чугуна 550—700, при подогреве чугуна в миксерах 45—60, при плавке алюминиевых сплавов 550—700 кВт·ч/т, где меньшие цифры — для более крупных печей.

3. Вакуумные печи

Общая характеристика

Компактность электромагнитной системы «индуктор—металл», характерная для индукционных тигельных печей, обусловила развитие на их основе разнообразных конструкций индукционных вакуумных плавильных (рис. 44-3) и нагревательных печей, различающихся расположением индуктора вне (см. рис. 44-3, а) или внутри (см. рис. 44-3, б—г) вакуумной камеры. Слив металла из тигля плавильных печей может быть через донное отверстие,

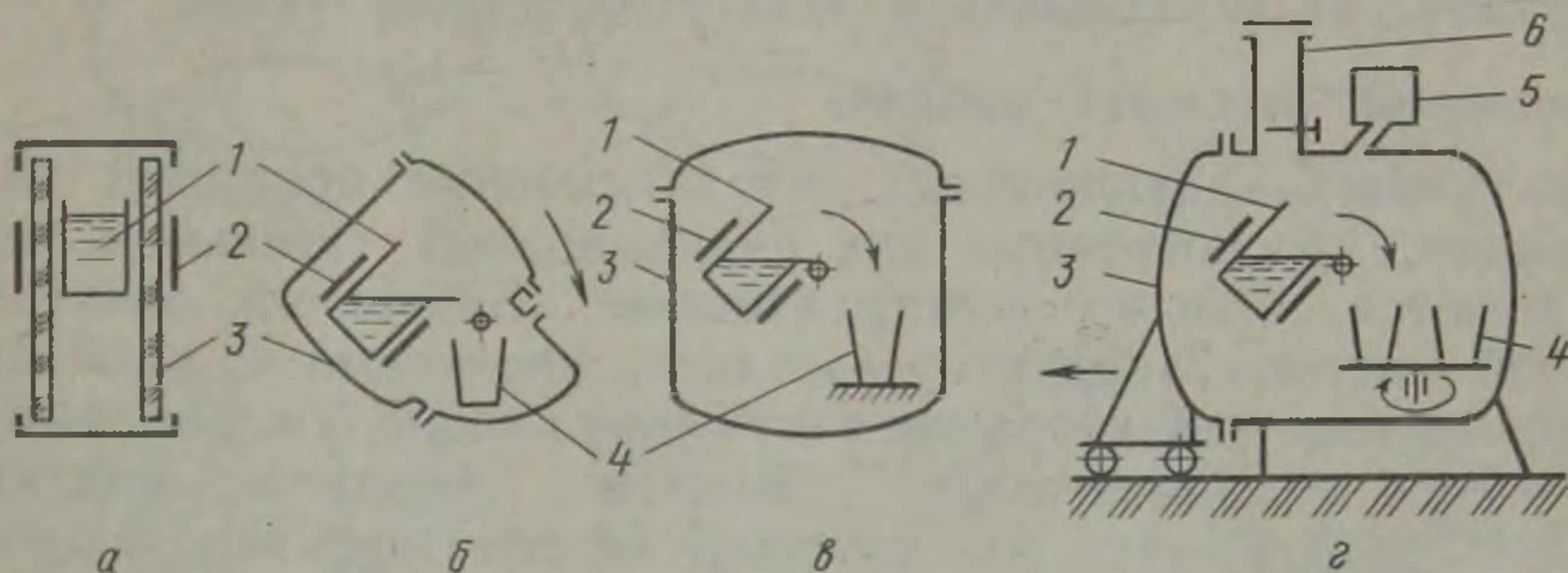


Рис. 44-3. Схемы индукционных вакуумных печей:

а — с кварцевой трубой; б — с наклоняющимся корпусом; в — с наклоняющимся тиглем; г — полунепрерывного действия; 1 — тигель; 2 — индуктор; 3 — вакуумная камера; 4 — изложницы или литейные формы; 5 — дозатор для присадок; 6 — камера подачи шихты

путем наклона корпуса печи малых размеров (см. рис. 44-3, б) или тигля внутри вакуумной камеры больших габаритов (см. рис. 44-3, в и г) в изложницы или литейные формы. Нагревательные печи периодического действия в зависимости от способа загрузки изделий могут быть камерные, шахтные, элеваторные; возможно создание печей непрерывного действия. Плавильные печи, работающие без нарушения вакуума в течение всей кампании тигля, называют печами полунепрерывного действия. Такие печи — наиболее сложные агрегаты (см. рис. 44-3, г), имеющие помимо основной (плавильной) вакуумной камеры с индукционной печью ряд вспомогательных шлюзовых камер для загрузки шихты, разливки, подачи изложниц или литейных форм, дозаторы для присадок, устройство для отбора проб и измерения температуры жидкого металла по ходу плавки и другое технологическое оборудование.

Кожух вакуумной камеры изготовляют из немагнитной стали. По требованиям вакуумной гигиены внутреннюю поверхность кожуха хорошо обрабатывают (в некоторых случаях — полируют). При расположении индуктора вне вакуумной камеры кожух представляет собой кварцевую трубу (см. рис. 44-3, а).

Индукционные вакуумные печи работают в условиях среднего вакуума с остаточным давлением 0,01—0,1 Па при нагреве и 0,1—1 Па при плавке.

Индукционные вакуумные печи применяют для плавки черных и цветных металлов и их сплавов из чистых твердых шихтовых материалов на частоте 1—2,5 кГц (емкость до 10—15 т), рафинирования жидкого полупродукта на промышленной частоте (емкость до 60 т), переплава чистых металлов для фасонного литья (емкостью до 450 кг). Химически активные и особо чистые материалы получают в индукционных вакуумных печах с так называемым холодным тиглем, представляющим собой медный водоохлаждаемый тигель с продольными разрезами, через которые электромагнитные волны проходят к расплавляемому материалу, не поглощаясь в электропроводном тигле.

Особенности тепловой работы

В вакуумных индукционных печах основные принципы теплогенерации, рассмотренные для индукционных тигельных печей, сохраняются. Однако конструктивные особенности электромагнитной системы «индуктор—металл», связанные с возможным расположением индуктора вне вакуумной камеры (см. рис. 44-3, а), наличием металлического кожуха вокруг индуктора (см. рис. 44-3, б—г) и др., снижают коэффициент использования электрической энергии из-за увеличения магнитного потока рассеяния и реактивной мощности, не участвующей в теплогенерации.

Технико-экономические показатели

Индукционные вакуумные печи по сравнению с открытыми тигельными печами имеют более низкие значения к. п. д. η_a и η_t . Общий к. п. д. η_o составляет 0,2—0,4, а в печах с «холодным» тиглем 0,05—0,15, что вызывает повышенный удельный расход электроэнергии. Например, при выплавке стали в печах типа ИСВ $W_y \approx 2 \div 3$ кВт.ч/кг.

Строительство индукционных вакуумных печей связано с большими дополнительными капитальными затратами, что в сочетании с высокими расходами по переделу делает вакуумную индукционную плавку достаточно дорогостоящей, целесообразной только для получения металлов и сплавов особо высокого качества.

4. Установки для плавки во взвешенном состоянии

Общая характеристика

Как уже отмечалось ранее, электромагнитные волны, создаваемые индуктором, помимо теплогенерации создают в проводящей среде электромагнитные силы, сжимающие и перемещающие жидкий металл. При достаточной напряженности магнитного поля силы электродинамического давления могут уравновесить силу тяжести данного объема металла, что позволяет плавить и удерживать металл во взвешенном состоянии. Такой способ

плавки позволяет исключить взаимодействие расплавляемого металла с футеровкой, получать любую заданную температуру жидкого металла, перемешивать этот объем жидкого металла, плавно спускать его внутри индуктора и регулировать выпуск металла в изложницу или кристаллизировать его во взвешенном состоянии.

Возможные конструкции индуктора, форма жидкого металла и конфигурация магнитного поля представлены на рис. 44-4.

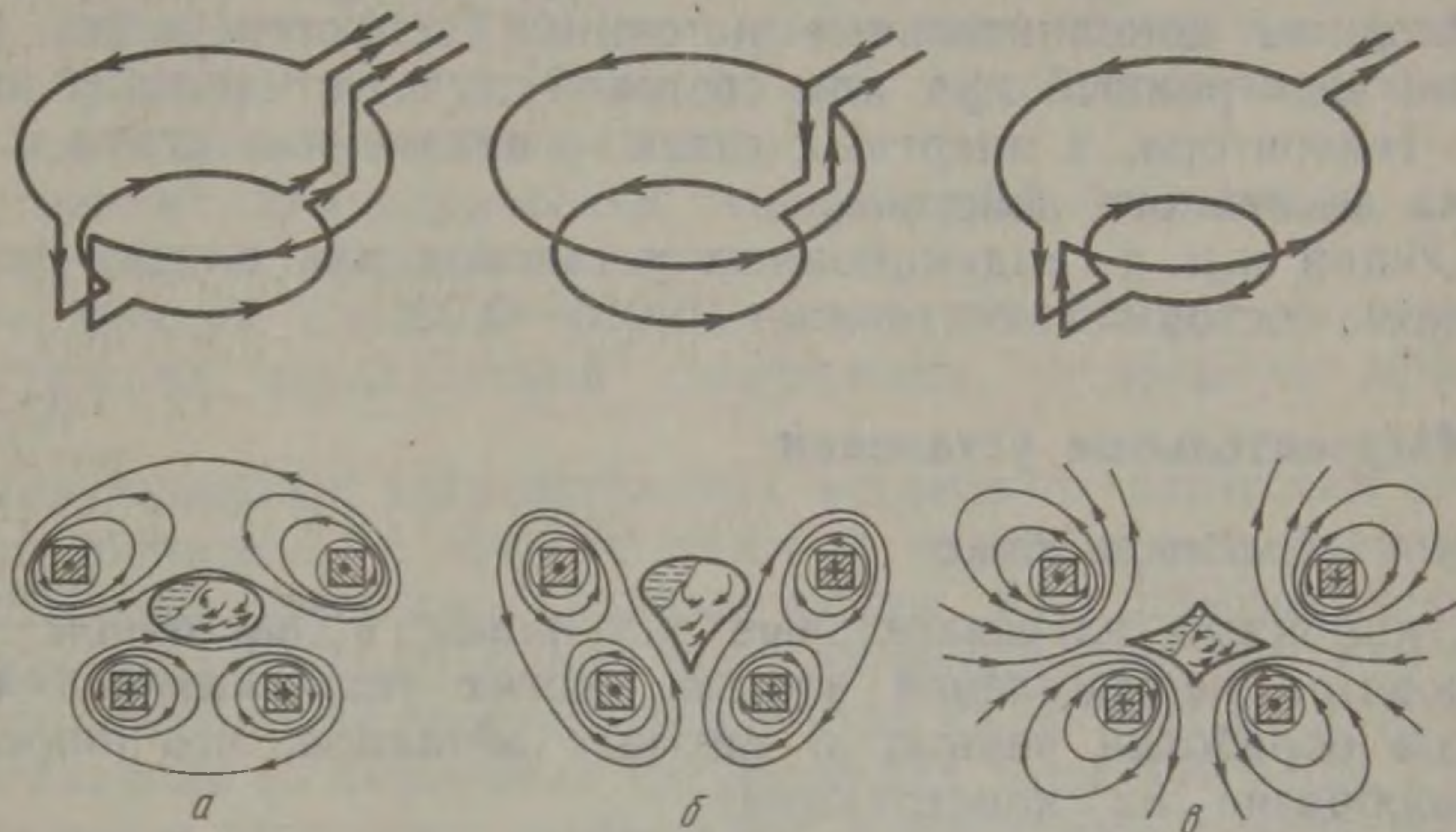


Рис. 44-4. Схемы протекания тока, конфигурации магнитного поля и формы жидкого металла при плавке во взвешенном состоянии в различных индукторах:

а — типа «лодочка»; б — с параллельными витками; в — с последовательным обратным витком

В таком индукторе устойчивость взвешенного состояния жидкого металла обеспечивается в пределах объема 1,5—3,4 дм³.

Особенности тепловой работы

Технологическое применение установок для плавки во взвешенном состоянии при физико-химических исследованиях металлов часто связано с достижением заданной установившейся температуры $T_{уст}$: при расплавлении $T_{уст} > T_{пл}$, при кристаллизации металла во взвешенном состоянии $T_{уст} < T_{пл}$. Любое значение $T_{уст}$ соответствует тепловому равновесию металла, когда энергия теплогенерации в результате индукционного нагрева полностью расходуется на испарение металла и на тепловые потери излучением (в вакууме) или конвекцией (в инертных газах). Однако параметры электромагнитного поля, необходимые для удержания металла во взвешенном состоянии, могут создавать теплогенерацию, не соответствующую тепловому равновесию. В частности, в диапазоне частот 70—440 кГц электромагнитное поле, удерживающее каплю, создает теплогенерацию для металлов:

1) Al, Cu, Ni, Co, Fe излишнюю, т. е. $T_{уст} > T_{пл}$ и кристаллизацию невозможно осуществить без интенсификации теплоот-

вода. Металлы Fe, Ni, Co при удерживающей частоте 70 кГц кристаллизуют при обдуве капли гелием. В некоторых случаях теплогенерацию ослабляют уменьшением массы (объема) капли, если это не снижает стабильности взвешенного состояния;

2) Ti, Zr, Nb, Mo достаточную и ее можно регулировать изменением частоты поля. Металлы Ti и Zr плавят и кристаллизуют в вакууме при частоте 70 кГц, Nb и Mo — при частоте 440 кГц;

3) Ta и W недостаточную, т. е. $T_{уст} < T_{пл}$ и для плавления необходимы дополнительные источники теплогенерации (в вакууме электронный луч или световой луч оптического квантового генератора, в инертных газах — плазменная струя плазматрона косвенного действия).

Общий к.п. д. индукционных установок для плавки во взвешенном состоянии составляет 0,015—0,02.

5. Нагревательные установки

Общая характеристика

Индукционные нагревательные установки в настоящее время становятся неотъемлемой частью многих технологических процессов обработки черных и цветных металлов, что определяет разнообразие их конструкций.

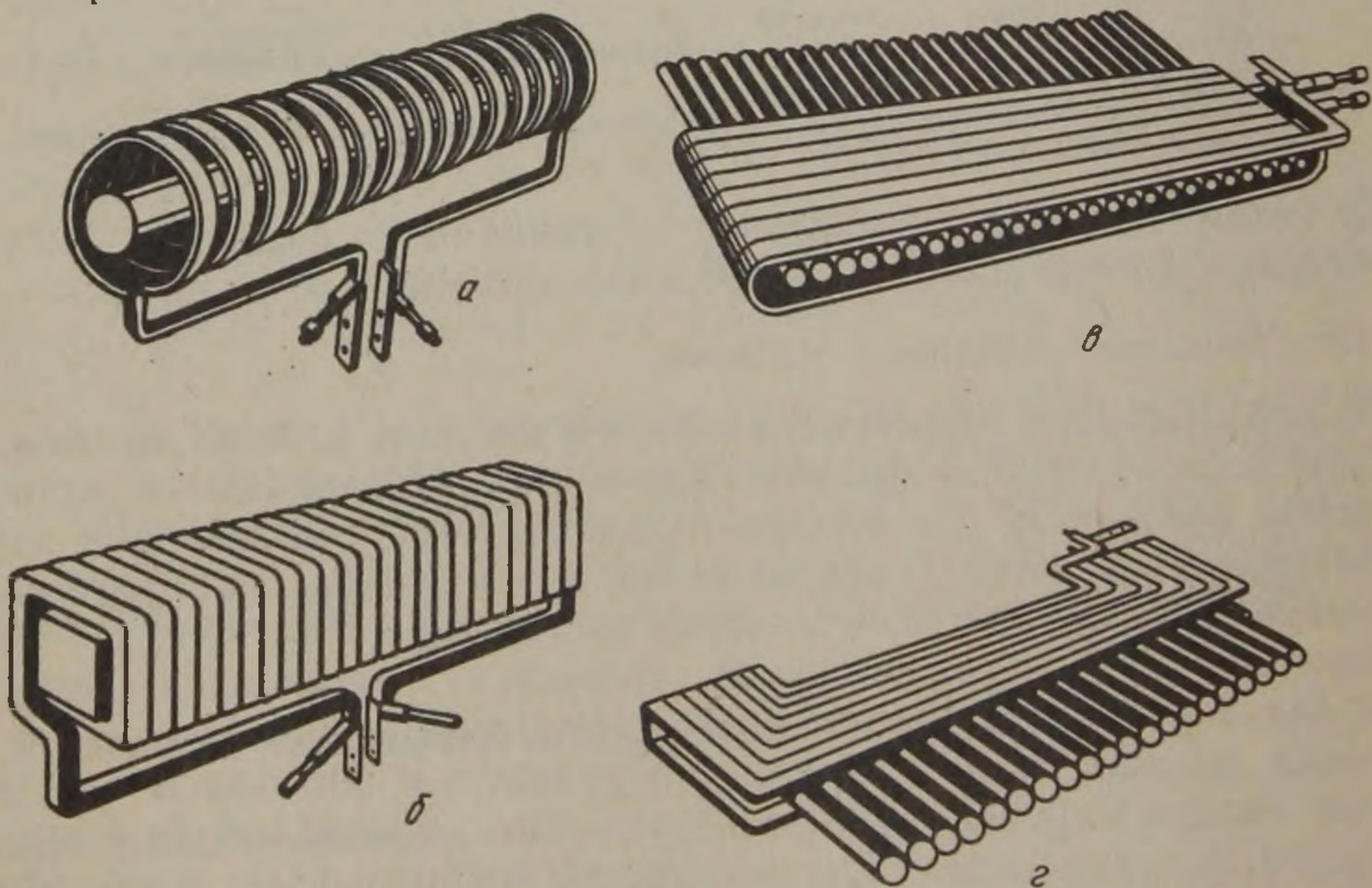


Рис. 44-5. Схемы индукционных нагревательных установок с проходными индукторами разного поперечного сечения:

а — круглого; б — квадратного; в — овального; г — щелевого

Для нагрева заготовок по всей длине применяют соленоидные многовитковые проходные индукторы круглого, квадратного или прямоугольного сечения (рис. 44-5, а и б), для местного нагрева концов длинных заготовок (прутки, трубы) — овальные и щеле-

вые (рис. 44-5, в и г), для нагрева пластин и лент — овалы, для нагрева кольцевых заготовок (бандажи колес) — индукторы с замкнутым магнитопроводом аналогично принципу работы индукционных канальных печей, при нагреве листового материала — индукторы с поперечным магнитным полем (разработка В. П. Вологодина и А. Е. Слухоцкого).

Закалочные индукторы могут быть предназначены для нагрева: внешних цилиндрических поверхностей (обычно одновитковые); плоских поверхностей (индукторы в виде плоских спиралей, зигзагообразные, петлевые или в виде одиночного индуктирующего провода с магнитопроводом);

внутренних цилиндрических поверхностей (кольцевые одновитковые или соленоидные индукторы);

поверхностей сложной формы (такие индукторы повторяют конфигурацию закаливаемой поверхности, используя эффект близости).

В индукционных нагревательных установках заготовки перемещают толкателем с кривошипным (в кузнечных нагревателях типа КИН-К), реечным, гидравлическим или пневматическим приводом (типа КИН-П), «шагающей» направляющей при возвратно-поступательном ее перемещении внутри индуктора от кулачкового механизма (в кузнечных нагревателях типа КИН-Ш); длинные стальные заготовки перемещают приводными «магнитными» роликами (с постоянными магнитами), немагнитные — роликовыми протяжными механизмами, когда ролики устанавливают между секциями длинного индуктора.

Особенности тепловой работы

Неравномерная теплогенерация в поверхностном слое при прямом индукционном нагреве вызывает внутреннюю теплопередачу в глубинные слои металла по механизму нестационарной теплопроводности и внешнюю теплопередачу излучением и конвекцией с поверхности нагреваемой заготовки при температуре $T_{\text{пов}}$.

Индукционный нагрев можно осуществить в двух режимах:

а) при постоянной мощности, когда плотность потока активной энергии $q_a = 0,5 \div 2 \text{ МВт/м}^2 = \text{const}$;

б) при постоянной температуре поверхности.

Практически режим б проводят в две стадии. Сначала по режиму $q_a = \text{const}$ достигают $T_{\text{пов}} = T_{\text{зад}}$, а затем условие $T_{\text{пов}} = \text{const}$ обеспечивают понижением мощности индукционного нагрева ($q_a = \text{var}$). Начальное значение q_a может быть в 10—20 раз больше, чем конечное. При таком режиме общая продолжительность нагрева до заданной разности температур сокращается в 2,5—4 раза.

Как уже отмечалось, равномерность теплогенерации при индукционном нагреве зависит не только от параметров поля, но и от электрофизических свойств металла, особенно при нагреве ферромагнитных металлов. При большом значении относительной

магнитной проницаемости имеет место ярко выраженный поверхностный эффект. При нагреве выше точки Кюри ферромагнитный металл теряет магнитные свойства, поверхностный эффект ослабляется и теплогенерация становится более равномерной, но менее интенсивной. Поэтому в таких случаях целесообразно применять двухчастотный нагрев: нагрев на промышленной частоте до 900—1000 К, на повышенной — до заданной температуры $T_{\text{зад}}$. Такой нагрев удобно осуществить в индукторе периодического действия, снабженном двумя источниками питания, работающими поочередно.

При индукционном нагреве под поверхностную закалку обеспечивают заданную глубину закаленного слоя x . Условия тепловой работы индукционных закалочных установок можно охарактеризовать такими параметрами: глубина слоя $x \leq 5$ мм, время нагрева 2—10 с, скорость нагрева 100—500 К/с, плотность потока активной энергии q_a 2—30 МВт/м².

Для тепловой изоляции нагревательных индукторов применяют асбестоцементные трубы при нагреве до 600—800 К, шамотные кольца — до 800—1200 К или жаростойкий бетон — до 1400—1500 К. Толщина футеровки не должна превышать (0,2—0,4) D_m , чтобы не ухудшить электротехнические свойства установки.

Технико-экономические показатели

С учетом тепловых потерь в индукторе ($\eta_t \approx 0,7 \div 0,9$) и электрических потерь во всей электропечной установке индукционного нагрева ($\eta_a \approx 0,55 \div 0,75$) общий к. п. д. составляет 0,4—0,6. Удельный расход электроэнергии на индукционный нагрев заготовок из черных и цветных металлов составляет, кВт-ч/т:

Сталь ($T = 1500 \div 1600$ К):	
средняя частота	450—500;
промышленная частота	~350;
двухчастотный нагрев	~450;
Алюминиевые сплавы ($T = 800$ К)	250—260
Медь ($T = 1150$ К)	190—200
Латунь, бронза ($T \approx 1100 \div 1200$ К)	160—170

Глава 45

ПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

1. Печи прямого действия

Общая характеристика

Печи сопротивления прямого действия работают на принципе теплогенерации по закону Ленца—Джоуля при прямом кондукционном¹ подводе энергии в зону технологического процесса

¹ Способ подвода энергии для теплогенерации путем присоединения нагреваемого тела контактами к электрической цепи источника питания (от лат. «con-ductio» — соединять, принимать на себя).

(рис. 45-1). Согласно (42-1) теплогенерация зависит от электрофизических свойств нагреваемого металла, которые могут значительно изменяться с повышением температуры. Например, при нагреве стали до 1300 К удельное электрическое сопротивление ρ_T увеличивается в 8—10 раз, а относительная магнитная проницаемость μ , резко падает до единицы при температуре аустенизации (точка Кюри). Поэтому в процессе нагрева подводимое напряжение регулируют согласно закону Ома. Сравнительно небольшое активное сопротивление нагреваемых изделий определяет особенность электрического режима печей прямого действия: большая сила тока (10^3 — $5 \cdot 10^4$ А) и низкое напряжение (5—20 В). Промышленные печи прямого действия работают на переменном токе, от однофазных при мощности до 500 кВт. А или трехфазных при мощности свыше 500 кВт. А понижающих трансформаторов (см. рис. 45-1), имеющих необходимый диапазон регулирования вторичного напряжения.

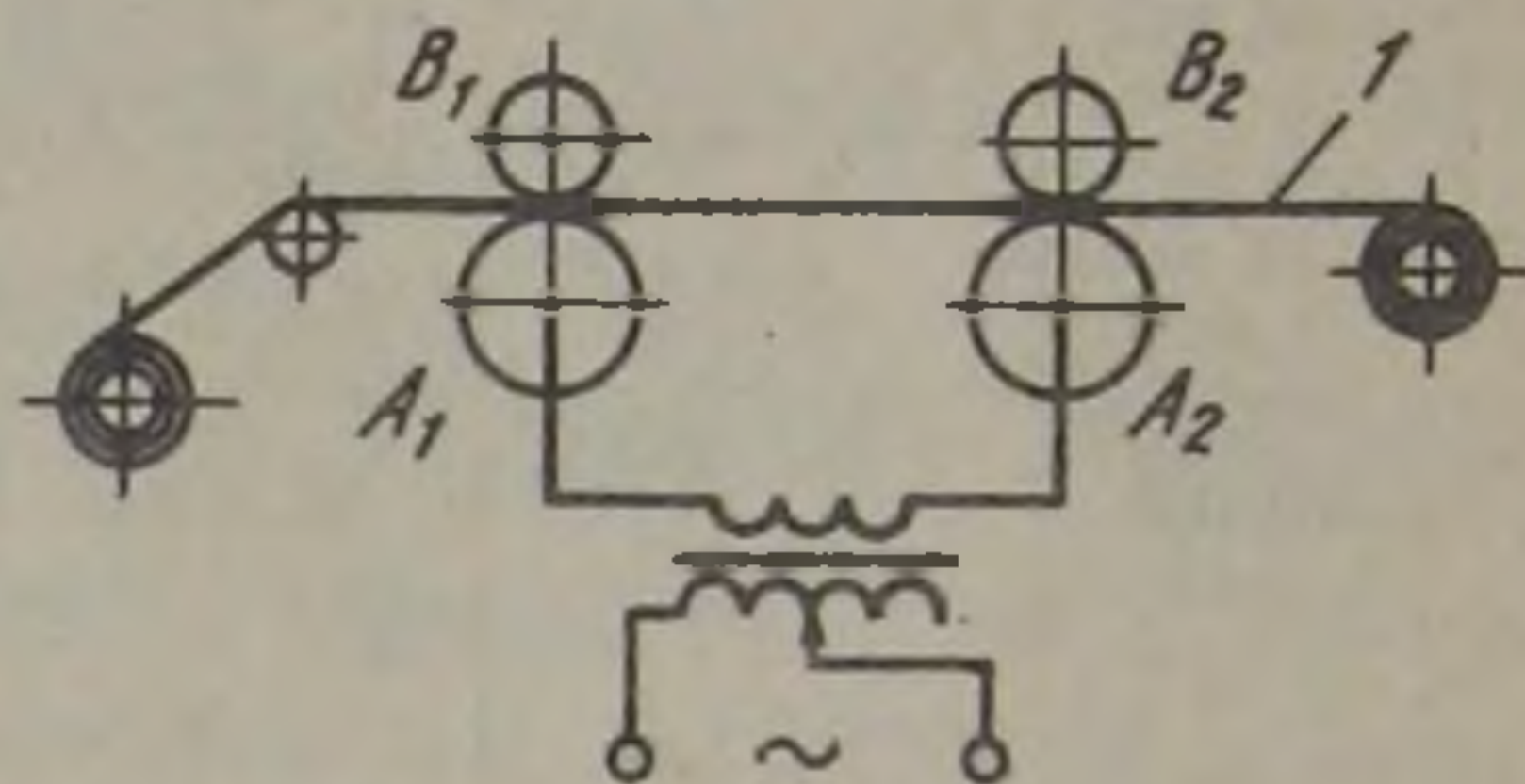


Рис. 45-1. Схема печи прямого действия:

I — нагреваемая заготовка; A₁ и A₂ — контактные ролики; B₁ и B₂ — зажимные ролики; T — понижающий трансформатор

Явление поверхностного эффекта, вызывающее технологически нежелательную неравномерную теплогенерацию по сечению заготовки, ограничивает применение печей прямого действия для нагрева заготовок диаметром до 100—120 мм, когда кондукционный нагрев в 1,5—2 раза экономичнее индукционного.

Ответственным узлом конструкции печей прямого действия являются контактные устройства. В периодических печах при нагреве стержней, прутков, труб ограниченной длины (до 10—12 м) применяют боковые или торцевые зажимные контакты с пневматическим или гидравлическим приводом и с воздушным водяным охлаждением; в печах непрерывного действия при нагреве ленты при проволоки — роликовые контакты (см. рис. 45-1) или жидкостные контакты (расплавленный свинец, расплавы солей и щелочей).

Печи сопротивления прямого действия применяют для нагрева заготовок из черных и цветных металлов при различных видах горячей обработки давлением и термообработки, а также для некоторых высокотемпературных физико-химических процессов (спекание тугоплавких металлов, получаемых методами порошковой металлургии; графитация угольных изделий; получение карборунда и т. п.).

Особенности тепловой работы

Как уже отмечалось (см. гл. 42), печи сопротивления прямого действия являются печами-теплогенераторами с равномерной (при постоянном токе) или неравномерной (при переменном токе) теплогенерацией в зоне технологического процесса.

При нагреве ферромагнитных материалов (железа, кобальта, никеля и сплавов на их основе) на переменном токе в результате резко выраженного поверхностного эффекта ($\mu_r > 100$) температура в глубине сечения растет сначала медленнее, чем на поверхности. После перехода через точку Кюри металл теряет магнитные свойства ($\mu_r = 1$), резко возрастает «горячая» глубина проникновения, теплогенерация становится практически равномерной (при диаметре не более 100—120 мм) и к концу нагрева внутренняя температура начинает превышать поверхностную $T_{\text{пов}}$, которая снижается по мере увеличения тепловых потерь с поверхности (конвекцией пропорционально $T_{\text{пов}}$, излучением пропорционально $T_{\text{пов}}^4$).

Другая особенность тепловой работы печей прямого действия связана с электрическими и тепловыми процессами в контактных зонах, вызывающими неравномерное температурное поле по длине заготовки и, следовательно, неравномерную теплогенерацию из-за температурной зависимости ρ_T .

Допустимую степень неравномерности нагрева (по длине и по сечению) достигают за время t_n , с

$$t_n \approx 25000 D_m^2, \quad (45-1)$$

где D_m — диаметр нагреваемой заготовки, м.

Соотношение (45-1) получено для условий нагрева стали до 1400—1500 К, причем примерно половину периода t_n при применяемых в настоящее время электрических режимах занимает нагрев до 1000—1100 К.

При достаточной электрической мощности электропреобразователя можно получить высокую производительность нагрева при практически любой температуре $T_{\text{зад}}$. Короткое время нагрева (секунды или десятки секунд) способствует малым тепловым потерям, что позволяет работать без футеровки при достаточно высоком тепловом к. п. д.

Технико-экономические показатели

Электрический к. п. д. печей сопротивления прямого действия зависит от конструкции токоподвода и соотношения размеров заготовок, резко уменьшаясь при соотношении $l/D_m^2 < 2$, где l — длина нагреваемой заготовки: при $D_m = 10 \div 60$ мм $\eta_e \approx 0,6 \div 0,8$; при $D_m = 60 \div 100$ мм $\eta_e \approx 0,7 \div 0,9$.

Тепловой к. п. д. печей прямого действия, не имеющих тепловой изоляции, в значительной мере зависит от скорости нагрева и развития теплоотдающей поверхности по сравнению с поперечным сечением нагреваемой заготовки и достигает $\eta_T \approx 0,85 \div 0,95$.

Общий к. п. д. $\eta_0 \approx 0,6—0,8$, что в 1,5—2 раза превышает значение η_0 для индукционных нагревательных установок (см. гл. 44).

Удельный расход электроэнергии на кондукционный нагрев стальных заготовок под обработку давлением составляет в зависимости от размера заготовки 220—370 кВт·ч/т.

2. Печи косвенного действия

Общая характеристика

Печи сопротивления косвенного действия являются печами-теплообменниками, в которых теплогенерация по закону Ленца—Джоуля происходит в нагревательных элементах, обладающих необходимыми электрофизическими свойствами (рис. 45-2). Эти печи наиболее широко распространены в различных отраслях

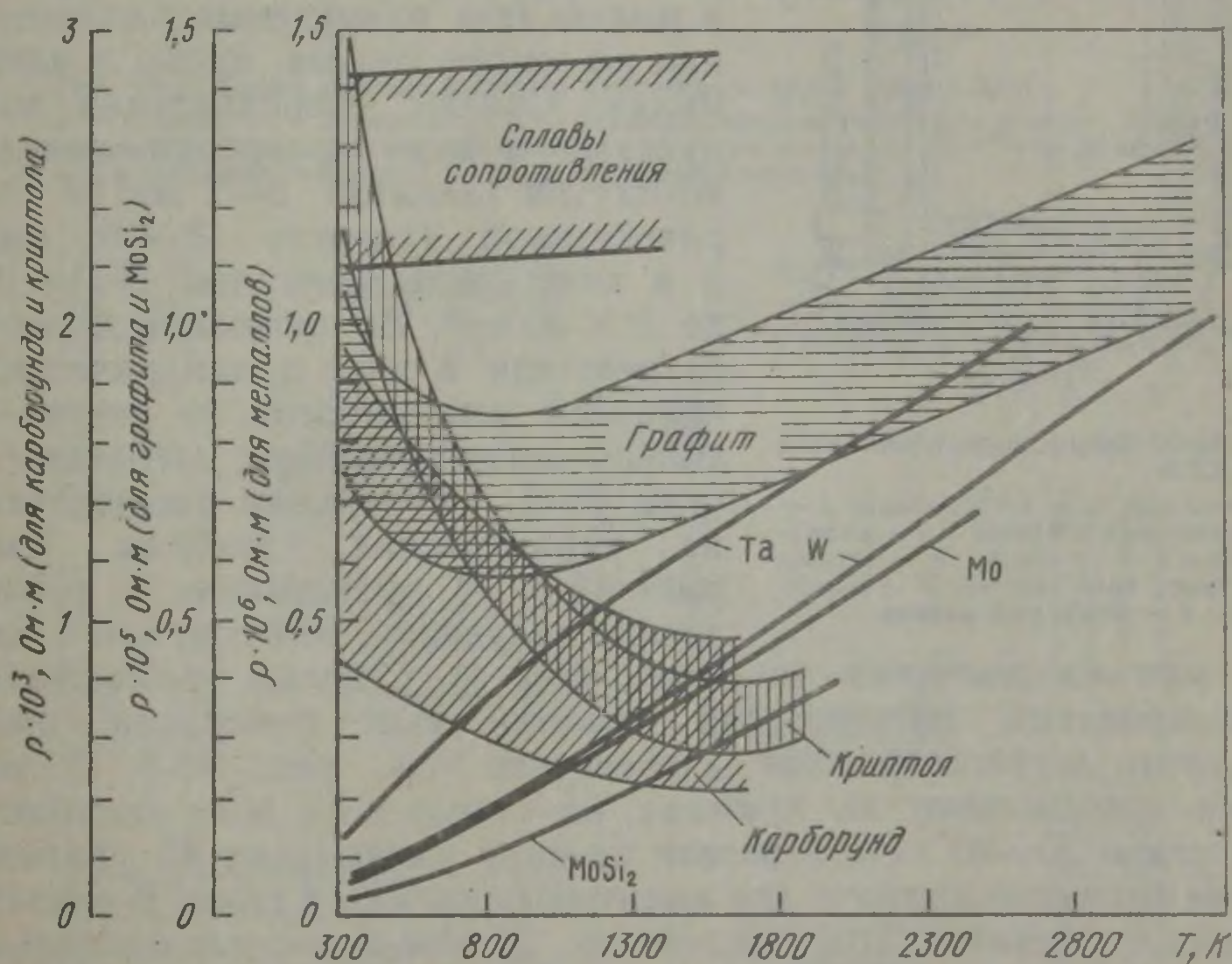


Рис. 45-2. Зависимость удельного электрического сопротивления от температуры для различных материалов, используемых для изготовления нагревательных элементов

народного хозяйства, в том числе в металлургии и машиностроении (см. гл. 42). По технологическому назначению печи косвенного действия можно разделить на нагревательные, термические, плавильные и сушильные печи; по температурному режиму — низко-, средне- и высокотемпературные печи; по виду среды в рабочем пространстве — открытые с воздушной (окислительной) атмосферой, вакуумные, вакуумно-компрессионные, с контролируемой искусственной атмосферой (инертные газы, водород, эндо- или экзотермические защитные смеси, технологические газы для термохимической обработки металлов и т. п.) и с жидким теплоноси-

телом (свинец, натрий, соли, щелочи, шлаки, кипящий слой); по роду работы и конструктивным признакам — садочные периодического действия: камерные, шахтные, колпаковые (рис. 45-3), элеваторные с подъемным подом, камерные с выдвижным подом (рис. 45-4), муфельные, соляные ванны, печи электрошлакового переплава и методические непрерывного действия: конвейерные, барабанные, карусельные, протяжные, толкательные, с рольганговым подом, с шагающим подом, с пульсирующим подом и т. п.

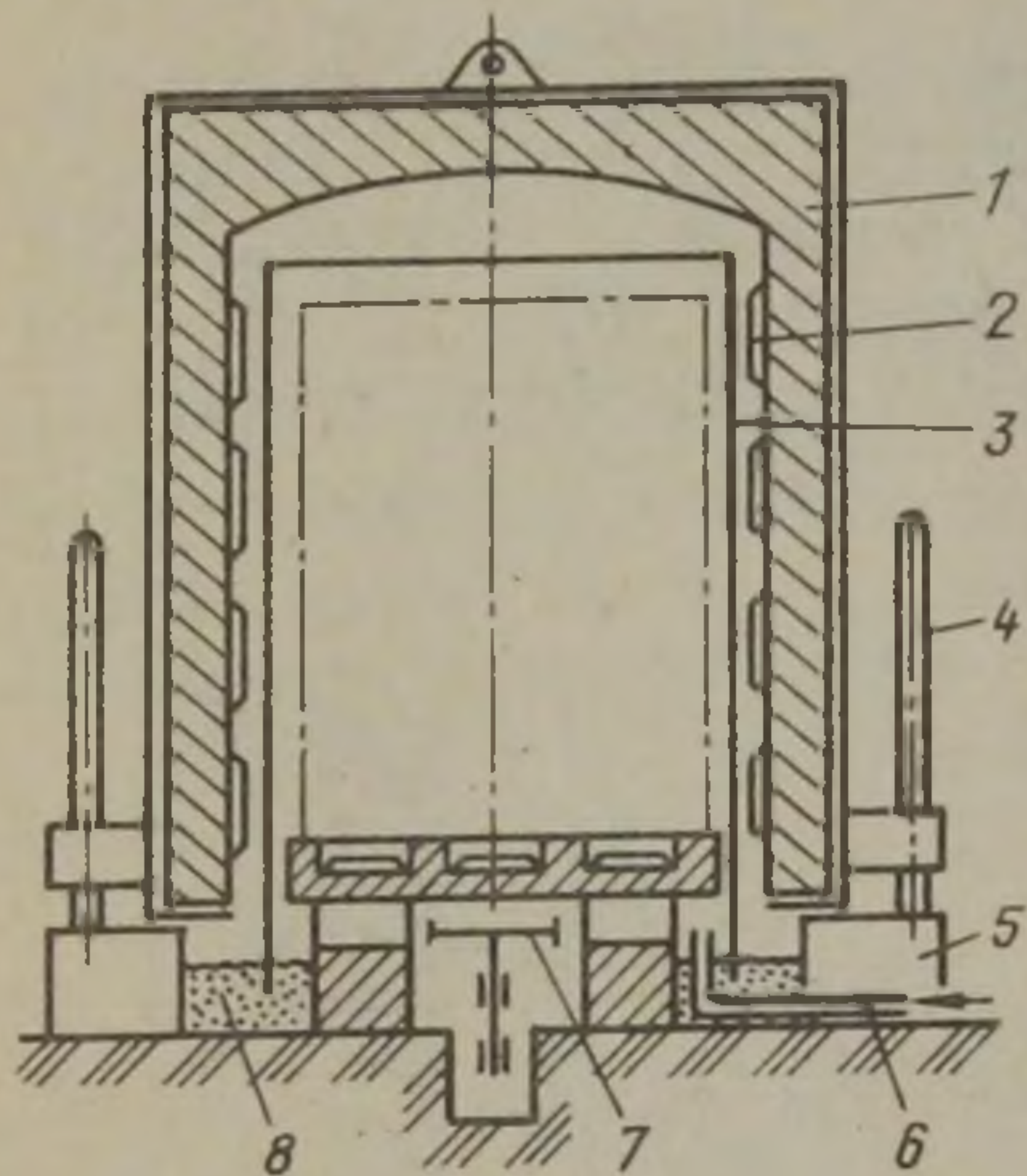


Рис. 45-3. Схема колпаковой печи типа СГЗ:

1 — колпак; 2 — нагреватели; 3 — жароупорный муфель; 4 — направляющие; 5 — стенд; 6 — подвод защитного газа (азота); 7 — вентилятор; 8 — песчаный затвор

зах или на полочках (см. рис. 45-5, а). С целью уменьшения экранирования нагревателей поверхностью футеровки проволочные зигзагообразные нагреватели (см. рис. 45-5, в) на своде подвешивают на крючках, на стенах и на поду выгибают под углом 20—30°. Нагреватели на поду укладывают на приподнятые фасонные кирпичи для защиты от окалины и сажи. В местах соприкосновения нагревателей из железо-хромо-алюминиевых сплавов с футеровкой обязательна укладка кирпичей из высокоглиноземистого шамота.

В агрессивных средах применяют закрытые нагреватели различной конструкции: на рабочие температуры до 1300 К радиационные трубы, в которых нагревательный элемент помещен внутрь герметичной жароупорной трубы; для нагрева соляных ванн — трубчатые иммерсионные нагреватели, в которых нагревательный элемент запрессован с теплопроводным и электроизоляционным наполнителем (оксид магния) в металлическую оболочку диаметром 10—16 мм.

В высокотемпературных печах применяют неметаллические нагреватели (см. рис. 45-2):

а) из карбида кремния (карборундовые электронагреватели

Нагреватели низко- и среднетемпературных печей изготавливают из сплавов сопротивления (см. рис. 45-2) на основе никеля, хрома и железа (так называемые нихромы) или на основе железа, хрома и алюминия. Сплавы сопротивления выпускают в виде проволоки холодной протянутой (диаметр 3—7 мм) и горячекатаной (диаметр 8—10 мм) и в виде ленты сечением от 1×10 до 3×30 мм². Из проволоки делают нагреватели в виде цилиндрических спиралей или зигзагов, из ленты — только зигзагообразные нагреватели (рис. 45-4). Спиральные нагреватели на керамических трубках (см. рис. 45-5, б) эффективнее с точки зрения излучения, чем спирали в па-

типа КЭН) в виде стержней с утолщенными концами — выводами (для токоподвода) или труб со спиральной прорезью. Рабочая температура 1600 К в воздушной среде;

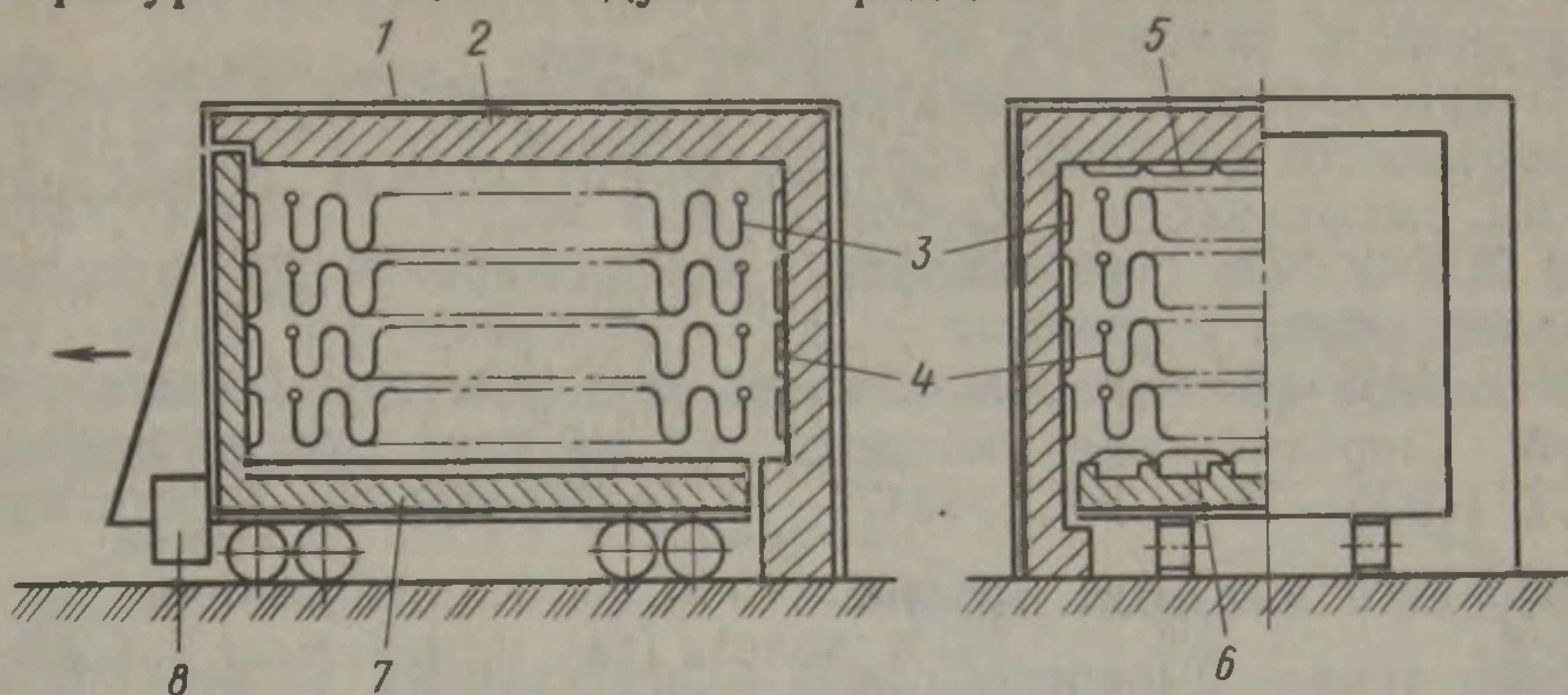


Рис. 45-4. Схема камерной печи с выдвижным подом типа СДО:

1 — кожух; 2 — футеровка; 3 — боковые нагреватели; 4 — задние нагреватели; 5 — сводовые нагреватели; 6 — подовые нагреватели; 7 — выдвижной под с передней стенкой; 8 — привод передвижения пода

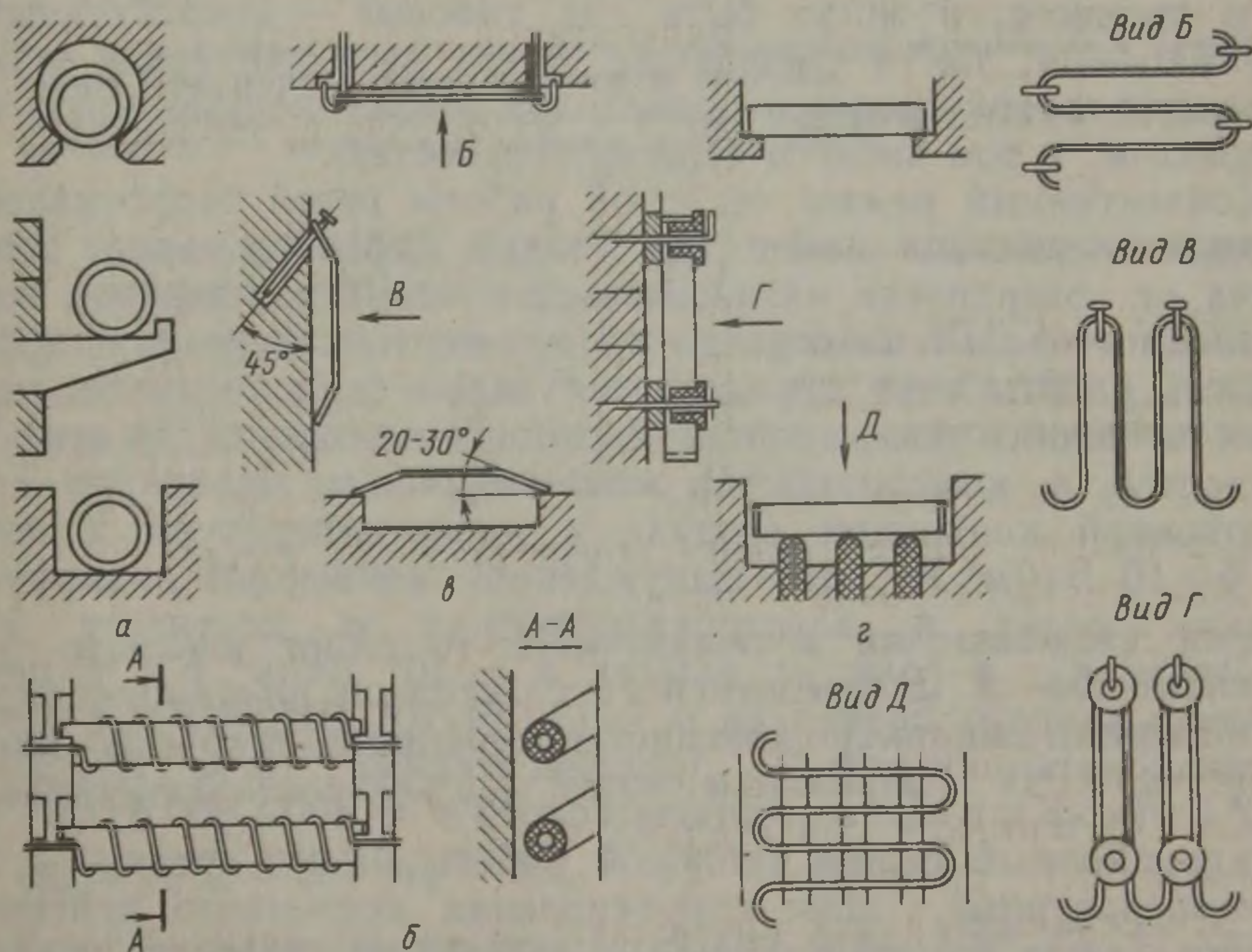


Рис. 45-5. Примеры конструкции и крепления нагревателей:

а — проволочные спиральные — на своде, стене и поде; б — проволочный спиральный на керамической трубке — на стене; в — проволочные зигзагообразные — на своде, стене и поде; г — ленточные зигзагообразные — на своде, стене и поде

б) из дисилицида молибдена (типа СМ) в виде тонких стержней диаметром 6 мм, U- или Г-образной формы. Рабочая температура 1900 К в окислительной атмосфере;

в) угольные и графитовые нагреватели в виде стержней, труб диаметром до 100—150 мм и длиной до 1,5 м (внутренняя полость

трубы может быть использована в качестве рабочего пространства). Рабочая температура около 1800—2000 К (при хорошей герметизации — до 2400 К), но малый срок службы в результате интенсивного окисления на воздухе;

г) криптоловые нагреватели из размолотого и термически обработанного нефтяного коксика фракций 7,0—1,5 мм или 1,5—0,5 мм, засыпанного в карборундовый желоб. Рабочая температура 2100 К. По мере окисления коксика производится подсыпка в желоб новых порций.

Условное обозначение и основные параметры отечественных печей сопротивления косвенного действия определены по ГОСТ 11995—75 и ГОСТ 13474—79 (лабораторные электропечи).

Особенности тепловой работы

Режимы тепловой работы печей сопротивления косвенного действия как печей-теплообменников определяются теплообменом между нагревательными элементами, являющимися зоной генерации тепла, и нагреваемым материалом, т. е. зоной технологического процесса, и могут быть как типовые — конвективный и радиационный, так и смешанные, когда передача тепла в зону технологического процесса происходит совокупностью видов теплопередачи, в том числе и теплопроводностью.

Конвективный режим тепловой работы печей сопротивления косвенного действия имеет три стадии переноса тепла: теплоотдача от поверхности нагревательного элемента, перенос тепла в теплоносителе и теплоотдача к поверхности нагрева, т. е. эффективность работы печи определяется видом теплоносителя, условиями обтекания поверхностей, соотношением площадей этих поверхностей и коэффициентом теплоотдачи α . Например, при естественной конвекции воздуха в низкотемпературных печах $\alpha \approx 5 \div 10$ Вт/(м²·К); при вынужденной конвекции в циркуляционных печах и электрокалориферах α достигает 50—500 Вт/(м²·К); в соляных ваннах $\alpha \approx 10^3$ Вт/(м²·К); в печах электрошлакового переплава $\alpha = (3 \div 6) \cdot 10^3$ Вт/(м²·К); в печах с жидкометаллическими теплоносителями $\alpha \approx (10 \div 30) \times 10^3$ Вт/(м²·К); в печах с кипящим слоем $\alpha \approx 400 \div 800$ Вт/(м²·К).

Радиационный режим тепловой работы имеют средне- и высокотемпературные¹ печи сопротивления косвенного действия. Выделяющаяся в нагревательных элементах тепловая энергия передается излучением окружающим телам, т. е. нагреваемому изделию и футеровке печной камеры (рис. 45-6). Простейший случай теплоотдачи представлен на рис. 45-6, а: сплошной нагреватель окружает со всех сторон нагреваемое изделие, будучи размещенным между ним и футеровкой. Футеровка и изделие «не

¹ Выделение двух температурных диапазонов (до и выше 1500 К) связано с возможностью применения нагревательных элементов из сплавов сопротивления (см. рис. 45-2).

видят» друг друга и между ними нет теплообмена. Теплообмен между нагревателем и изделием $\Phi_{н-о}$ происходит независимо от теплообмена между нагревателем и футеровкой $\Phi_{н-ф}$:

$$\Phi_{н-о} = P_{пол} = \sigma_{н-о} (T_n^4 - T_o^4) s_o; \quad (45-2)$$

$$\Phi_{н-ф} = P_{тп} = \sigma_{н-ф} (T_n^4 - T_f^4) s_n, \quad (45-3)$$

где $\sigma_{н-о}$ и $\sigma_{н-ф}$ — приведенные коэффициенты излучения соответствующих пар поверхностей; s_o — площадь тепловоспринимающей поверхности нагреваемого изделия; s_n — площадь теплоотдающей поверхности нагревателя.

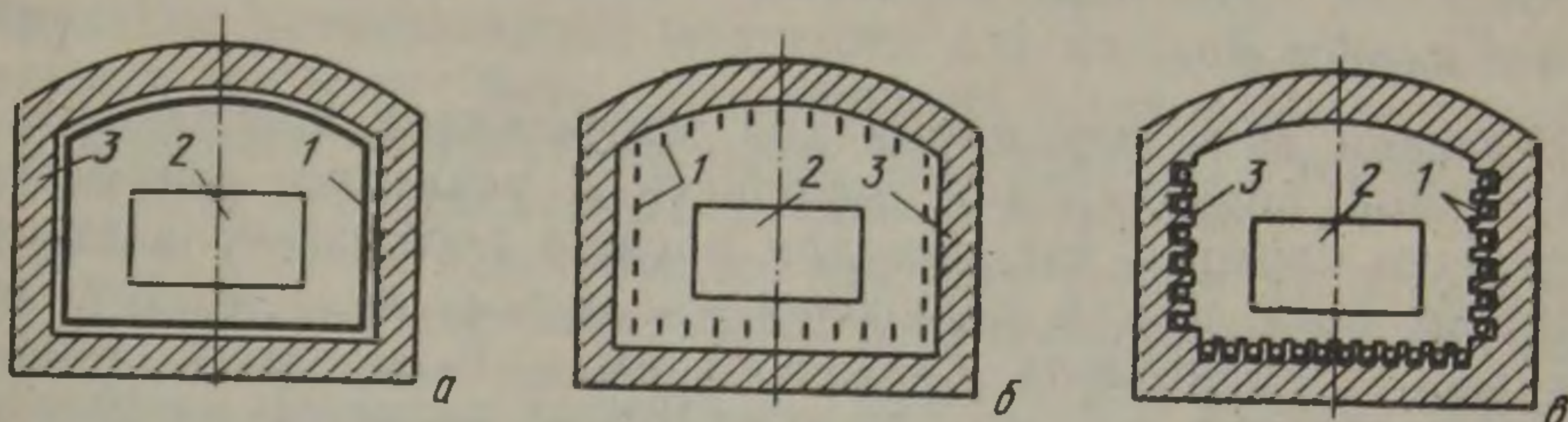


Рис. 45-6. Система тел, участвующих в радиационном теплообмене в печной камере печи сопротивления косвенного действия:
1 — нагреватель (а — сплошной; б — несплошной; в — уложен в пазах футеровки); 2 — нагреваемое изделие; 3 — футеровка

Из уравнений (45-2) и (45-3) могут быть определены температуры нагревателя T_n и футеровки T_f .

Если представить печь по варианту рис. 45-6, а с идеальной теплоизоляцией ($P_{тп} = 0$ и $P = P_{пол}$) и с практически равными площадями поверхностей нагреваемого изделия и нагревателя ($s_o \approx s_n$), то согласно уравнению (45-2)

$$P = \sigma_o (1/\epsilon_n + 1/\epsilon_o - 1)^{-1} (T_n^4 - T_o^4) s_n, \quad (45-4)$$

т. е. передача тепла от нагревателя к нагреваемому изделию пропорциональна поверхности нагревателя s_n и, следовательно, может быть охарактеризована понятием «удельная поверхностная мощность нагревателя» $q_{нд}$, Вт/см² или кВт/м²:

$$q_{нд} = P/s_n = \sigma_o (1/\epsilon_n + 1/\epsilon_o - 1)^{-1} (T_n^4 - T_o^4). \quad (45-5)$$

Если нагреватель не сплошной (см. рис. 45-6, б), то изделие и футеровка «видят» друг друга через просветы нагревателя и между ними существует теплообмен. В этом случае в теплообмене участвуют три «серых» тела: нагреватель, изделие и футеровка, образующих замкнутую систему. Часть излучения реального (не сплошного) нагревателя попадает на изделие, часть — на соседние грани нагревателя (самооблучение), часть — на футеровку, компенсируя тепловые потери печи. При этом футеровка может часть излучения нагревателя экранировать в зависимости от его расположения (см. рис. 45-6, в). Поэтому площадь теплоотдающей

поверхности такого нагревателя отличается от площади эквивалентного ему идеального нагревателя, т. е. излучающего на изделие ту же мощность при том же температурном напоре.

«Активной» (эффективной) поверхностью реального нагревателя принято считать излучающую поверхность эквивалентного ему идеального нагревателя, т. е. условно считают, что всякий нагреватель излучает не всей своей поверхностью $s_{\text{н}}$, а некоторой эффективной поверхностью $s_{\text{эф}}$:

$$P_{\text{пол}} = q_{\text{нд}} s_{\text{эф}} = q s_{\text{н}} \eta_{\text{т}}, \quad (45-6)$$

откуда

$$q = q_{\text{нд}} \eta_{\text{т}}^{-1} s_{\text{эф}} / s_{\text{н}}. \quad (45-7)$$

В общем виде выражения для эффективной поверхности $s_{\text{эф}}$ и удельной поверхностной мощности q реального нагревателя достаточно сложны, так как для расчета необходимо знать три взаимные поверхности излучения ($s_{\text{н-о}}$, $s_{\text{н-ф}}$, $s_{\text{ф-о}}$) и три приведенных коэффициента излучения ($\sigma_{\text{н-о}}$, $\sigma_{\text{н-ф}}$, $\sigma_{\text{ф-о}}$), которые можно рассчитать только для конкретных размеров нагревателя с учетом особенностей его конструктивного исполнения. Поэтому для предварительных расчетов в (45-7) вводят поправочный коэффициент эффективности $k_{\text{эф}}$:

$$q = k_{\text{эф}} q_{\text{нд}}, \quad (45-8)$$

где $k_{\text{эф}} \approx 0,16—0,44$ — для различных типов нагревателей.

В некоторых конструкциях печей (например, лабораторные муфельные печи, печи с трубчатыми иммерсионными нагревателями) нагревательные элементы заделывают в сплошную керамическую массу, через которую передача тепла осуществляется теплопроводностью. В этом случае условия теплоотдачи характеризуют тепловым сопротивлением керамической изоляции и эффективной поверхностью нагревателя.

Температурный режим, время нагрева, выдержки и остывания изделий определяется технологическим процессом, т. е. может быть задано, определено из опыта работы «образцовой» печи или рассчитано по законам теплопередачи (см. том I). Зная время нагрева $t_{\text{н}}$ или производительность M печи заданной конструкции, рассчитывают тепловые потери печной камеры и составляют энергетический баланс энергии (42-2, а) для периодических печей или мощности (42-2, б) для методических печей.

Установленную мощность печи определяют по максимальной потребной мощности $P_{\text{н}}$ с учетом коэффициента избытка (запаса) мощности k_3 :

$$P_{\text{уст}} = k_3 P_{\text{н}}. \quad (45-9)$$

Избыток установленной мощности против максимальной потребной необходим для компенсации возможного снижения сетевого напряжения или увеличения сопротивления нагревательного

элемента из-за старения материала, для обеспечения повышенной теплогенерации при разогреве холодной печи (особенно с массивной футеровкой) и на первом этапе нагрева при постоянной плотности полезного теплового потока.

При проектировании печей периодического действия коэффициент k_3 принимают:

Мощность печи, кВт	<100	100—300	>300
k_3	1,3—1,6	1,25—1,5	1,2—1,4

Печи сопротивления непрерывного действия делают многозонными (минимум две зоны — нагрева и выдержки), что требует определения установленной мощности для каждой зоны. Длины отдельных зон могут быть и одинаковыми и различными. Обычно длину выбирают из конструктивных соображений: в горизонтальных — 1,3 м, в вертикальных на 30—40 % короче.

Так как в печах непрерывного действия температуры нагревателей в разных зонах могут быть неодинаковыми, то тепловые потери рассчитывают по средним температурам зон и мощность печи определяют по зонам. Следует отметить, что иногда мощность последних зон получается очень маленькая и ее увеличивают против расчетной из соображений более быстрого прогрева их при пуске в ход холодной печи, принимая в (45-9) $k_3 = 3—5$ и выше.

Технико-экономические показатели

Как уже отмечалось, печи сопротивления косвенного действия являются самыми массовыми электрическими печами с очень широким диапазоном параметров, разнообразным технологическим назначением и, как следствие, разным уровнем технико-экономических показателей. Например, печи, предназначенные для поддержания заданной температуры твердого, жидкого или газообразного продукта, не имеют полезной мощности, т. е. тепловой и общий к. п. д. равны нулю. Как правило, малое значение к. п. д. имеют различные лабораторные печи сопротивления. Для промышленных печей сопротивление косвенного действия тепловой к. п. д. колеблется от 0,15 до 0,7. Это определяет необходимость рациональной эксплуатации печей:

а) повышение надежности работы, в первую очередь зависящей от ресурса службы нагревательных элементов;

б) повышение производительности (табл. 45-1);

в) уменьшение тепловых потерь, особенно в печах непрерывного действия путем улучшения тепловой изоляции, чтобы температура наружной поверхности кожуха печи не превышала 315—330 К, а плотность потока тепловых потерь — не более 0,3—0,5 кВт/м²;

г) снижение потерь тепла, аккумулируемого футеровкой, особенно, в печах периодического действия за счет применения более легких и более эффективных огнеупорных и теплоизоля-

Т а б л и ц а 45-1. Влияние изменения производительности на энергетические показатели работы печи сопротивления

Показатель	Производительность, %				
	50	75	100	150	200
<i>Тепловые потери 25 %</i>					
$\eta_{\text{Т}}$, %	0,6	0,69	0,75	0,83	0,875
$W_{\text{у}}$, %	125	108,3	100	91,6	87,5
<i>Тепловые потери 50 %</i>					
$\eta_{\text{Т}}$, %	0,33	0,43	0,5	0,6	0,67
$W_{\text{у}}$, %	150	116,5	100	83	75

ционных материалов или экранной изоляции в виде листов асбеста, оклеенных с обеих сторон алюминиевой фольгой (при температуре не выше 700—800 К);

д) использование тепла нагретых изделий путем передачи тепла от охлаждаемых «горячих» изделий к подогреваемым «холодным» в специальных рекуперативных камерах печей периодического действия (утилизация 20—25 % тепла) или при использовании принципа противотока, создавая встречное движение изделий в печах непрерывного действия (утилизация более 50 % тепла).

3. Вакуумные печи сопротивления

Общая характеристика

Нагрев в вакууме и инертных газах обеспечивает защиту химически активных металлов от окисления и их рафинирование при очень высоких температурах. Различают вакуумные печи: низкотемпературные с $T_{\text{раб}} < 1400—1500$ К (нагреватели из сплавов сопротивления), среднетемпературные с $T_{\text{раб}} = 1500—2000$ К (нагреватели из молибдена) и высокотемпературные с $T_{\text{раб}} = 2000—2800$ К (нагреватели из вольфрама, тантала, графита или тугоплавких карбидов).

По режиму работы и конструкции вакуумные печи могут быть:

а) периодического действия, когда загрузка садочной печи связана с повышением давления в печи до атмосферного — камерные, шахтные (рис. 45-7), элеваторные и колпаковые;

б) полунепрерывного действия, когда в условиях периодического нагрева загрузка и выгрузка садки происходит без нарушения вакуума в нагревательной камере, через одну или две

(загрузочная и разгрузочная) шлюзовые камеры — шахтные и элеваторные;

в) непрерывного действия, когда методический нагрев обеспечивается непрерывной или дискретной загрузкой и выгрузкой нагреваемого материала и постоянным его перемещением от загрузочной к разгрузочной стороне печи — толкательные, туннельные, с шагающим подом, рольганговые и протяжные.

Вакуумные печи сопротивления работают с низким (остаточное давление выше 100 Па), средним (10—0,1 Па), высоким (10^{-2} — 10^{-4} Па) и сверхвысоким вакуумом (остаточное давление ниже 10^{-5} Па).

Низковакуумные печи должны иметь хорошо герметизированный кожух и малое натекание наружного воздуха; конструкция и материалы футеровки, как правило, не оказывают существенного влияния на работу таких печей. Средневакуумные печи могут иметь керамическую футеровку, но весьма чувствительны к ее количеству, конструкции и пористости материалов из-за обильного газоотделения в вакууме. Высоковакуумные печи должны

иметь экранную тепловую изоляцию и незначительное количество керамических деталей. Сверхвысоковакуумные печи требуют особого подхода к их конструированию, поскольку обычно применяемые в вакуумных печах материалы (например, вакуумная резина) и насосы становятся непригодными, а металлоконструкции, работающие в таком вакууме, требуют специальных устройств для их обезгаживания. В низкотемпературных и сверхвысоковакуумных печах сопротивления рабочее пространство создают в жароупорном муфеле по схеме «вакуум в вакууме».

К вакуумным печам относят также печи сопротивления, в которых процесс нагрева происходит в инертной атмосфере при нормальном или избыточном (2,5—5 МПа) давлении, но которые перед заполнением газом вакуумируют.

Наиболее распространенными вакуумными печами сопротивления являются садочные вертикальные печи с цилиндрическим рабочим пространством (см. рис. 45-7). Такие печи применяют для обработки сравнительно небольших садок высотой 500—700 мм при отношении высоты к диаметру порядка 2—4. В этом случае садку располагают внутри трубчатого нагревателя, выполненного из проволоки, стержней или листа (из графита трубу вытачивают). Соотношение размеров таких нагревателей цилиндрической формы определяет малое сопротивление, а большой температурный коэффициент удельного электрического сопротивления тугоплавких металлов, из которых делают нагреватели (см.

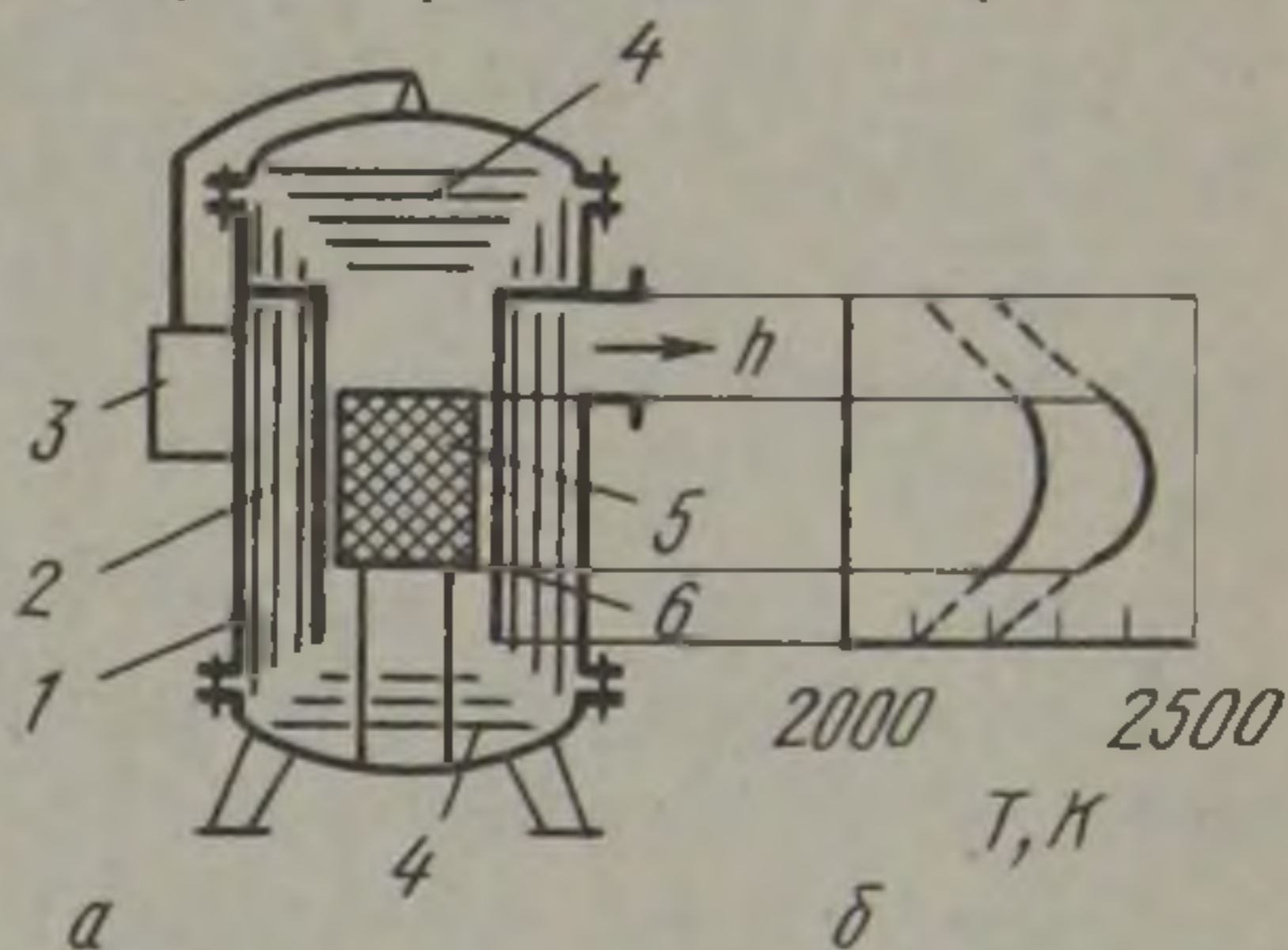


Рис. 45-7. Схема (а) и распределение температуры по высоте (б) шахтной вакуумной печи сопротивления: 1 — кожух; 2 — боковые экраны; 3 — механизм подъема и поворота крышки; 4 — торцевые экраны; 5 — нагреваемый материал (садка); 6 — нагреватель

рис. 45-2) — резкое изменение его во времени разогрева. Поэтому вакуумные печи работают с управляемыми блоками питания на магнитных усилителях типа РУ или тиристорных типа РНТ.

Особенности тепловой работы

Вакуумные печи сопротивления косвенного действия являются печами-теплообменниками с радиационным режимом тепловой работы. В случае расположения нагреваемого материала внутри нагревателя (см. рис. 45-7) имеет место прямой направленный теплообмен согласно (45-2). При этом тепловые потери через торцевые отверстия цилиндрического нагревателя ухудшают равномерность температурного поля на поверхности нагрева (см. рис. 45-7, б). Для создания достаточно равномерного температурного поля по высоте садки высоту нагревателя делают в 1,5—2,5 раза больше при минимальном радиальном зазоре. Торцевые металлические экраны (см. рис. 45-7) могут быть отражателями-рефлекторами, возвращающими падающее на них излучение на поверхность нагрева, т. е. создающими косвенный направленный теплообмен в этих частях вакуумной печи.

Во всех вакуумных печах периодического, полунепрерывного и непрерывного действия с целью сокращения времени охлаждения садки целесообразно при достижении в процессе охлаждения 900—1100 К напускать в камеру охлаждения инертный газ. В некоторых электропечах в камерах предусмотрены вентиляторы, обеспечивающие при напуске инертного газа интенсивное перемешивание газа и значительное ускорение остывания садки.

Водоохлаждаемые металлические кожухи вакуумных печей сопротивления, изготавливаемые обычно из нержавеющей стали с обработкой до чистоты 7—9 класса, представляют собой так называемое холодное ограждение. Поэтому для предотвращения интенсивного переноса тепла на внутреннюю поверхность кожуха приходится применять футеровку с учетом вакуумных требований. В низко- и средневакуумных печах футеровку изготавливают из полновесного, легковесного или ультралегковесного шамотного кирпича (в низкотемпературных печах), легковесного корундового кирпича, высокоогнеупорных оксидов алюминия или циркония (в среднетемпературных печах), графита в виде засыпки, войлока или ткани (в высокотемпературных печах с графитовыми нагревателями). Вакуумные печи сопротивления на средние и высокие температуры в условиях высокого и сверхвысокого вакуума имеют экранную теплоизоляцию. Экраны изготавливают из вольфрама (при температуре свыше 2000 К), молибдена (1400—2000 К) и жароупорной стали (до 1400 К) в виде плоских или цилиндрических листов толщиной 0,1—0,4 мм (см. рис. 45-7). В печах с графитовыми нагревателями применяют радиационные экраны из графита. Поверхность таких экранов не обладает до-

статочной отражательной способностью, но последовательное расположение нескольких экранов сводит лучистый поток в сторону кожуха к минимуму.

Технико-экономические показатели

Малое полезное сопротивление нагревателя вакуумной печи сопротивления приводит к протеканию во вторичном токоподводе больших токов силой в несколько тысяч ампер и снижению электрического к. п. д. Тепловые потери через экранную теплоизоляцию достигают 60—75 % и более. Таким образом, вакуумные печи сопротивления косвенного действия являются электротехнически и теплотехнически несовершенными электропечными установками. Поэтому их применение может иметь только технологическое технико-экономическое обоснование.

При эксплуатации вакуумных печей сопротивления необходимо соблюдать требования по вакуумной гигиене. Перед вскрытием печи целесообразно заполнять вакуумную камеру хорошо просушенным газом и прекратить подачу охлаждающей воды в кожух, чтобы избежать осаждения влаги на стенках и облегчить последующую откачку печи. При чистке внутренних поверхностей следует соблюдать предосторожность ввиду опасности воспламенения возможных пирофорных возгонов.

4. Плавильные печи сопротивления

Общая характеристика

Алюминий и его сплавы переплавляют в тигельных (типа САТ) и камерных (типа САК); медь и другие цветные металлы с температурой плавления до 1500 К — в барабанных печах (типа СМБ); сталь рафинируют способом переплава¹ в расплавленном шлаке специального состава (печи электрошлакового переплава — ЭШП); ряд цветных металлов получают в результате многошлаковых процессов в рудовосстановительных печах, работающих в режиме теплогенерации по закону Ленца—Джоуля (см. гл. 43); тугоплавкие металлы в лабораторных условиях плавят в расплаве оксидов (так называемые «электромагматические» печи).

Тигельные печи сопротивления имеют две конструкции: металлический тигель устанавливают в печной камере с нагревателями (внешний обогрев) или трубчатые иммерсионные нагреватели опускают в тигель (внутренний обогрев). Жидкий металл сливают путем наклона тигля (тип САНТ) или способом пневматического вытеснения под давлением (раздаточные печи типа САТ). Камерные раздаточные печи (емкостью до 1,6 т) и миксеры (до 40 т)

¹ Процесс электрошлакового переплава разработан в институте электросварки им. Е. О. Патона АН УССР в 1952—1957 гг.

имеют ванну («металлосборник»), обогреваемую сверху металлическими (тип САКМ) или карборундовыми нагревателями до 1000—1100 К.

Барабанные печи имеют стержневой графитовый нагреватель, расположенный по оси печи. Поворот барабана для слива металла на угол 15—80° можно использовать также для перемешивания жидкой ванны и снижения температуры свободной поверхности футеровки.

В печах ЭШП (рис. 45-8) нагревателем служит ванна жидкого шлака, в которую опускают переплавляемый (расходуемый) стальной электрод. Теплогенерация при силе тока 10—50 кА обеспечивает поддержание температуры шлака 2000—2300 К и оплавление («переплав») электрода. Жидкий металл собирается на поддоне водоохлаждаемого кристаллизатора, постепенно методом направленной кристаллизации формируясь в слиток высококачественной стали. Современные печи ЭШП позволяют получать слитки массой до 200 т.

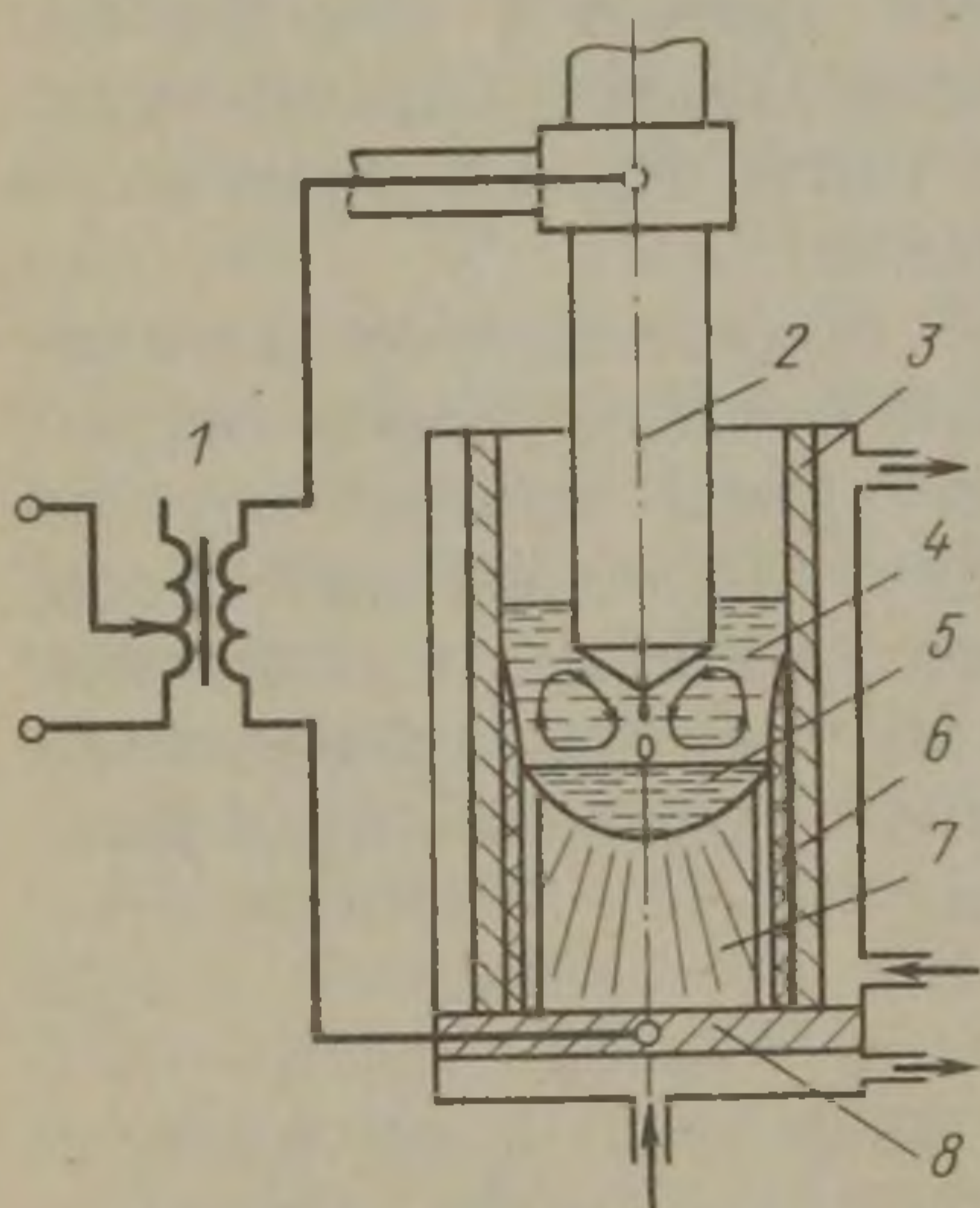


Рис. 45-8. Схема печи электрошлакового переплава:

1 — электропечной трансформатор;
2 — расходуемый электрод; 3 — кристаллизатор; 4 — шлаковая ванна; 5 — металлическая ванна; 6 — шлаковый гарнисаж; 7 — слиток; 8 — поддон

Особенности тепловой работы печей ЭШП

Тепловая мощность, генерируемая в шлаке по закону Ленца — Джоуля, отводится через граничные поверхности, причем теплопередача на торце электрода и на поверхности кристаллизатора протекает

в условиях фазовых превращений (оплавление электрода и затвердевание шлака с образованием шлакового гарнисажа толщиной 2—3 мм). Расходуемый электрод нагревается и плавится в результате внешней теплопередачи от шлаковой ванны: через торец — теплопроводностью, через боковую поверхность — излучением с зеркала шлаковой ванны и внутренней теплогенерации по закону Ленца—Джоуля. Однако на расстоянии от зеркала ванны более одного диаметра электрода роль внешнего теплообмена снижается и температура электрода стабилизируется на уровне 600—750 К в зависимости от силы тока. По мере оплавления и опускания электрода в результате теплообмена температура его поверхности резко возрастает, достигая 1400—1500 К. Погружаясь в шлаковую ванну с температурой 2000—2300 К (в зависимости от электрической мощности и теплофизических свойств шлака), электрод оплавляется. На торце формируется подвижная пленка расплавленного металла толщиной около 1 мм, удерживаемая поверхностными силами межфазного натяжения. При этом

металл перегревается на 35—50 К и рафинируется от неметаллических включений.

Электродный металл, стекая каплями с оплаваемого торца, падает в жидкометаллическую ванну слитка. Тепловой поток от шлаковой ванны достигает 0,7—0,9 МВт/м² при объемной плотности теплогенерации 60—120 МВт/м³. Электродинамическая конвекция при скорости движения шлака 0,05—0,1 м/с и глубине шлаковой ванны 0,06—1,0 м характеризуется коэффициентом теплопередачи порядка 3—6 кВт/(м²·К), увеличиваясь с усилением движения и ростом объема жидкой ванны. Часть теплового потока расходуется на дополнительный перегрев жидкого металла в ванне слитка, а часть передается теплопроводностью через металлическую ванну и слиток к кристаллизатору и поддону. При расчетах тепловых потерь через ванну по закону Фурье для учета электродинамического перемешивания жидкого металла вводят эффективный коэффициент теплопроводности, превышающий теплопроводность спокойного металла в 5—7 раз.

В результате сложной теплопередачи от шлаковой ванны через гарнисаж и стенку кристаллизатора отводится максимальный тепловой поток плотностью до 1,2—1,5 МВт/м². Высокие тепловые нагрузки кристаллизатора определяют необходимость интенсивного его охлаждения во избежание деформации, преждевременного выхода из строя и даже взрыва.

Более высокая теплопроводность меди, из которой изготавливают кокиль кристаллизатора, обеспечивает некоторое усреднение пиковых тепловых нагрузок на внешней, охлаждаемой поверхности кокиля. Для создания конвективного режима охлаждения, исключая кипение теплоносителя, с коэффициентом теплоотдачи более 10⁴ Вт/(м²·К) требуется иметь скорость протекания воды вдоль охлаждаемой поверхности в пределах 2—2,5 м/с. Так работают кристаллизаторы закрытого типа, где вода протекает в полости «рубашки» охлаждения или просверленных каналов.

В кристаллизаторах полужакрытого типа применен принцип теплоотвода кипящим теплоносителем, что значительно снижает его расход. Расход воды в печах ЭШП составляет 50—500 м³/ч.

Технико-экономические показатели

Малое активное сопротивление шлаковой ванны предопределяет работу ЭШП на напряжениях в несколько десятков вольт, что при высокой мощности крупных печей вызывает протекание в токоподводе токов силой в десятки тысяч ампер. Поэтому электрический к. п. д. установок ЭШП не очень высокий, составляя 0,65—0,85. Большие тепловые потери в шлаковой ванне, особенно через стенку кристаллизатора (40—70 %), делает процесс ЭШП как процесс переплава стали в водоохлаждаемом кристаллизаторе теплотехнически несовершенным ($\eta_T \approx 0,15 \div 0,40$).

Удельный расход электроэнергии в печах ЭШП $\bar{W}_y \approx 1 \div \div 2$ кВт·ч/кг. Поэтому применение печей ЭШП оправдано только в тех случаях, когда требуется металл особо высокого качества, который в печах другого типа получить не представляется возможным.

Глава 46

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПЕЧИ

1. Установки диэлектрического нагрева

Общая характеристика

В соответствии с принципом теплогенерации (см. том I) установки диэлектрического нагрева применяют для нагрева непроводящих материалов в электрическом высокочастотном поле, например,

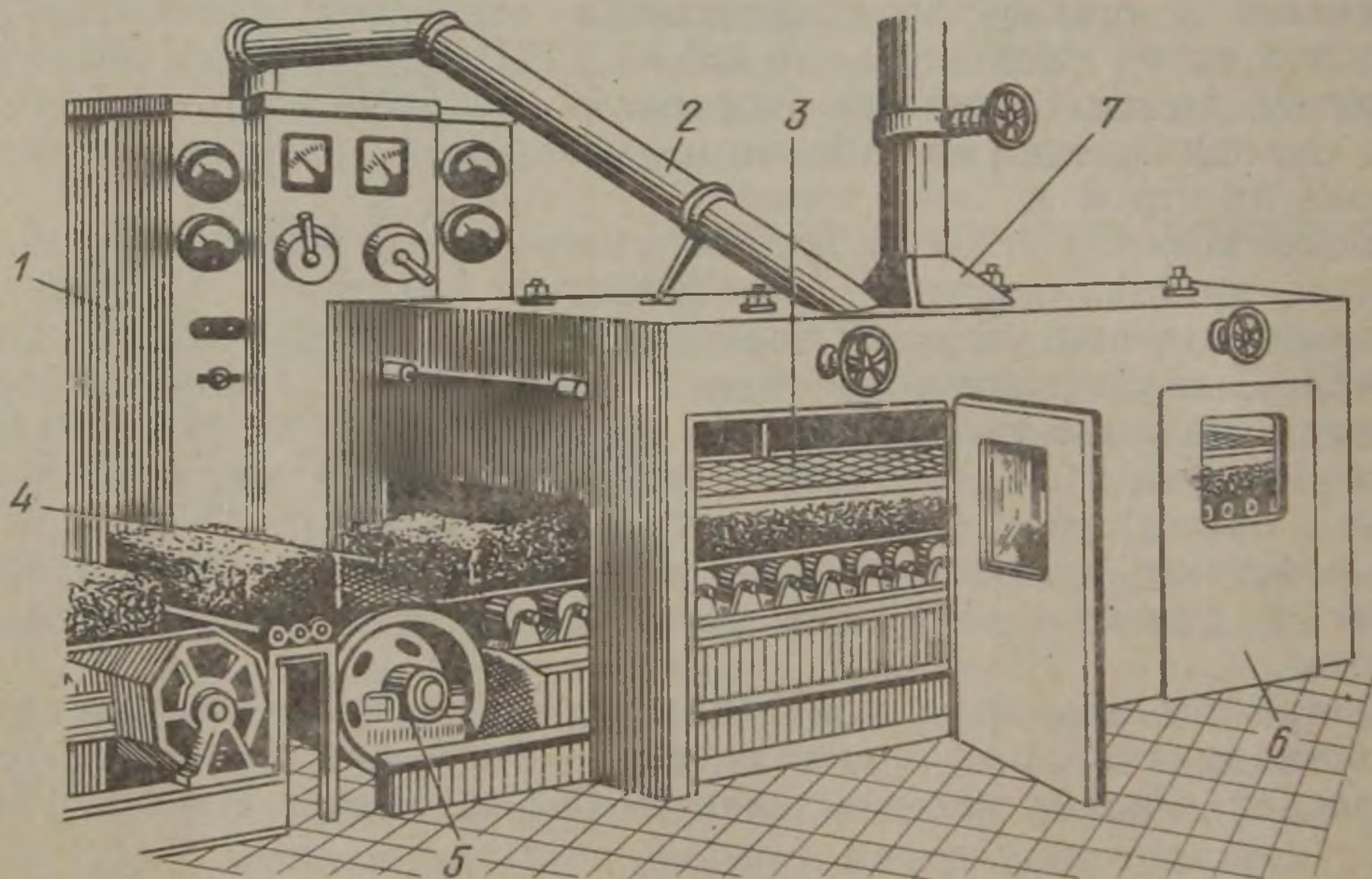


Рис. 46-1. Установка для сушки литейных стержней:

1 — генератор высокой частоты; 2 — токоподвод; 3 — верхняя пластина конденсатора; 4 — нагреваемые стержни; 5 — привод конвейера; 6 — кожух; 7 — система вентиляции

при сушке литейных стержней и форм (рис. 46-1). Основным элементом установки является рабочий конденсатор с плоскопараллельными электродами в виде решетчатых пластин. В установках непрерывного действия нагреваемые изделия перемещают между электродами на конвейере (см. рис. 46-1); в установках периодического действия материалы нагревают в рабочих каме-

рах, металлическая подина которых служит нижним электродом. Возможно одностороннее расположение обоих электродов, если допустимо неравномерное электрическое поле и, соответственно, неравномерная теплогенерация в объеме нагреваемого материала.

При сушке на конвейере изделий сложной конфигурации между электродами рабочего конденсатора имеется воздушный зазор, насыщенный водяными парами и возгонами других веществ в результате сушки. Это ограничивает допустимую напряженность электрического поля в пределах 200—400 В/см, что позволяет достигать при рабочих частотах 13,56 или 27,12 МГц интенсивности теплогенерации $q_v \approx 1 \div 8$ Вт/см³ (установки типа ВЧД).

Особенности тепловой работы

Установки диэлектрического нагрева являются печами-теплогенераторами с электрическим режимом тепловой работы. В однородном материале возможна равномерная теплогенерация по всему объему ($q_v = \text{const}$) зоны технологического процесса, что способствует быстрому нагреву массивных тел с малой теплопроводностью. Однако температура поверхности вследствие теплообмена по закону Ньютона будет ниже температуры внутренних слоев материала. Поэтому и в установившемся режиме нагрева устанавливается некоторый максимальный температурный перепад, опасный возможностью теплового пробоя диэлектрика, и температурный градиент, опасный по причине механических напряжений и деформаций, могущих привести к растрескиванию и разрушению изделия.

При сушке литейных стержней энергия теплогенерации расходуется на нагрев самих стержней до 410—420 К, на испарение (фазовое превращение) и удаление влаги (когда влажность практически уменьшается с 2,5—3 % до нуля) и на компенсацию тепловых потерь. При достигаемом нагреве стержней выше 373 К происходит очень быстрый процесс «выпаривания» влаги во всем объеме материала с последующим удалением водяных паров вследствие хорошей газопроницаемости стержней в систему вентиляции установки (см. рис. 46-1). Продолжительность сушки составляет в зависимости от технологии 2—20 мин, сокращаясь в десятки раз по сравнению с обычной тепловой сушкой в конвективном сушиле.

Для материалов-смесей с различными значениями коэффициентов диэлектрических потерь можно осуществить избирательный нагрев путем подбора электрических параметров (выбор частоты поля, расположение материала относительно силовых линий электрического поля). Такой избирательный нагрев можно применять для термообработки литейных стержней, заключающейся в расплавлении и полимеризации литейного крепителя, при сборке оболочковых форм (склеивание полуформ), для выплавления моделей и прокаливания форм точного литья и т. п.

Современные высокочастотные преобразователи имеют электрический к. п. д. в зависимости от диапазона частот в пределах 0,3—0,6. Тепловой к. п. д. диэлектрического нагрева зависит от технологии нагрева и сушки и составляет 0,8—0,9, увеличиваясь при ускорении процесса. Общий к. п. д. получается невысоким. Поэтому целесообразность применения установок диэлектрического нагрева требует технико-экономического обоснования.

2. Электронно-лучевые печи

Общая характеристика

Электронно-лучевые печи (установки электронного нагрева) в настоящее время являются неотъемлемой частью качественной металлургии. Их используют как в лабораторных, так и в производственных условиях. Процессы нагрева, расплавления, рафинирования и термообработки в условиях сильно пониженных давлений (вакуума) нужны для получения и переработки сверхчистых металлов и специальных сплавов. Электронный нагрев позволяет создать практически любые температуры, что особенно важно для получения и переработки тугоплавких металлов. Кроме того, процесс передачи энергии электронным лучом отличается от других процессов большой чистотой и сравнительной простотой.

В настоящее время эксплуатируют мощные промышленные установки, которые позволяют изготовить слитки с массой до 18 т. Мощность этих установок изменяется в широком диапазоне от 10 до 3000 кВт. Имеется уже большой производственный опыт по переплавлению меди, никеля, железа, титана, циркония, ниобия, молибдена, тантала, вольфрама, различных сплавов и радиоактивных материалов. Установки высоко механизированы и автоматизированы.

Основной элемент таких установок — электронные пушки. Электронно-лучевые печи изготовляют с различными типами электронных пушек, которые разделяются по принципу действия на две группы: электростатические и магнетронные. Мощность электронных пушек различна — от нескольких киловатт до мегаватта и больше на пушку.

В СССР, ГДР, ФРГ и США выпускают широкий набор типовых электронных печей, имеющих как по одной, так и по несколько пушек на печную установку.

Электронные пушки

Электростатические пушки. Их изготовляют трех типов: с кольцевым катодом, радиальные и аксиальные. Пушки всех этих типов находят практическое применение.

Электронные пушки с кольцевым катодом являются наиболее простыми по конструкции (рис. 46-2). Катод 1 действует в электрическом поле непосредственно на анод 2, которым является переплавляемый металл. Анод при этом расходует. Обычно применяют экран электростатической фокусировки 3. Переплавленный металл 5, находящийся в кристаллизаторе 4, также используется как анод. Таким образом электронный пучок 6 направляется на анод — расходующий и на анод — ванну. Используют кольцевые

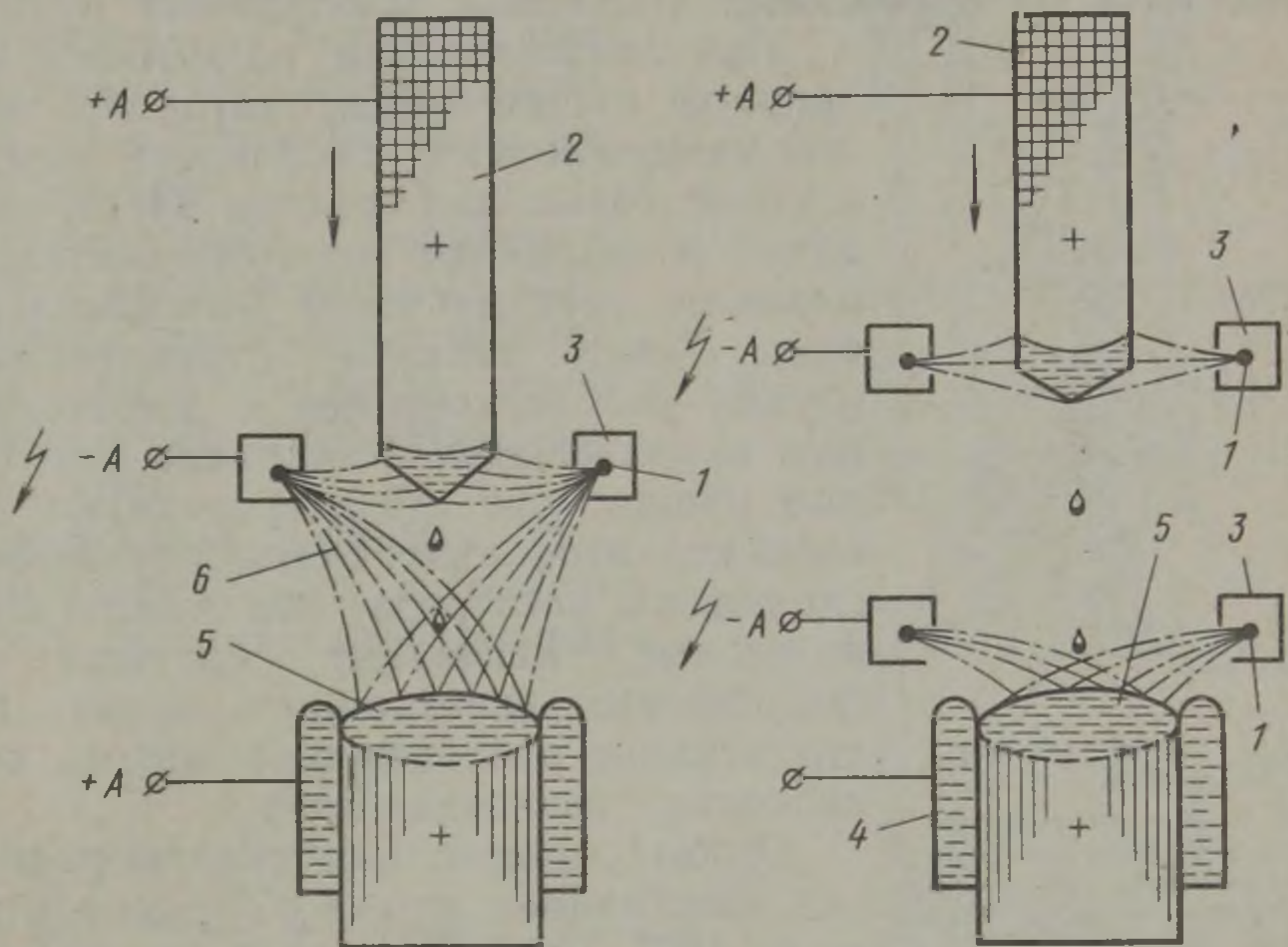


Рис. 46-2. Схема плавильной печи с кольцевым катодом:
 а — с одним; б — с двумя катодами

катоды различной формы: плоские, конусообразные без дополнительной фокусировки и конусообразные с фокусировкой пучка.

Основным достоинством кольцевых пушек является повышенная мощность электронного пучка благодаря развитой поверхности катода. Иногда принимают два кольцевых катода с фокусировкой либо на расходующий анод, либо на анод—ванну (рис. 46-2, б). Из-за геометрического расположения катода вокруг анода почти все электроны, эмиттируемые катодом, достигают анода. Проводимость составляет $\rho \approx 10 \text{ мкА/В}^{1.5}$. Используют обычно ускоряющее напряжение до 15 кВ. С подобными электронными пушками применяют печи с мощностью от одного до 225 кВт.

Недостатками этих пушек являются:

сложность смены катода;

неуниверсальность пушки, так как каждый диаметр кристаллизатора требует катода определенного размера;

работа катода должна осуществляться при низком давлении в рабочей камере ($\ll 10^{-2} \text{ Па}$);

сложность создания отдельного вакуума для катода; при переплаве неизбежно возникает газыделение из переплавляемого металла, что приводит к износу вакуумных насосов; пары металлов попадают на катод и постепенно разрушают его;

наличие высоковольтного напряжения на переплавляемом металле.

В силу перечисленных недостатков в настоящее время часто отказываются от применения кольцевых электронных пушек.

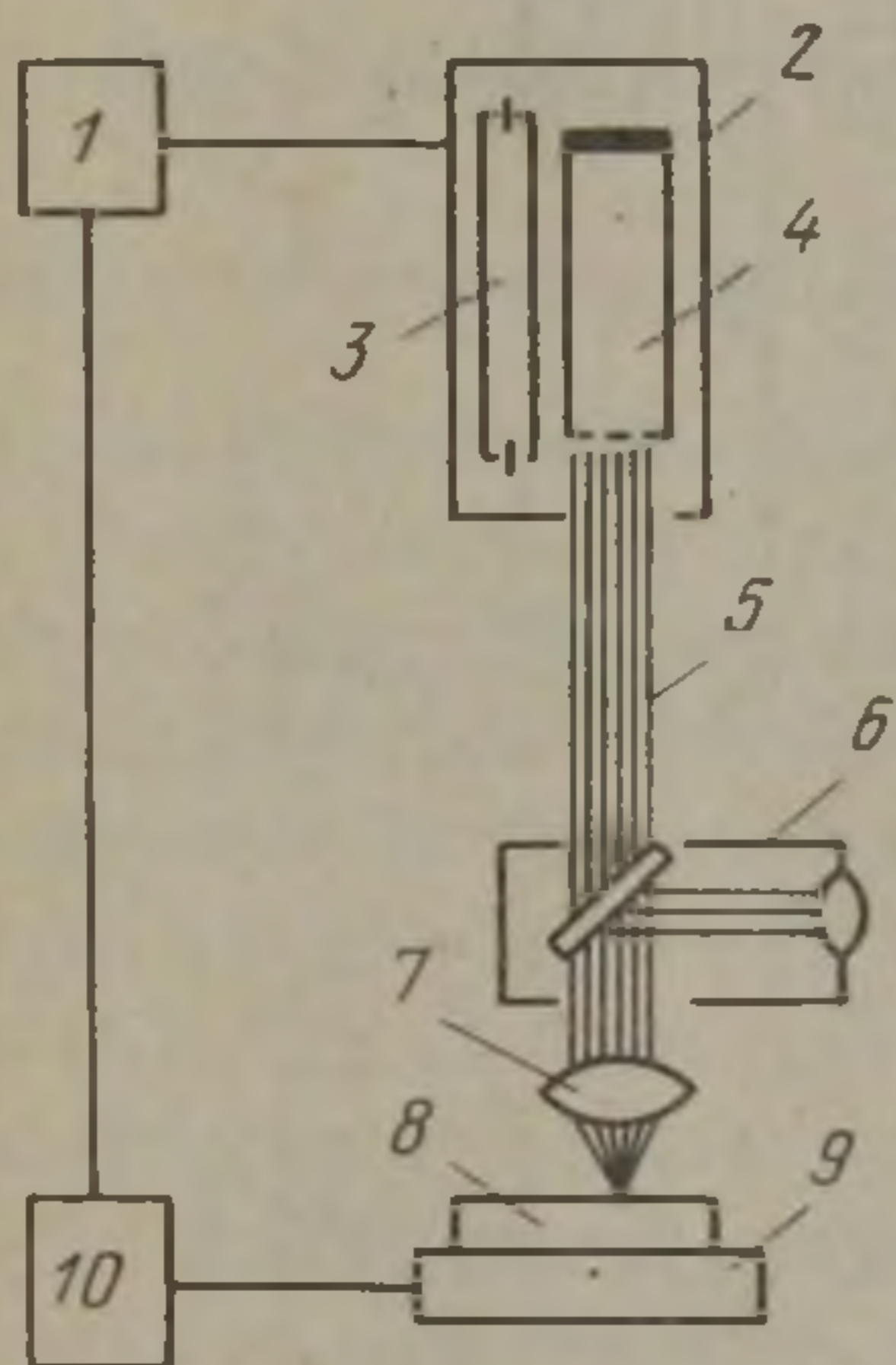


Рис. 46-3. Схема радиальной электронной пушки: 1 — катод; 2 — экранирующий электрод фокусировки; 3 — нагреваемое изделие; 4 — ускоряющий анод; 5 — магнитная катушка фокусировки; 6 — электронный пучок

При использовании радиальной электронной пушки между катодом и металлом устанавливают ускоряющий электрод с узкой щелью для прохода электронного пучка и соединяют его с положительным полюсом электрической высоковольтной сети. Таким образом, переплавляемый металл уже не соединен с высоковольтным напряжением. Радиальные электронные пушки (рис. 46-3) существуют в нескольких вариантах. Обычно кроме фокусирующего электрода они имеют дополнительные магнитные катушки для фокусировки электронного пучка. Конструктивное расположение катода имеет несколько разновидностей.

Особый интерес представляет радиальная электронная пушка с поворотом пучка на 180° . При этом катод располагают так, что брызги металла на него попасть не могут. Радиальные пушки, как и

кольцевые, работают обычно в рабочем вакууме камеры. Мощность радиальных пушек достигает 35 кВт. Они работают на ускоряющем напряжении до 15 кВ. Проводимость составляет до $1,5 \text{ мкА/В}^{1,5}$.

Интересной разновидностью радиальных пушек являются плоскочувствительные электронные пушки типа ИЭС (рис. 46-4). Они имеют катод 1, расположенный в разрезе фокусирующего прикатодного электрода 2, и водоохлаждаемый ускоряющий анод 3. Эти пушки изготавливают мощностью по 25, 50, 100 и 150 кВт. Ускоряющее напряжение достигает 25 кВ. Подобные электронные пушки работают с отклонениями пучка на $\pm 35^\circ$ перпендикулярно к оси катода и на $\pm 20^\circ$ соосно к оси катода. В электронно-лучевых печах устанавливают до 10 пушек такого типа.

Существенным преимуществом установок с радиальными пушками является наличие отдельного анода с диафрагмой, направляющей электронный пучок на нагреваемый металл. Этим осуществляется независимость параметров электронного пучка от переплавляемого металла. Кроме того это позволяет удалить

катод от металла и организовать самостоятельную откачку из прикатодного пространства. Расширяются также технологические возможности, связанные с размерами слитков.

Недостатками радиальных пушек являются:

сложность монтажа и обслуживания пушек из-за повышенного числа элементов;

сложность одновременного электропитания большого числа пушек в одной печи;

относительно большие размеры элементов пушки и сложность их расположения в рабочей камере;

недостаточное разделение вакуума рабочей камеры и зоны генерации электронных пучков;

сложность создания печей с повышенной мощностью (выше 1 МВт).

Стремление избежать указанных недостатков и необходимость создания электронных

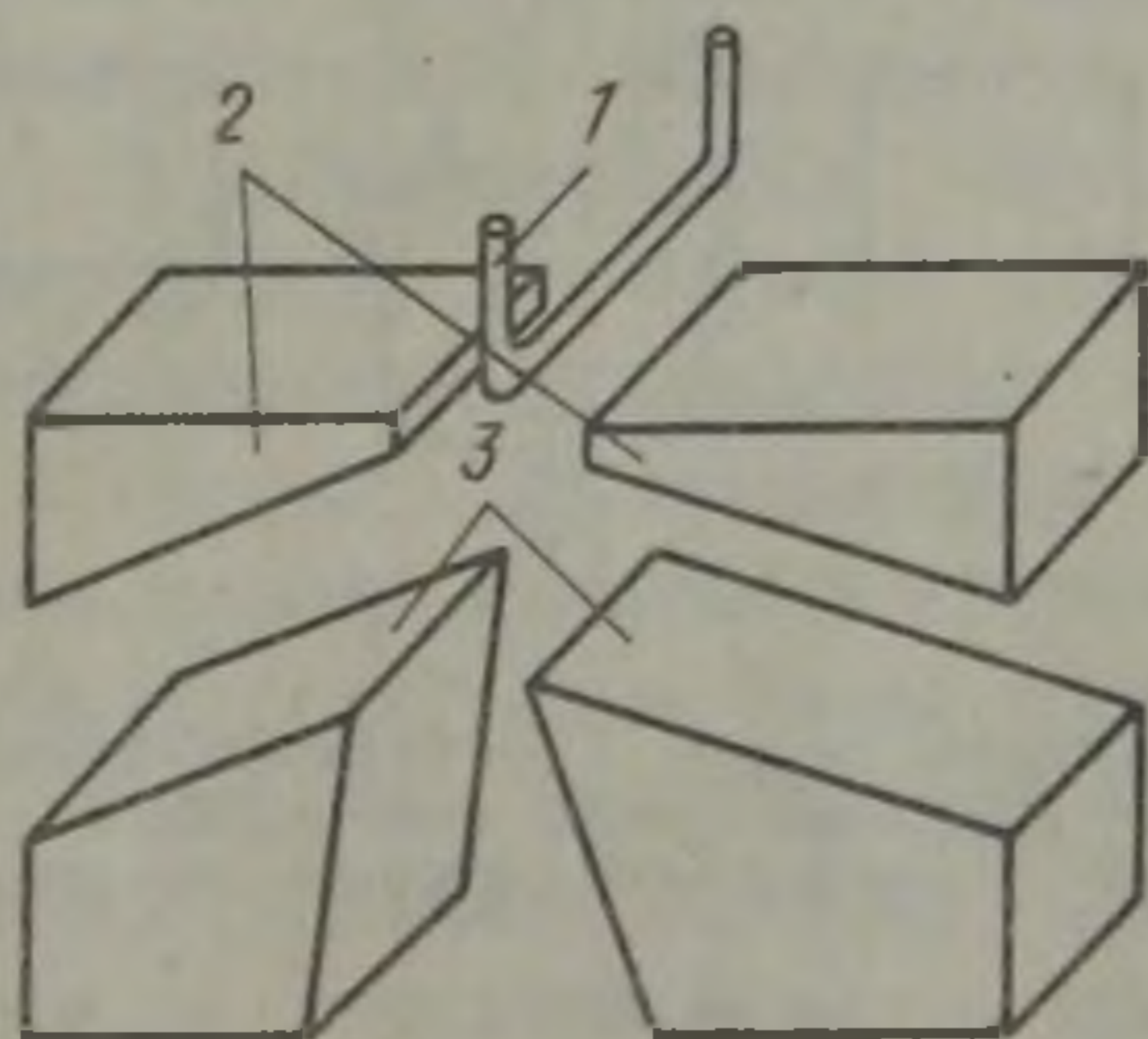


Рис. 46-4. Схема радиальной электронной пушки с плоским пучком (тип ИЭС)

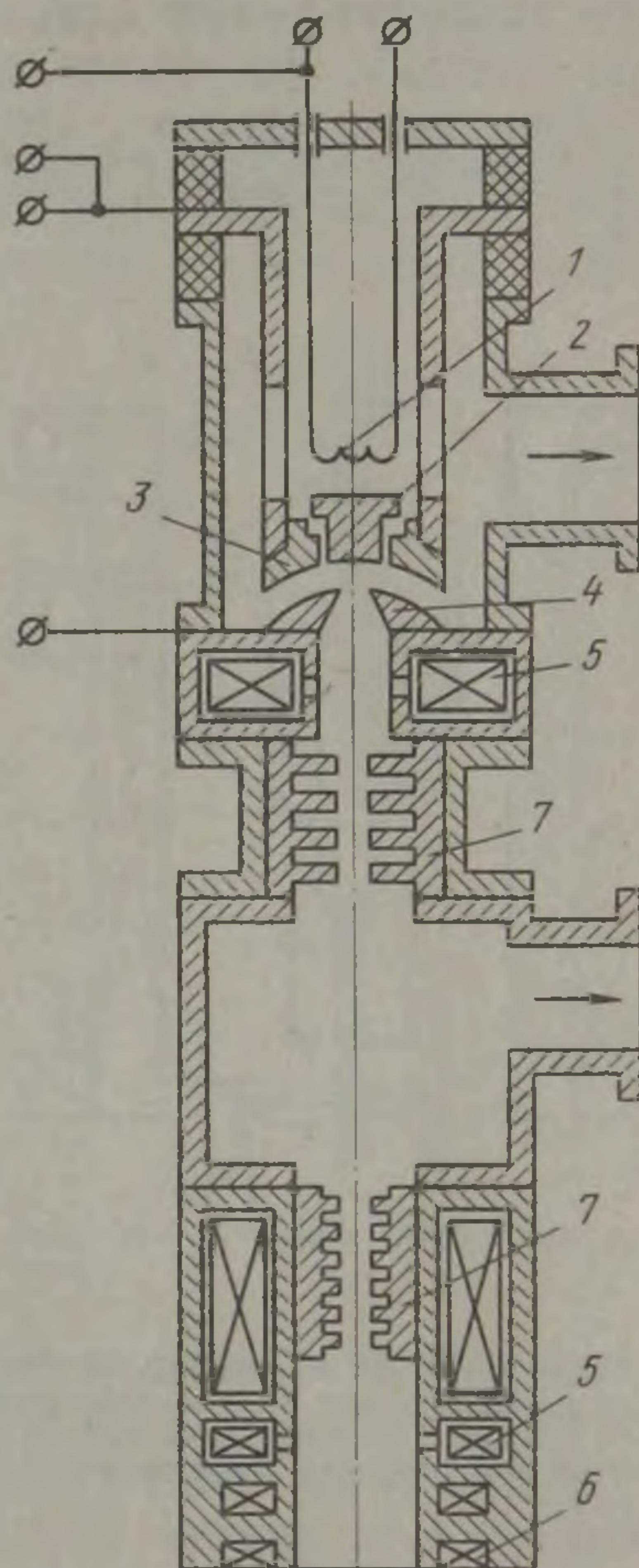


Рис. 46-5. Схема аксиальной электронной пушки

пушек повышенной мощности привели к разработке конструкций аксиальных пушек.

Аксиальная электронная пушка позволяет получить мощности выше 1 МВт. В состав аксиальной электронной пушки (рис. 46-5) входят вспомогательный 1 и рабочий 2 катоды, причем вспомогательный катод имеет отдельное электропитание. Электроны, которые эмиттируют вспомогательный катод, нагревают рабочий катод, эмиттирующий, в свою очередь, электронный пучок. У рабочего катода имеется фокусирующий электрод 3. Пучок ускоряется положительным потенциалом на аноде 4. Для магнитной фокусировки и управления пучком применяют специальные

катушки 5 и 6. Аксиальные пушки имеют систему многокамерного диафрагмирования 7, что позволяет отделить систему вакуумирования рабочей камеры от системы электронной пушки. Благодаря этому обеспечивается стабильная работа таких установок и легко достигается глубокий вакуум (до 10^{-4} Па), тогда как в рабочей камере давление может повышаться до 1 Па. Это упрощает вакуумную систему, устраняет пробой в результате газыделения при переплавке металла. Именно с использованием таких аксиальных пушек созданы электроннолучевые печи большой мощности.

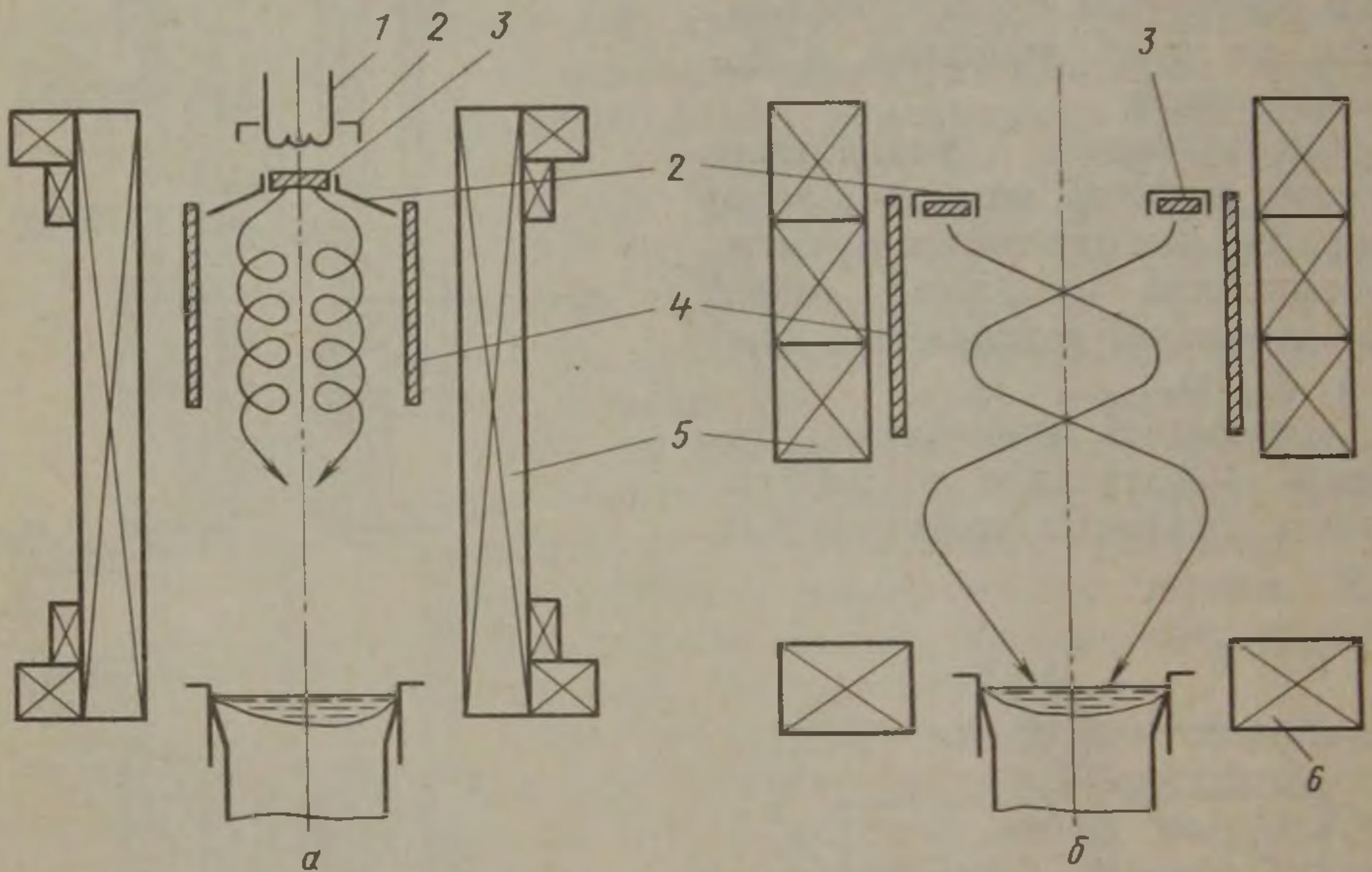


Рис. 46-6. Схема магнетронной пушки: а — с однородным; б — с неоднородным магнитным полем; 1 — вспомогательный катод; 2 — фокусирующий электрод; 3 — рабочий катод; 4 — анод; 5 — магнитная катушка формирующей системы; 6 — магнитная катушка фокусировки

Наивысшая мощность аксиальной пушки, равная 1,2 МВт, достигнута на одном из заводов ГДР. Ускоряющее напряжение 50 кВ при проводимости около $6 \text{ мкА/В}^{1.5}$.

Магнетронные пушки. В этих пушках электронный пучок формируется магнитным полем, а электростатическое поле между катодом и анодом для ускорения электронов уже не имеет решающего значения. Такие пушки имеют ряд преимуществ. Для них не требуется сверхточная юстировка отдельных элементов. Даже при перекосах и эксцентриситетах электродов электроны будут следовать линиями индукции магнитного поля. Поскольку движение электронов определяется и электрическими и магнитными полями, постольку можно снизить ускоряющее напряжение. Возможность применения как радиальных, так и аксиальных и даже кольцевых катодов с большой рабочей по-

верхностью позволяет получать высокую проводимость магнетронных пушек (до $20 \text{ мкА/В}^{1,5}$). Это позволяет создать мощные цилиндрические или трубчатые электронные пушки. Они могут работать с однородным (рис. 46-6, а) или неоднородным (рис. 46-6, б) формирующим магнитным полем.

Конструкция печей

Электронно-лучевые печи делят на четыре группы: переплавные, рафинировочные, литейные и печи для нанесения покрытий. Составные части всех этих печей показаны на рис. 46-7. Источником генерации электронов является электронная пушка 1, от которой электронный пучок 2 подается на нагреваемое (переплавляемое) изделие и на ванну жидкого металла 6, находящуюся в водоохлаждаемом кристаллизаторе 4. Кристаллизатор может иметь круглое и прямоугольное сечение. Для вытягивания слитка 7 в кристаллизаторе применяется специальное устройство 8. Переплавляемый материал 5 подается из пристроенной камеры, в которой поддерживается вакуум так же, как и в рабочей камере. В высокопроизводительных агрегатах иногда применяется несколько камер подачи материала.

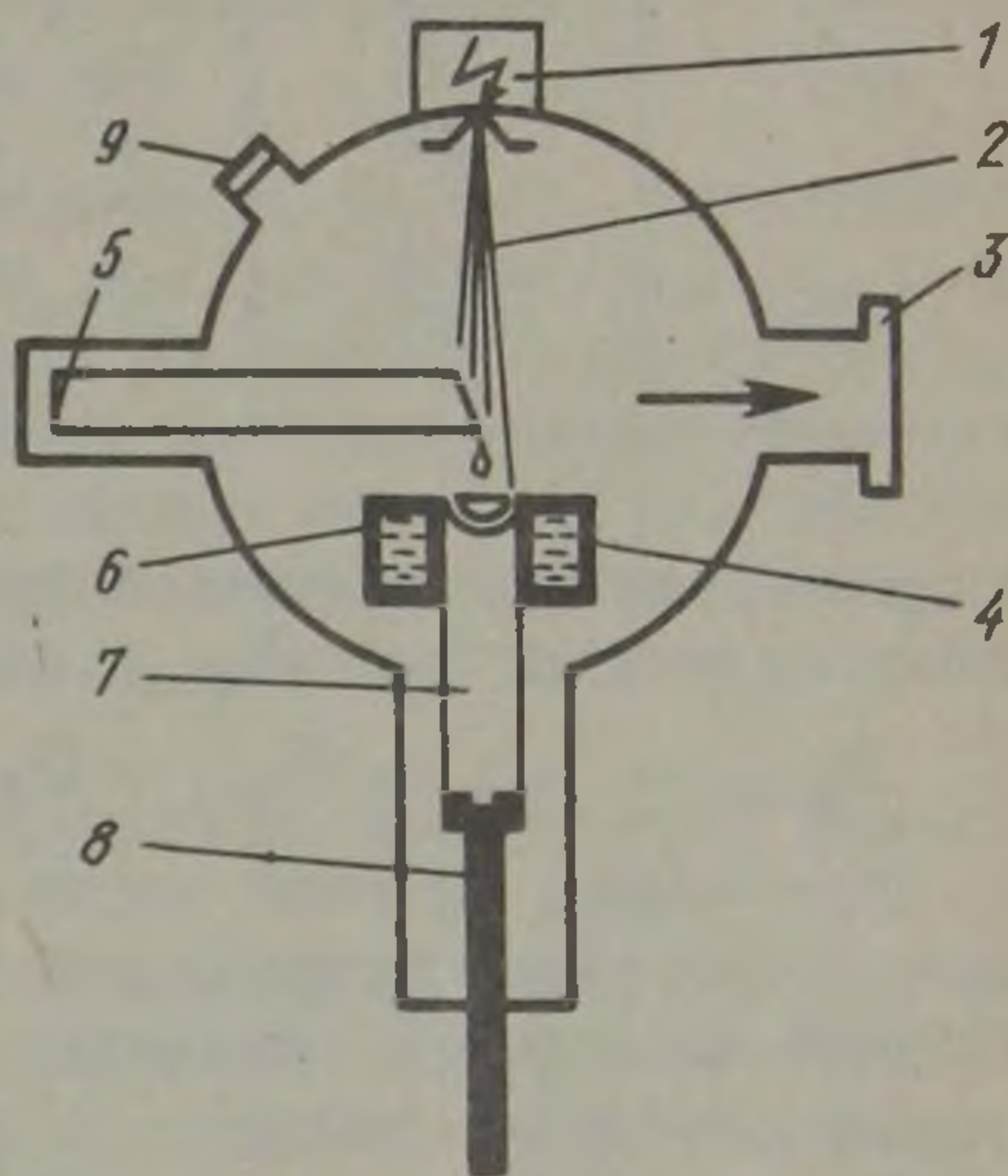


Рис. 46-7. Схема электронно-лучевой печи

Из рабочего объема газы откачивают мощными вакуум-насосами 3. Процесс контролируется через специальное окно 9.

Кроме рабочего объема, электронной пушки, системы вакуумирования и механического оборудования подачи и вытягивания слитка в состав печи входят также комплексная система водяного охлаждения, высоковольтная и выпрямительная аппаратура, система энергоснабжения и пульт управления. В целом такая печь является довольно сложным производственным комплексом. Электрический к. п. д. современных печей с аксиальной пушкой достигает 80 %, а тепловой к. п. д. лишь 15 %.

Характеристики некоторых действующих электронно-лучевых печей показаны в табл. 46-1.

Особенности тепловой работы

Мощность $P_{\text{подв}}$, подведенная к металлу в результате превращения кинетической энергии ускоренных электронов в тепловую (см. том 1), расходуется на нагрев, плавление и перегрев металла $P_{\text{пол}}$, на излучение $\Phi_{\text{изл}}$ и испарение $Q_{\text{ф}}$ с поверхности

Т а б л и ц а 46-1. Технические характеристики некоторых электронно-лучевых печей

Страна-изготовитель	Суммарная мощность, кВт	Число пушек	Максимальный диаметр слитка, мм	Максимальная длина слитка, мм
СССР	120	1	200	1000
	500	1	380	1300
ГДР	60	1	До 150	До 800
	250	1	» 300	» 1600
	1200	1	» 1000	» 3000
	1000	4	Для покрытия ленты шириной до 400 мм	
ФРГ	10	Нет св.	До 15	До 40
	200	» »	150	1600
	600	» »	200	1800
	1200	» »	400	2700
США	3000	22	600	4000

ванны жидкого металла в кристаллизаторе и на тепловые потери теплопроводностью $\Phi_{ж.м}$ через слиток

$$P_{подв} = P_{пол} + \Phi_{изл} + Q_{ф} + \Phi_{ж.м}$$

Все члены правой части уравнения энергетического баланса зависят от температуры поверхности ванны жидкого металла $T_{ж}$. С этой величиной связаны и технологические свойства электронно-лучевых печей.

Интенсивность рафинирования металла при электронной плавке (удаление неметаллических включений и нежелательных примесей путем испарения в газовую фазу или путем всплывания примесей в шлаковую фазу) резко возрастает с увеличением температуры металла. Однако эффективность рафинирования как в кинетической, так и в диффузионной стадиях процесса очистки может снизиться с ростом температуры в результате некоторого уменьшения коэффициентов разделения. Это обстоятельство требует определения оптимального температурного режима, т. е. определяющим параметром электронной плавки следует считать температуру поверхности жидкого металла.

Экспериментально полученные зависимости $P_{подв} = f(T_{ж})$ позволяют рекомендовать рациональный перегрев жидкого металла выше температуры плавления ($T_{ж}/T_{пл}$) при соблюдении минимума потерь металла путем испарения, потерь мощности электронного пучка на излучение и в промежуточной среде над зеркалом ванны жидкого металла при достаточной степени рафинирования металла (табл. 46-2).

В зависимости от температуры плавления металла и степени его перегрева над нею от слитка через кристаллизатор печи отводится от 40 до 75 % мощности пучка электронов. Для металлов с невысокой температурой плавления, например, железа, цир-

Т а б л и ц а 46-2. Плотность мощности, подводимой к поверхности ванны для достижения перегрева $T_{ж}/T_{пл}$

Металл	Плотность мощности, кВт/м ² , при $T_{ж}/T_{пл}$							
	1,05	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4
Железо (сталь)	1900	2500	3200	5 000	—	—	—	—
Цирконий	2200	3000	3800	4 500	5 100	6000	7100	8800
Ниобий	4000	5300	6700	8 400	10 500	—	—	—
Молибден	5600	7400	9200	12 600	—	—	—	—

кония, наблюдается рост величины теплового потока, отводимого от слитка через кристаллизатор печи при увеличении мощности пучка электронов, что можно объяснить ростом глубины ванны и, следовательно, высоты пояска жидкого металла, прилегающего к стенкам кристаллизатора. Для тугоплавких металлов (молибдена и др.) наблюдается обратное соотношение между величиной мощности, проходящей через выплавляемый слиток, и мощностью, подводимой к слитку.

По отношению к глубине проникновения электронов различают два режима нагрева вещества:

1. Чисто поверхностный нагрев. Поперечные размеры пучка намного больше глубины его проникновения внутрь вещества. Размеры пучка при прохождении в материале существенно не изменяются. Задача нагрева изделия и распространения тепла решается в предположении выделения тепла на поверхности или, в крайнем случае, в тонком поверхностном слое. Это наблюдается в различных случаях плавки и термообработки металлов, при сварке крупногабаритных изделий, при нанесении пленок испарением.

2. Нагрев глубинный. Диаметр пучка (обычно при этих процессах пучок круглый) сравним или намного меньше расстояния, на которое пучок проникает в материал. При этом важное практическое значение имеют вопросы изменения параметров пучка внутри вещества, законы выделения тепла по пути следования луча. Такие условия реализуются в установках для выполнения микропроцессов: резки и удаления тонких слоев металлов, микро-сварки электронным лучом.

Изучение различных технологических процессов, выполняемых электронным лучом, позволяет сделать вывод о том, что характер распространения тепла в веществе подчиняется разным законам при различных удельных энергиях в луче. Так, если $q < < 10$ кВт/см², то в этом случае распространение тепла в веществе с большой точностью подчиняется законам теплопроводности. При решении задачи необходимо однако учитывать в граничных условиях законы выделения энергии в веществе, которые влияют

на форму изотерм в ближайшей зоне от места попадания луча на материал.

При удельных энергиях $q > 10^3$ кВт/см² на распределении тепла внутри вещества сказываются механические усилия, действующие на поверхность вещества в месте попадания луча. В первую очередь — это давление отдачи испаряющихся с нагреваемой поверхности атомов, давление электронного пучка на поверхность. Примером может служить аномально глубокое проплавление вещества и образование так называемого кинжального провара при электронно-лучевой сварке. Однако к настоящему времени не существует достаточно точного представления о распространении тепла в веществе, учитывающего механическое воздействие на расплав и поведение этого расплава в таких условиях.

Технико-экономические показатели

Поскольку технологический процесс электронно-лучевой плавки стали и сплавов протекает с определенной массовой скоростью Q_m , работа электронно-лучевых печей может характеризоваться энергетическим балансом мощности с учетом энергетики электрофизических процессов электронного нагрева, теплотехнических процессов при рафинировании жидкого металла на холодном поду и формировании слитка в кристаллизаторе:

$$P_c = P_{\text{пол}} + \sum P_{\text{т. п}} + \sum P_{\text{в. п}} = Q_m W_{\text{у. т}} + (Q_{\text{ф}} + \Phi_{\text{изл}} + \Phi_{\text{ж. м}}) + (P_{\text{в. л}} + P_{\text{п}} + P_{\text{в. п}}),$$

где P_c — мощность, забираемая из сети; $P_{\text{пол}} = Q_m W_{\text{у. т}}$ — полезная мощность, расходуемая на нагрев и оплавление расходуемой заготовки и необходимый (для рафинирования) перегрев ванны жидкого металла; $\sum P_{\text{т. п}}$ — мощность, расходуемая на компенсацию тепловых потерь излучением $\Phi_{\text{изл}}$ и теплопроводностью $\Phi_{\text{ж. м}}$, а также на компенсацию теплоты фазового перехода первого рода (при испарении жидкого металла) $Q_{\text{ф}}$; $\sum P_{\text{в. п}}$ — мощность электрических потерь, имеющих место в источнике питания и токоподводе $P_{\text{и. п}}$, в электронной пушке $P_{\text{п}}$ и в электронном луче $P_{\text{э. л}}$.

Статьи баланса $P_{\text{пол}}$ и $\sum P_{\text{т. п}}$ зависят от температуры жидкого металла $T_{\text{ж}}$, характеризующей, в свою очередь, технологические свойства электронно-лучевых печей и являющейся определяющим параметром электронно-лучевой плавки.

При электронно-лучевой плавке сплавов на основе железа, никеля и кобальта с плотностью мощности до 4—5 МВт/м² 25—35 % мощности электронного луча расходуется на плавление расходуемой заготовки и создание жидкой ванны с заданным перегревом $T_{\text{ж}}/T_{\text{пл}}$, а 65—75 % теряется на компенсацию $\sum P_{\text{т. п}}$, т. е. тепловой к. п. д. переплавных печей составляет $\eta_{\text{т}} \approx 0,25 \div 0,35$, снижаясь при увеличении мощности из-за повышенных

тепловых потерь на испарение. Необходимо отметить, что при рафинировании жидкого металла $\eta_r = 0$.

Электрический к. п. д. составляет

$$\eta_o = (P_o - \sum P_{\text{в.п}}) / P_o = \eta_{\text{и.п}} \eta_{\text{п}} \eta_{\text{э.л}}$$

где $\eta_{\text{и.п}} \approx 0,85 \div 0,95$ — к. п. д. источника питания; $\eta_{\text{п}} \approx 0,96 \div 0,98$ — к. п. д. электронной пушки; $\eta_{\text{э.л}}$ — к. п. д. процесса преобразования кинетической энергии электронов в тепловую энергию (так называемый к. п. д. электронного луча), который для сталеплавильных электронно-лучевых печей в зависимости от величины ускоряющего напряжения составляет 0,5 (радиальные пушки, $U \sim 15$ кВ) и 0,65 (аксиальные пушки, $U \sim 30$ кВ).

Общий к. п. д. переплавных электронно-лучевых печей

$$\eta_o = \eta_{\text{э}} \eta_r = P_{\text{пол}} / P_o \approx 0,1 \div 0,2,$$

т. е. электронный нагрев имеет низкую энергетическую эффективность, что и определяет технологическое назначение таких печей для получения металлов и сплавов особо высокого качества.

Производительность зависит при технологически целесообразной массовой скорости процесса Q_m , от массы выплавляемого слитка и от использования календарного времени:

Мощность установки, МВт	0,12	0,3	0,5	1,2	7,8
Диаметр кристаллизатора, мм	150	250	380	800	610
Масса слитка, т	0,15	0,4	1	12	10
Фонд времени, ч	7500	7500	7500	6800	6000
Производительность:					
часовая, кг/ч	12—25	30—65	75—150	300—450	5000
годовая, 10^3 т/год	0,09—0,2	0,25—0,5	0,6—1,2	2—3	30

Удельный расход электроэнергии колеблется в пределах 0,7—1 МВт-ч/т. Расходный коэффициент металлошихты в зависимости от марки стали, режима переплава, способа крепления расходуемой заготовки и глубины обдирки выплавленного слитка (до 2—5 мм) составляет 1,03—1,08.

Расходы по переделу зависят от размера и мощности установки, полного освоения технологии и оборудования. На крупных печах большой мощности (>1 МВт) эксплуатационные расходы могут быть сопоставимы с расходами на вакуумно-дуговой переплав или вакуумную индукционную плавку при обеспечении более высокого качества металла.

Возможность повышения экономичности электронно-лучевых печей — исключение затрат на подготовку расходуемых заготовок и на повторное их расплавление, т. е. применение жидкого полупродукта в рафинировочных печах с одной или несколькими промежуточными емкостями. При многоступенчатом рафинировании можно существенно повысить производительность и расширить их технологические возможности (обработка жидкого

металла различными реагентами). Однако при неизменной производительности с увеличением реакционной поверхности наряду с улучшением рафинирования усиливается угар основного металла (т. е. возрастает расходный коэффициент металлошихты) и повышается удельный расход электроэнергии.

3. Лазерные установки

Общая характеристика

За последние годы в металлообрабатывающей промышленности все более широкое развитие получают технологические процессы, в основу которых положен локальный нагрев металлов световым лучом оптического квантового генератора (лазера). Применение когерентного излучения высокой интенсивности (см. том 1) при-

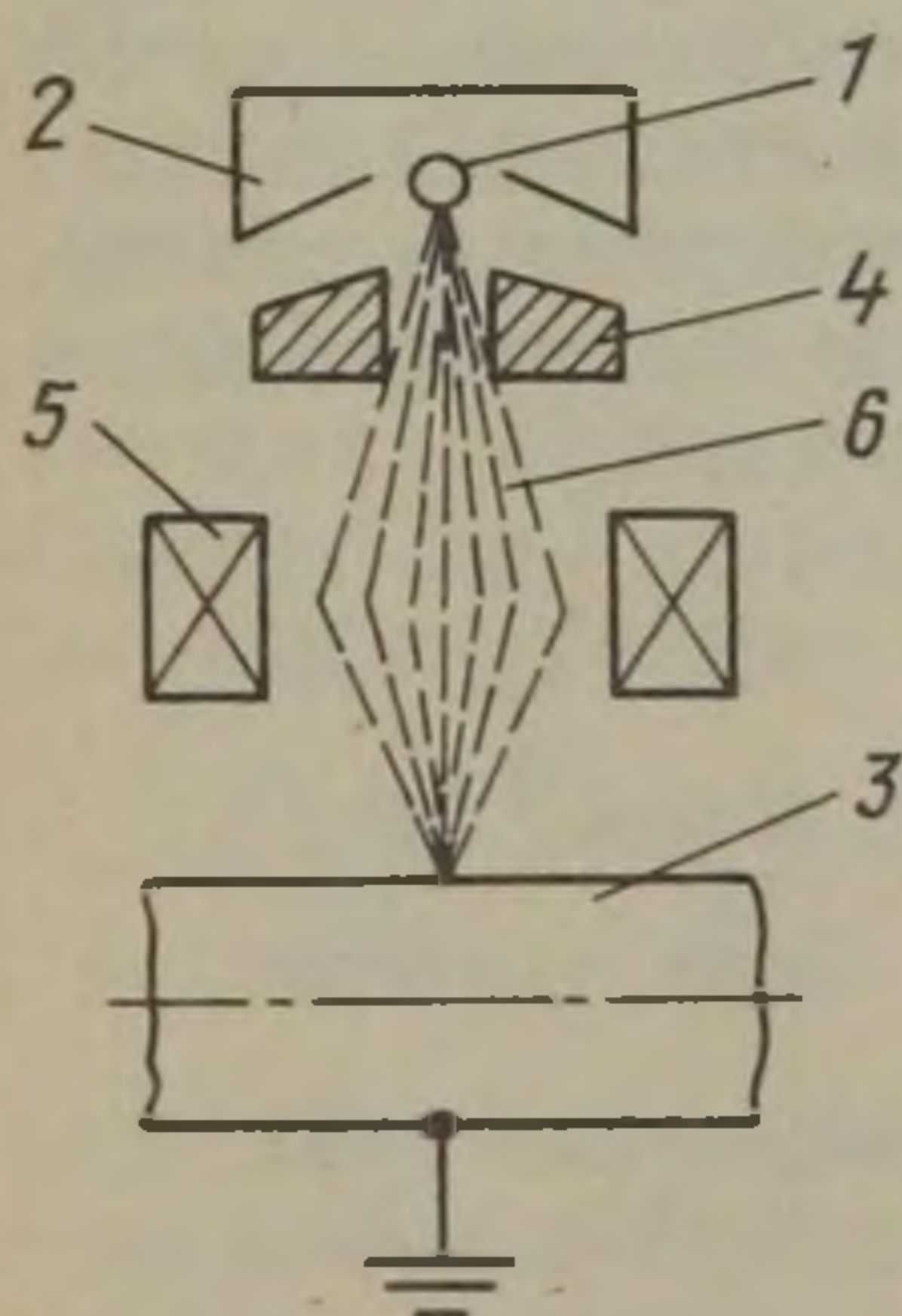


Рис. 46-8. Схема лазерной технологической установки:

1 — источник питания; 2 — ОКГ (лазер); 3 — ксеноновая газоразрядная лампа (система возбуждения); 4 — кристалл (активное вещество); 5 — луч; 6 — окуляр; 7 — объектив; 8 — нагреваемый материал; 9 — механизм передвижения; 10 — программное устройство

водит к резкому увеличению производительности труда, обеспечивает улучшение качества и повышения надежности продукции, расширяет технологические возможности металлообработки. Для этого применяют оптические квантовые генераторы (ОКГ) на кристаллах и газовые ОКГ как импульсного, так и непрерывного действия.

Лазерная установка (рис. 46-8), помимо ОКГ, имеет источник питания, фокусирующую энергетическую систему (объектив с диафрагмой и светофильтрами), оптическую систему наблюдения (окуляр), механизмы крепления и передвижения обрабатываемого металла, программное устройство для управления и контроля технологического процесса. Для увеличения эффективности использования излучения ОКГ возможна обработка в вакууме, инертных или химически активных прозрачных средах.

В металлургии ОКГ применяют в прецизионных физико-химических исследованиях; в машиностроении — для термической обработки поверхности (закалки, отпуска, поверхностного легирования), сварки, резки и размерной обработки, включая получение отверстий заданного размера, в производстве изделий микроэлектроники и т. д.

Особенности тепловой работы

Нагрев излучением ОКГ определяется интенсивностью теплогенерации в световом пятне на поверхности металлов, характеризующихся малой глубиной проникновения света и теплопере-

дачей по механизму теплопроводности от кругового поверхностного источника вглубь металла. Внешним теплообменом поверхности с окружающей средой за время действия импульса излучения ОКГ можно пренебречь.

Технико-экономические показатели

Выходная мощность излучения ОКГ и его к. п. д. зависят от качества материала, активной среды и режима работы:

Активная среда	Алюмоиттриевый гранат	Газовая смесь $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{Ne}$	Полупроводник GaAs
Режим работы	Импульсный	Импульсный/ непрерывный	Непрерывный
Мощность, Вт	100	5000/800	3—6
η	0,015—0,020	0,3	0,5—0,7

4. Оптические печи

Общая характеристика

Оптическая печь — нагревательная установка, состоящая из источника лучистой энергии ¹ с системой отражателей (рефлекторов) ², фокусирующих лучистый поток в малую по объему (в несколько см³) рабочую зону, в которой под действием потока большой плотности (0,1—10 кВт/см²) создаются условия высокотемпературного нагрева (1000—5000 К).

В качестве искусственных источников излучения применяют лампы накаливания (класс А), графитовые нагревательные элементы (класс Б), дуговые лампы высокой интенсивности (класс В), мощные газоразрядные ксеноновые лампы сверхвысокого давления (класс Г) и плазменные излучатели (класс Д). В оптических печах используют стеклянные отражатели с наружным и реже тыльным серебряным или алюминиевым покрытием (коэффициент отражения до 95 %) и металлические отражатели с наружным хромированием или серебрением (легко охлаждаются, но отличаются меньшей оптической точностью).

Облученность нагреваемого изделия регулируют изменением плотности лучистого потока за счет изменения электрической мощности, подводимой к источнику излучения (обычно применяют для ламп накаливания), или за счет затенения части лучистого потока, направленного в рабочую зону оптической печи, для чего применяют жалюзи, ирисовые диафрагмы, заслонки и подобные механические регуляторы.

В оптических печах осуществляют высокотемпературный нагрев и термическую обработку материалов на воздухе, в вакууме

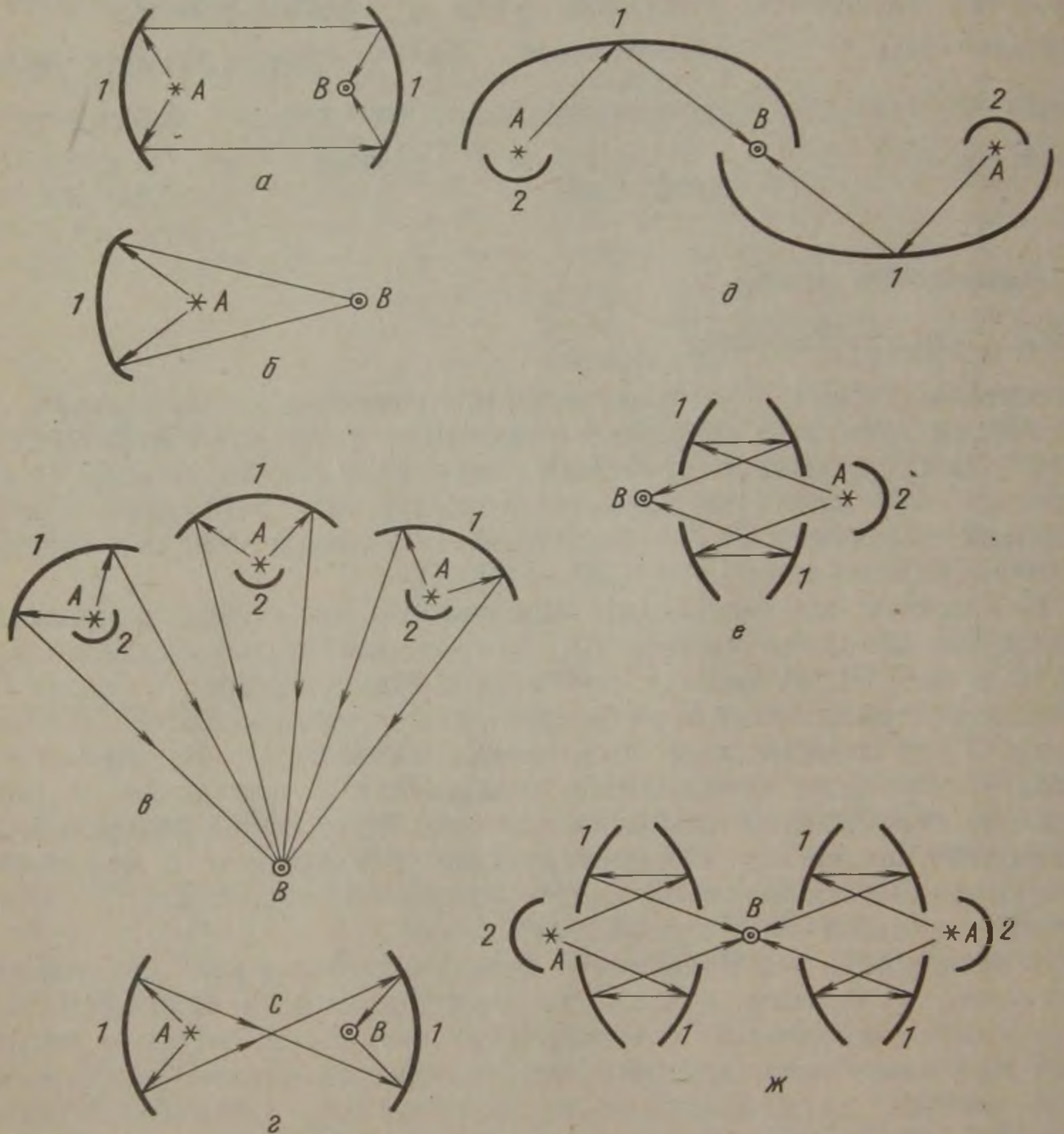
¹ В случае использования солнечной энергии нагревательное устройство называют «солнечная печь» (гелиотермическая установка).

² С учетом принципа действия отражателя-рефлектора иногда оптические печи называют «рефлекторные» печи, печи изображения.

и в контролируемой атмосфере. Рабочая камера, в которой производят нагрев, должна быть выполнена целиком или частично из материала, прозрачного для лучистого потока (кварцевое стекло).

Особенности тепловой работы

Оптические печи являются печами-теплообменниками с радиационным режимом тепловой работы. Изменяя конструкцию и



расположение отражателей и контротражателей (рис. 46-9), можно создать различные схемы косвенного радиационного теплообмена разной степени направленности — односторонний (см.

рис. 46-9, а, б, г, е), двухсторонний (см. рис. 46-9, д, ж), многосторонний (см. рис. 46-9, в).

Создание высоких температур в зоне нагрева определяется достижимой степенью концентрации мощных лучистых потоков в рабочей зоне оптической печи. Диаметр фокального пятна рабочей зоны печи зависит от размеров излучателя и соотношения диаметров концентраторов (отражателей) лучистой энергии. Еще одной особенностью оптических печей (солнечных или с искусственным источником излучения) является неравномерное распределение плотности лучистого потока в фокальном пятне, когда она спадает от максимального своего значения в центре к краям пятна по закону Гаусса. По законам геометрической оптики в параболических и эллипсоидных отражателях центральные зоны принимают большее участие в создании изображения, чем крайние (центральная зона создает в фокальной плоскости круг, а боковые зоны — эллипсы). Неравномерная плотность лучистого потока в фокальном пятне создает температурные градиенты на поверхности нагреваемого (облучаемого) материала.

В некоторых случаях применяют контротражатели в виде отражателей сферического или парабо-эллипсоидного профиля, малого диаметра, с большим углом охвата ($>180^\circ$), которые располагают вблизи источника излучения. Такие контротражатели налаживают перевернутое изображение излучающего тела на его прямое изображение в отражателях, способствуя увеличению на 40—60 % полезного лучистого потока.

Технико-экономические показатели

Эффективность нагрева в оптических печах зависит от к. п. д. источника излучения (класс А — около 80 %, класс Б — 45—80 %, класс В — 35—40 %, класс Г — 45—60 %), фокусирующей системы и технологического процесса в рабочей камере. В качестве примера приведем значения общего к. п. д. для оптических печей некоторых типов:

Бипараболическая печь класса Г	До 0,2
Биэллипсоидная печь класса В	До 0,1
Моноэллипсоидная печь класса Г	0,20—0,25
Полусферическая печь класса Б	0,25—0,60

5. Установки для зонной плавки

Общая характеристика

Зонная плавка — один из наиболее эффективных физико-химических методов глубокой очистки вещества, состоящей из многократно повторяемых операций местного (участкового) расплавления, перемещения полученной зоны жидкой фазы вдоль слитка (рис. 46-10) и дробной направленной кристаллизации. Такая технология выдвигает специфические теплотехнические требова-

ния к установкам для зонной плавки, что определяет необходимость рассматривать их как специальные печи. В состав таких установок входит нагревательное устройство, механизмы перемещения зон, рабочая камера с контейнером для очищаемого вещества (для химически активных металлов применяют бесконтейнерную зонную плавку).

При зонной плавке в принципе возможно применение любого из способов теплогенерации за счет электрической энергии с необходимым обеспечением концентрации нагрева в узкой (короткой) зоне. Для плавления электропроводных материалов (металлы

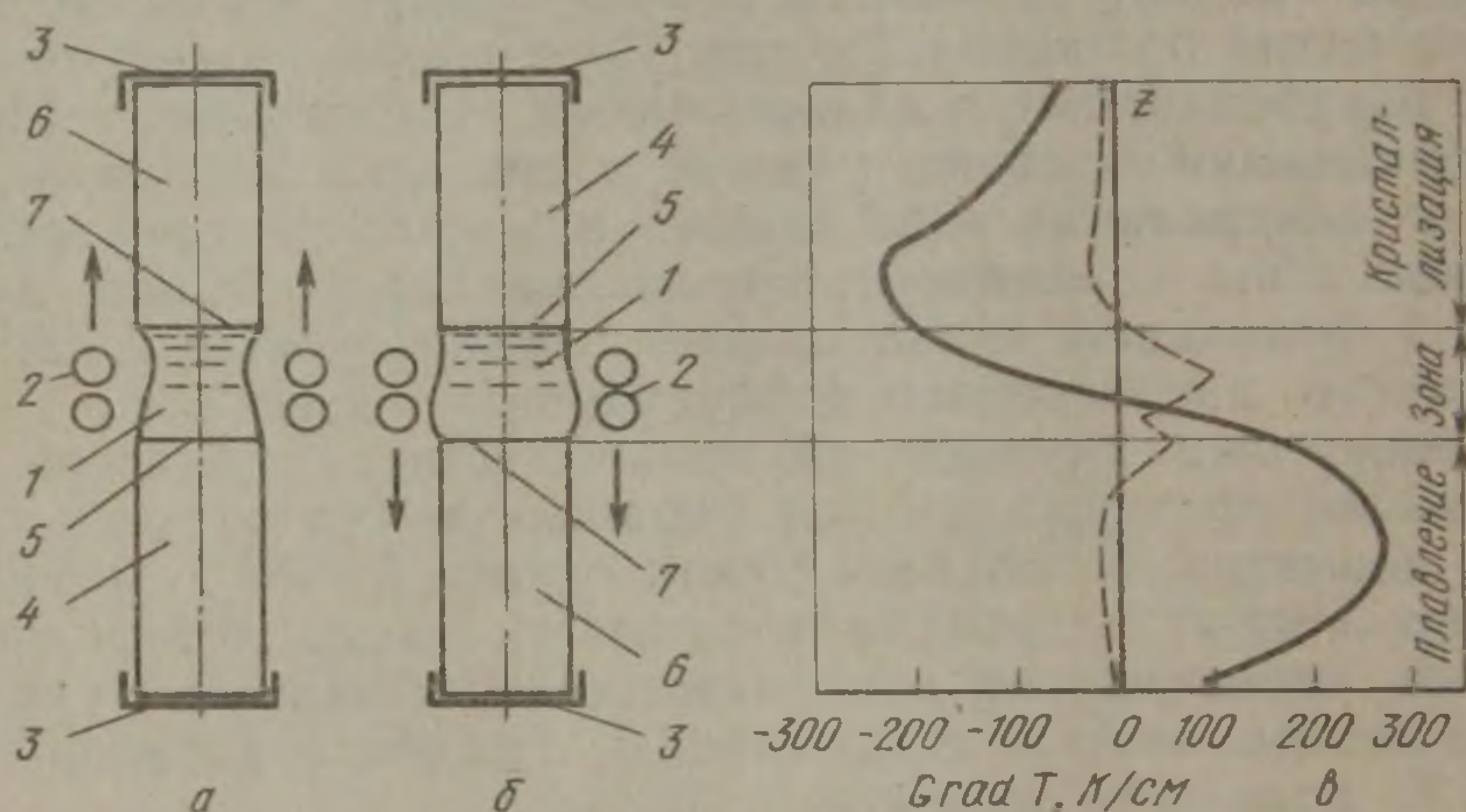


Рис. 46-10. Схемы бестигельной зонной плавки при движении индукторов вверх (а) и вниз (б) и температурные градиенты (в) по оси (сплошная кривая) и по радиусу (штриховая кривая): 1 — расплавленная зона; 2 — индуктор; 3 — крепление стержня; 4 — кристаллизующая часть стержня; 5 — фронт кристаллизации; 6 — расплавляемая часть стержня; 7 — фронт плавления

с температурой плавления до 2000—2500 К, полупроводниковые материалы) наиболее удобен индукционный нагрев (когда зонную плавку ведут в вакууме или специальной атмосфере), который дополняется технологически полезным электромагнитным перемешиванием жидкой зоны. Тугоплавкие металлы с температурой выше 2500 К целесообразно плавить электронным лучом в глубоком вакууме или мощным излучением ОКГ (через прозрачную стенку рабочей камеры). При выращивании монокристаллов оксидов и других тугоплавких материалов методом зонной плавки находят применение оптические печи, индукционные установки с «холодным» тиглем (см. гл. 44).

В случае бесконтейнерной (бестигельной) зонной плавки жидкая зона удерживается силами поверхностного натяжения между двумя твердыми соосными вертикальными (или горизонтальными) концами переплавляемого слитка в виде стержня (пластины, трубы) — метод плавающей зоны; горизонтальную плавающую зону можно поддерживать внешним магнитным полем при про-

пускании постоянного тока через электропроводный слиток; вертикальную — в электромагнитном поле индуктора аналогично устройствам для плавки металла во взвешенном состоянии.

Отечественные установки типа «Кристалл» предназначены для выращивания монокристаллов кремния диаметром 45—60 мм со скоростью перемещения зоны 0,6—25 мм/мин; рабочая частота 5,28 МГц.

Особенности тепловой работы

Теплотехнические особенности зонной плавки заключаются в следующем:

создание одной или нескольких коротких (узких) зон расплавленного вещества;

сохранение зон в расплавленном состоянии при их перемещении вдоль образца с заданной скоростью, для чего необходимо отвести теплоту кристаллизации от фронта кристаллизации и подвести теплоту плавления к фронту расплавления (эта задача ограничивает скорость перемещения зон — не более нескольких миллиметров в минуту);

охлаждение межзонных промежутков ($T < T_{пл}$);

тепловая изоляция рабочего пространства;

при контейнерной зонной плавке распределение температуры в образце определяется также теплопередачей через контейнер (электропроводный контейнер из графита может быть местом теплогенерации при косвенном индукционном нагреве).

Таким образом, задача создания и сохранения зоны сводится к установлению в зоне максимальной температуры, превышающей температуру плавления твердой фазы вещества, а с обеих сторон зоны «холодных» участков с температурой ниже температуры плавления.

При движении зоны тепловой поток, уходящий из зоны через фронт плавления, скачкообразно уменьшается на величину теплоты плавления, а тепловой поток, уходящий через фронт кристаллизации, соответственно скачкообразно возрастает на величину теплоты кристаллизации. Это явление незначительно влияет на тепловую мощность, необходимую для проведения зонной плавки, но существенно сказывается на распределении температуры вблизи зоны (см. рис. 46-10, в) и на форме фронтов плавления и кристаллизации.

Для определения тепловой мощности зонной плавки с учетом малых скоростей перемещения зоны процесс считают квазистационарным. При этом аксиальное температурное поле описывается, в первом приближении, экспоненциальным законом; радиальное — параболическим. Осевой температурный градиент dT/dz наиболее существенен непосредственно у фронта кристаллизации и на некотором расстоянии от него, составляя, например, при зонной плавке кремниевого стержня диаметром 2 см со скоростью 2 мм/мин 200—250 К/см.

Технико-экономические показатели

Эффективность работы установок для зонной плавки определяется качеством получаемых материалов, которое зависит от таких основных технологических параметров как длина зоны, скорость перемещения зоны и число зонных проходов для многократной перекристаллизации образца с учетом физико-химических свойств материала. Время, необходимое для достижения заданной степени рафинирования, прямо пропорционально числу зонных проходов и обратно пропорционально скорости перемещения зоны. Помимо многостадийных периодических процессов возможно применение непрерывной зонной очистки, которая несмотря на более сложное оборудование наиболее целесообразна для крупномасштабной переработки материалов с более высокими технико-экономическими показателями.

РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

К разделу I

Глинков М. А., Глинков Г. М. Общая теория печей. М.: Metallургия, 1978. 266 с.

Кривандин В. А., Марков Б. Л. Metallургические печи. М.: Metallургия, 1977. 468 с.

К разделу II

Кривандин В. А. Светящееся пламя природного газа. М.: Metallургия, 1973. 136 с.

Вулис Л. А., Ершин Ш. А., Ярин Л. П. Основы теории газового факела. Л.: Энергия, 1968. 180 с.

Гусовский В. Л., Тымчак В. М., Лифшиц А. Е. Газогорелочные устройства и отопление нагревательных печей. М.: Metallургия, 1962. 300 с.

К разделу III

Стрелов К. К., Мамыкин П. С. Технология огнеупоров. М.: Metallургия, 1978. 375 с.

Огнеупоры и футеровки. Пер. с японского С. И. Жужи и Б. В. Крылова. М.: Metallургия, 1976. 416 с.

Справочник. Огнеупорные изделия, материалы и сырье. Под ред. А. К. Карклита. М.: Metallургия, 1977. 216 с.

Иванова Н. И., Перимов А. А., Тымчак В. М. Механизмы печей прокатного производства. М.: Metallургия, 1972. 250 с.

Кружков В. А. Metallургические подъемно-транспортные машины. М.: Metallургия, 1966. 206 с.

К разделу IV

Тебеньков Б. П. Рекуператоры для промышленных печей. М.: Metallургия, 1975. 294 с.

Филимонов Ю. П., Старк С. Б., Морозов В. А. Metallургическая теплотехника. Т.2. М.: Metallургия, 1974. 519 с.

Кривандин В. А., Марков Б. Л. Metallургические печи. М.: Metallургия, 1977. 468 с.

Старк С. Б. Теплоэнергетическое хозяйство metallургических заводов. М.: Metallургия, 1966. 311 с.

К разделу V

Андоньев С. М. Испарительное охлаждение metallургических печей. М.: Metallургия, 1970. 424 с.

Бережинский А. И., Циммерман А. Ф. Охлаждение и очистка газов кислородных конвертеров. М.: Metallургия, 1975. 190 с.

К разделу VI

Старк С. Б. Пылеулавливание и очистка газов metallургии. М.: Metallургия, 1977. 328 с.

Андоньев С. М., Филипьев О. В. Пылегазовые выбросы предприятий черной metallургии. М.: Metallургия, 1973. 199 с.

К разделу VII

Китаев Б. И., Ярошенко Ю. Г., Лаварев Б. Л. Теплообмен в доменной печи. М.: Metallургия, 1966. 354 с.

Теплофизика доменного процесса/Китаев Б. И., Ярошенко Ю. Г., Суханов Е. Л. и др. М.: Metallургия, 1978. 396 с.

Теплообмен в плотном слое/Китаев Б. И., Тимофеев В. Н., Боковиков Б. П. и др. М.: Metallургия, 1972. 431 с.

Еринов А. Е., Сорока Б. С. Рациональные методы сжигания газового топлива в нагревательных печах. Киев: Техника, 1970. 262 с.

Кривандин В. А., Марков Б. Л. Metallургические печи. М.: Metallургия, 1977. 468 с.

Справочник конструктора печей прокатного производства. Т. I и II. М.: Metallургия, 1979. 991 с.

К разделу VIII

Диомидовский Д. А. Metallургические печи цветной metallургии. М. Metallургия, 1970. 704 с.

Рафалович И. М. Теплопередача в печах и аппаратах, работающих на расплавленных средах. М.: Metallургия, 1972. 214 с.

К разделу IX

Сатановский А. Г., Мирский Ю. А. Нагревательные и термические печи в машиностроении. М.: Metallургия, 1971. 383 с.

Пуговкин А. У. Рециркуляционные пламенные печи. Л.: Машиностроение, 1975. 199 с.

К разделу X

Глинков М. А. Тепловая работа сталеплавильных ванн. М.: Metallургия, 1970. 406 с.

Марков Б. Л. Методы продувки мартеновской ванны. М.: Metallургия, 1975. 278 с.

Бабтизманский В. И. Теория кислородно-конвертерного процесса. М.: Metallургия, 1975. 374 с.

Арсентьев П. П., Квитко М. П. Кислородно-конвертерный процесс с донной продувкой. М.: Metallургия, 1983. 127 с.

Явойский В. И., Дорофеев Г. А., Повх И. Л. Теория продувки сталеплавильной ванны. М.: Metallургия, 1974. 495 с.

К разделу XI

Купряков Ю. П. Автогенная плавка медных концентратов во взвешенном состоянии. М.: Metallургия, 1979. 231 с.

Худяков И. Ф., Тихонов А. И., Деев В. И., Набойченко С. С. Metallургия меди, никеля и кобальта. Т. I. М.: Metallургия, 1977, 296 с.

К разделу XII

Егоров А. В. Электроплавильные печи черной metallургии. М.: Metallургия, 1985. 280 с.

Кацевич Л. С. Теория теплопередачи и тепловые расчеты электрических печей. М.: Энергия, 1977. 304 с.

Никольский Л. Е., Смоляренко В. Д., Кузнецов Л. Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. М.: Metallургия, 1981. 320 с.

Романов Д. И. Электроконтактный нагрев металлов. М.: Машиностроение, 1981. 168 с.

Электротехнологические промышленные установки/Евтюкова И. П., Кацевич Л. С., Некрасова Н. М. и др. М.: Энергия, 1982. 400 с.

Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева/Свенчанский А. Д., Жердев И. Т., Кручинин А. М. и др. М.: Энергоиздат, 1981. 296 с.

Значения теплового потока C_0 , излучаемого абсолютно черным телом, Вт/м²

$t, ^\circ\text{C}$	$C_0\left(\frac{T}{100}\right)^4$	$t, ^\circ\text{C}$	$C_0\left(\frac{T}{100}\right)^4$	$t, ^\circ\text{C}$	$C_0\left(\frac{T}{100}\right)^4$	$t, ^\circ\text{C}$	$C_0\left(\frac{T}{100}\right)^4$	$t, ^\circ\text{C}$	$C_0\left(\frac{T}{100}\right)^4$
180	2 400	445	15 148	710	53 200	975	138 270	1240	298 700
185	2 508	450	15 575	715	54 320	980	140 500	1245	302 700
190	2 619	455	16 010	720	55 420	985	142 760	1250	306 700
195	2 734	460	16 455	725	56 540	990	145 040	1255	310 700
200	2 853	465	16 908	730	57 690	995	147 350	1260	314 800
205	2 975	470	17 371	735	58 850	1000	149 690	1265	318 900
210	3 102	475	17 843	740	60 020	1005	152 050	1270	323 100
215	3 233	480	18 326	745	61 220	1010	154 450	1275	327 300
220	3 366	485	18 817	750	62 430	1015	156 870	1280	331 600
225	3 505	490	19 318	755	63 660	1020	159 320	1285	335 800
230	3 649	495	19 830	760	64 910	1025	161 800	1290	340 200
235	3 795	500	20 331	765	66 170	1030	164 310	1295	344 600
240	3 947	505	20 883	770	67 450	1035	166 870	1300	349 000
245	4 104	510	21 425	775	68 760	1040	169 410	1305	353 400
250	4 265	515	21 978	780	70 080	1045	172 000	1310	357 900
255	4 430	520	22 541	785	71 420	1050	174 600	1315	362 600
260	4 600	525	23 615	790	72 780	1055	177 300	1320	367 100
265	4 775	530	23 699	795	74 160	1060	180 000	1325	371 700
270	4 956	535	24 295	800	75 560	1065	182 700	1330	376 400
275	5 140	540	24 902	805	76 980	1070	185 400	1335	381 100
280	5 331	545	25 520	810	78 410	1075	188 200	1340	385 800
285	5 526	550	26 150	815	79 870	1080	191 000	1345	390 600
290	5 727	555	26 791	820	81 350	1085	193 900	1350	395 500
295	5 933	560	28 109	825	82 850	1090	261 100	1355	400 400
300	6 145	565	28 109	830	84 370	1095	199 600	1360	405 300
305	6 362	570	28 786	835	85 330	1100	202 600	1365	410 300
310	6 585	575	29 475	840	86 900	1105	205 500	1370	415 400
315	6 814	580	30 177	845	89 050	1110	208 500	1375	420 400
320	7 049	585	30 890	850	90 650	1115	211 600	1380	425 600
325	7 289	590	31 617	855	92 280	1120	214 600	1385	430 700
330	7 536	595	32 356	860	93 930	1125	217 700	1390	436 000
335	7 789	600	33 108	865	95 590	1130	220 900	1395	441 200
340	8 048	605	33 873	870	97 290	1135	224 000	1400	446 500
345	8 315	610	34 651	875	99 000	1140	227 200	1405	451 900
350	8 586	615	35 443	880	100 740	1145	230 400	1410	457 300
355	8 866	620	36 248	885	102 500	1150	233 700	1415	462 800
360	9 151	625	37 066	890	104 280	1155	237 000	1420	468 300
365	9 444	630	37 899	895	106 080	1160	240 400	1425	473 800
370	9 744	635	38 745	900	107 910	1165	243 700	1430	479 400
375	10 050	640	39 606	905	109 760	1170	247 100	1435	485 100
380	10 364	645	40 480	910	111 640	1175	250 600	1440	490 800
385	10 685	650	41 370	915	113 540	1180	254 100	1445	496 600
390	11 014	655	42 283	920	115 500	1185	257 600	1450	502 400
395	11 350	660	43 192	925	117 410	1190	261 100	1455	508 200
400	11 693	665	44 125	930	119 380	1195	264 700	1460	514 100
405	12 045	670	45 074	935	121 380	1200	268 300	1465	520 100
410	12 404	675	46 037	940	123 400	1205	272 000	1470	526 100
415	12 771	680	47 016	945	125 450	1210	275 700	1475	532 200
420	13 146	685	48 011	950	127 520	1215	279 400	1480	538 300
425	13 530	690	49 021	955	129 620	1220	283 200	1485	544 400
430	13 922	695	50 047	960	131 740	1225	287 000	1490	550 700
435	14 322	700	51 089	965	133 890	1230	290 900	1495	556 900
440	14 731	705	52 150	970	136 070	1235	294 800	1500	563 300

Приложение II

Физические характеристики воздуха и продуктов сгорания среднего состава
(при давлении 0,1013 МПа)

Температура, °С	Средняя теплоемкость c , кДж/(м ³ ·К)		Коэффициент теплопроводности $\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К)		Коэффициент кинематической вязкости $\nu \cdot 10^6$, м ² /с	
	воздуха	продуктов сгорания	воздуха	продуктов сгорания	воздуха	продуктов сгорания
0	1,318	1,359	2,47	2,28	13,3	12,2
100	1,324	1,370	3,21	3,13	23,2	21,5
200	1,332	1,381	3,93	3,93	34,9	32,8
300	1,342	1,397	4,61	4,84	48,3	45,8
400	1,354	1,415	5,22	5,70	63,1	60,4
500	1,366	1,431	5,76	6,56	79,2	76,3
600	1,382	1,448	6,22	7,42	96,8	93,61
700	1,396	1,460	6,71	8,28	115,1	112,1
800	1,410	1,472	7,18	9,16	134,7	131,8
900	1,424	1,485	7,64	10,01	155,2	152,5
1000	1,437	1,498	8,08	11,12	176,7	174,3
1100	1,449	1,511	8,51	11,75	199,2	197,1
1200	1,460	1,523	8,93	12,62	222,7	221,00
1300	1,472	1,535	9,52	13,50	248,9	246,5
1400	1,483	1,548	9,99	14,42	273,0	272,0

Предметный указатель

- Агрегат котельный 190
Аррениуса закон 35
Архимеда критерий 432
Асбест 115
Аэрозоль 211
- Баланс тепловой 22
— — сталеплавильного агрегата 427
Балка подпятовая 121
Бетон огнеупорный 109
Бугера—Бера закон 33
— — уравнение 37
- Вагранка 395
Ванна сталеплавильная:
 перемешивание 434
 продувка кислородом 430
 — газокислородная 439
Вентури головка 460
— скруббер 224
Вермикулит 115
Волокна керамические 116
— минеральные 116
Выбросы вредные 235
- Газ:
 доменный 232
 конвертерный 202, 239
 мартеновских печей 237
 очистка 211
 — мокрая 221
 — сухая механическая 212
 — фильтрацией 218
 — электрическая 226
 печей цветной металлургии 247
 плазмообразующий 532
 утилизация тепла 160
 электросталеплавильных печей 245
Гарниссаж защитный 113
Глинкова М. А. теория печей 11
Горелка:
 газо-кислородная 444
 газо-мазутная 83
 для печей конвективного нагрева 331
 инжекционная 48
 керамическая 52
 пламенная двухпроводная 55
 плоскопламенная 65
 с регулируемой длиной пламени 63
 туннельная 52
 турбулентная 60
Гравий 118
Грунт 119
Группа дроссельная 234
- Дейча зависимость 228
Диатомит 115
Динас 96
Дым 211
- Земля инфузорная 115
Зонолит 115
- Иванова Ю. В. выражение 40
Изделия огнеупорные:
 алюмосиликатные 98
 высокоглиноземистые 101
 доломитовые 104
 износ истиранием 131
 карбидкремниевые 106
 классификация 86
 кремнеземистые 95
 магнезиальношпинелидные 105
 многошамотные 100
 неформованные 109
 периклазовые 102
 полукислые 101
 разрушение газами 129
 растрескивание 130
 свойства 96
 смолодоломитовые 104
 специальные 108
 тальковые 104
 углеродистые 107
 форстеритовые 105
 характеристика 94
 цирконистые 107
 шамотные 99
- Камень бутовый 118
Камера осадительная 213
Каупера аппараты 167
Кирпич строительный 117
Кладка 122
Колодец нагревательный 279
— — регенеративный 284
— — рекуперативный 286
Конвейер печной:
 роликовый 149
 цепной 145
 шагающий 137
Конвертер кислородный:
 Кал-До 251
 с верхней продувкой 446
 с донной продувкой 454
 характеристика 444
 цветной металлургии 487
 — — конструкция 493
Котел паровой 190
— утилизатор 192
— — конвертерный 205
Коэффициент использования топли-
ва 22
Кристаллизатор 523
- Ленца—Джоуля закон 508
- Магнезит 103
Мазут 72
Масса набивочная 111

Материал:

- огнеупорный 86
 - газопроницаемость 91
 - огнеупорность 88
 - пористость 91
 - теплопроводность 92
 - термостойкость 89
 - химическая стойкость 90
 - электропроводность 93
- строительный 117
- теплоизоляционный 114
 - естественный 115
 - искусственный 115
- Металл жаропрочный 118
- Метан 32
- Модель селективная 270
 - серая 267
- Нагреватель печей 554
- Обмазка огнеупорная 113
- Огнеупоры — см. изделия и материалы огнеупорные
- Охлаждение испарительное печей:
 - доменных 197
 - мартеновских 199
 - нагревательных 201
- Пеноизделия 116
- Песок 118
- Печь:
 - двухванная 471
 - для автогенной плавки 495
 - — — на черновую медь 506
 - — — — штейн 495
 - доменная 259
 - дуговая 510
 - вакуумная 522
 - рудовосстановительная 526
 - сталеплавильная 517
 - индукционная 540
 - вакуумная 545
 - канальная 540
 - тигельная 542
 - каркас 121
 - карусельная 154
 - кладка 122
 - классификация 9
 - мартеновская 456
 - работа 463
 - устройство 548
 - нагревательная 275, 392
 - для нагрева блюмов и слябов 295
 - — — круглых заготовок 322
 - — — малоокислительного 401
 - — — слитков 279
 - кольцевая 154, 322
 - конвективного нагрева 327
 - кузнечных цехов 398
 - методическая толкательная 302

- секционная скоростного нагрева 324
 - с роликовым подом 319
 - с шагающим подом 313
 - тепловой режим 298
- обжиговая 263
 - кипящего слоя 477
- плавильная пламенная 365
 - — анодная 381
 - — вайербарсовая 381
 - — отражательная 366
- плазменная 529
- под 124
 - напряженность 22
 - производительность 22
 - режим работы 12
 - — печей-теплогенераторов 19
 - — — теплообменников 13
 - — температурный 20
 - — тепловой 21
- свод 125
- сооружение 126
- сопротивления 550
 - вакуумная 560
 - косвенного действия 553
 - плавильная 563
 - — электрошлакового переплава 564
 - прямого действия 550
- специальные 566
 - оптическая 579
 - электронно-лучевая 568
- стены 124
- температура 20
- термическая 334
 - колпаковая 347
 - проходная 341
 - садочная 339
 - специального назначения 410
- трубчатая вращающаяся 388
- фундамент 119
- шахтная 255, 358
- электрическая 508
- Пироскоп 88
- Плазматрон косвенного действия 530
 - прямого действия 531
- Пламя:
 - светящееся 31
 - толщина слоя 35
 - требования 25
 - характеристика 28
 - радиационная 31
- Показатель преломления 34
- Процесс:
 - автогенный 495
 - сталеплавильный 424
- Пушка электронная:
 - магнетронная 572
 - электростатическая 568
- Пылеулавливание:

- в производстве меди 253
- — никеля 254
- — олова 252
- — свинца 247
- — цинка 251
- Пылеуловитель инерционный 214
- Пыль 211
- Раствор огнеупорный 113
- строительный 118
- Регенератор 163
- конструкция 166
- основы расчета 170
- Рекуператор 43, 171
- керамический 185
- металлический 178
- расчет 188
- температурное поле 173
- Скрап 440
- Скруббер 222, 240
- Смеситель инъекционный 48
- Среда мутная 34
- Степень черноты 15
- — спектральная пламени 33
- Стокса закон 212
- сила 213
- Сушило:
 - барабанное 413
 - для сушки в пневмопотоке 415
 - с кипящим слоем 415
 - конвективным режимом работы 417
 - радиационным режимом работы 422
- Тальк 104
- Тепловыделение 9
- Теплогенерация 10
- Теплоизоляция — см. материалы теплоизоляционные
- Теплообмен:
 - в пламенных печах 265
 - излучением 27
 - при отоплении свободном 273
 - — торцевом 271
- Теплотехника металлургическая 11
- сталеплавильных процессов 424
- Тимофеева В. Н. формула 268
- Топливо:
 - выбор 41
 - метод сжигания 43
 - газо-мазутное 83
 - газообразное 45
 - жидкое 72
 - калориметрическая температура горения 41
 - теплота сгорания 42
 - удельный расход 25
- Торкретирование 112
- Торкрет-масса 112
- Трепел 115
- Трубы глиссажные 310
- радиантные 69
- Туман 211
- Турбина паровая 193
- Установка:
 - газотурбинная 195
 - диэлектрического нагрева 510, 566
 - для зонной плавки 581
 - плавки во взвешенном состоянии 546
 - подогрева шихты 443
 - сушки в высокочастотном электрическом поле 423
 - лазерная 511, 578
 - нагревательная 548
 - паротурбинная 192
 - шлаковозгоночная 248
 - электронно-лучевая 510
 - электропечная 511
- Устройство теплообменное 162
- Факел 25
- диффузионный 29
- длина 29
- коаксиальный 55, 56
- мазутный 73, 75
- несветящийся 13
- разомкнутый 39
- Фильтр 219
- Форсунка:
 - высокого давления 79
 - — конструкции В. Г. Шухова 80
 - низкого давления 76
 - — конструкции А. И. Карабина 78
 - характеристика 75
- Фундамент 119
- строительство 126
- Фурма 435
- газо-кислородная 440
- Футеровка:
 - кладка 122, 127
 - колодца нагревательного 138, 282
 - конвертера 133
 - печи доменной 132
 - дуговой 135
 - мартеновской 134
 - нагревательной 137
 - отражательной 135
 - сушка 128
- Циклон 216
- батарейный 218
- Шов температурный 124
- Щебень 118
- Электрофильтр 227, 244

Владимир Алексеевич КРИВАНДИН
Ирина Николаевна НЕВЕДОМСКАЯ
Вахтанг Валерианович КОБАХИДЗЕ
Виталий Витальевич БЕЛОУСОВ
Алексей Варнавьевич ЕГОРОВ
Виктор Антонович КРУЖКОВ
Юлий Петрович ФИЛИМОНОВ
Рольф ШТЕЙНГАРДТ

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

2

Конструкция и работа печей

Редактор издательства Н. Ф. Фокина
Художественный редактор Ю. И. Смургин
Технический редактор Г. Б. Жарова
Корректоры: Г. Ф. Лобанова, Н. П. Собко

ИБ № 2225

Сдано в набор 21.03.86. Подписано в печать 17.07.86. Т-16444.
Формат бумаги 60×90^{1/16}. Бумага книжно-журнальная. Гарнитура литературная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 37,0. Усл. кр.-отт. 37,0. Уч.-изд. л. 43,95.
Тираж 11 300 экз. Заказ 84. Цена 1 р. 80 к. Изд. № 0890

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Металлургия»
119857, ГСП, Москва, Г-34, 2-й Обыденский пер., д. 14

Ленинградская типография № 6 ордена Трудового Красного Знамени
Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой
Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
193144, г. Ленинград, ул. Монсеенко, 10.