



Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

ГРОЗНИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА
М.Д. МИЛЛИОНЩИКОВА

Институт нефти и газа имени академика С.Н. Хаджиева

Кафедра: «Теплотехника и гидравлика»

А.Д. Мадаева
Р.А-В. Турлуев
М.Х. Умарова
А.А. Джамалуева

ТОПЛИВО И ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ

Учебное пособие



Грозный – 2021

УДК 662.6

ББК 31.35

М 13

М 13 А.Д. Мадаева, Р.А-В. Турлуев, М.Х. Умарова, А.А. Джамалуева
Топливо и теория горения: учебное пособие / Мадаева А.Д., Турлуев
Р.А-В., Умарова М.Х., Джамалуева А.А. – Грозный: ГГНТУ, 2021. – 70 с.

Пособие по дисциплине «Топливо и теория горения» предназначено для бакалавров, обучающихся по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Пособие состоит из двух частей: «Топливо» и «Теория горения». В первой части рассмотрены: классификация основных видов топлива и их теплотехнические характеристики, элементный состав топлива, переработка твердого и жидкого топлива, подготовка твердого топлива к сжиганию. Во второй части представлены: историческое развитие общих представлений о горении, материальный баланс процесса горения, тепловой баланс процесса горения и т.д.

Пособие содержит необходимый нормативно-справочный и иллюстрационный материал. Предназначено для получения базовых знаний и выполнения курсовых и дипломных проектов, связанных с процессами горения

Издание осуществлено в авторской редакции

© Мадаева А.Д., 2021

© Турлуев Р.А-В., 2021

© Умарова М.Х., 2021

© Джамалуева А.А., 2021

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова», 2021

Содержание

Введение	5
1 Топливо	7
1.1 Энергетическое топливо и его виды	7
1.2 Происхождение ископаемых видов топлива	8
1.2.1 Твёрдое топливо	8
1.2.2 Нефть и природный газ	10
1.3 Элементный состав топлива	11
1.4 Виды исходной массы топлива	13
1.5. Теплотехнические характеристики топлива	16
1.5.1 Влажность топлива	16
1.5.2 Состав и содержание минеральных примесей. Зольность топлива. Свойства золы топлива.	18
1.5.3 Теплота сгорания топлива	24
1.5.3.1 Определение теплоты сгорания топлива	26
1.5.4 Выход летучих веществ и свойства коксового остатка	29
1.6 Промышленная классификация твердого топлива	32
1.7 Жидкое топливо	36
1.7.1 Переработка нефти	36
1.7.2 Свойства мазута	38
1.7.3 Газообразное топливо	44
1.8 Биотопливо	46
2 Теория горения	49
2.1 Историческое развитие общих представлений о горении.	49
2.2 Общие сведения о горении.	50
2.3 Материальный баланс горения топлива.	54
2.3.1 Материальный баланс процесса горения твердого и жидкого топлива.	56
2.3.2 Материальный баланс процесса горения газа.	59

2.3.3 Действительный объем воздуха и продуктов сгорания.	63
2.4 Тепловой баланс процесса горения	64
2.5 Способы сжигания топлива	71
2.5.1 Слоевое сжигание	72
2.5.2 Факельное сжигание.	76
2.5.3. Расположение горелок на стенках топочной камеры.	78
2.5.4 Сжигание в кипящем слое	83
2.6 Вихревые топки.	90
2.6.1 Высокотемпературное вихревое сжигание	90
2.6.2. Низкотемпературное вихревое сжигание.	91
Литература	96
Приложение 1	97
Приложение 2	98
Приложение 3	99

Введение

Непрерывно растущее потребление топливно-энергетических ресурсов требует рационального и экономного использования топлива. Это одна из важнейших проблем нашего времени.

Назначением любого устройства для сжигания топлива является превращение химической энергии топлива в тепловую энергию продуктов сгорания, которая, в свою очередь, либо передается другим рабочим телам (вода, пар), либо преобразуется в механическую энергию (газовая турбина, реактивный двигатель). Преобразование внутренней энергии топлива в тепловую энергию происходит в результате его сжигания.

Горение - это сложный физико-химический процесс, в котором химические реакции протекают одновременно с различными физическими явлениями, а следовательно, и интенсивность протекания реакции горения непосредственно зависит от таких физических явлений, как:

- движение подаваемых в зону горючих веществ (топлива) и окислителя (воздуха);
- аэродинамика струйного движения;
- турбулентная и молекулярная диффузия исходных веществ и продуктов реакций в газовом потоке;
- воспламенение и распространение пламени;
- передача теплоты, выделяемой в ходе реакций;
- удаление продуктов сгорания из зоны горения.

Понимание закономерностей процесса горения позволит:

- наиболее эффективно организовать сжигание различных топлив;
- повысить интенсивность и экономичность существующих способов сжигания;
- наметить пути для разработки новых, более современных способов сжигания.

В данном учебном пособии рассмотрены следующие вопросы: тенденции развития энергетики, классификация основных видов топлива и их теплотехнические характеристики, элементный состав топлива, переработка

твердого и жидкого топлива, подготовка твердого топлива к сжиганию, историческое развитие общих представлений о горении, материальный баланс процесса горения, тепловой баланс процесса горения и т.д. Пособие содержит необходимый нормативно-справочный и иллюстративный материал. Предназначено для получения базовых знаний, студентами, обучающимися по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», всех форм обучения. Подготовлено на кафедре «Теплотехника и гидравлика» Грозненского государственного нефтяного технического университета имени академика М.Д. Миллионщикова.

1 Топливо

1.1 Энергетическое топливо и его виды

Энергическим топливом называют горючие вещества, которые экономически целесообразно использовать для получения в промышленных целях больших количеств энергии. Природные запасы топлива должны удовлетворять потребностям, а добыча, переработка и использование - вызывать минимально возможное вредное воздействие на окружающую среду. Топливо является основой энергетики, поскольку более 2/3 всей вырабатываемой в России электроэнергии приходится на долю ТЭС, работающих на органических топливах. При этом менее 30 % всего добываемого топлива потребляется в энергетике, а около 33 % используется в транспорте и в технологических процессах (например, для выплавки чугуна, для варки стали, в машиностроении, в химической технологии и т.д.).

По способу получения различают природные (натуральные) и искусственные виды топлива.

К природным видам топлива относятся торф, бурые и каменные угли, антрацит, горючие сланцы, нефть и природный газ.

Искусственное топливо получают из природного топлива в процессе переработки. Из твёрдого топлива путём физико-механического облагораживания или термического разложения получают кокс, полукокс, топливные брикеты, различные горючие газы пиролиза. В результате термической переработки нефти получают бензин, керосин, соляровое масло, дизельное топливо, мазут. К искусственным видам топлива также относятся различные газы: доменный, генераторный, коксовый, сжиженный и другие.

В энергетических установках, как правило, применяются природные топлива и мазут.

По агрегатному состоянию различают твёрдые, жидкие и газообразные виды топлива.

1.2 Происхождение ископаемых видов топлива

1.2.1 Твёрдое топливо

Согласно современной теории, твёрдые горючие ископаемые (за исключением сланцев), то есть торф, бурые и каменные угли, антрациты, образовались в результате длительного процесса разложения органической массы растений.

Процесс формирования и свойства твердых ископаемых видов топлива зависят от исходного растительного материала и условий его преобразования. Исходя из этого, различают два крайних типа углей: гумусового и сапропелевого происхождения (гумус - перегной, сапропель - гниющий ил).

Исходным углеобразующим веществом углей гумусового типа является ежегодно отмирающая органическая масса многоклеточной наземной растительности, т.е. деревьев, кустарников, папоротников, трав, и др. Эта отмирающая масса, накапливалась в заболоченных местах, подверглась разложению при незначительном контакте с воздухом, а затем, после её опускания под слой воды или покрытия породой, - без доступа воздуха. В процессе такого преобразования исходная растительная масса превращалась в перегной (гумус), который и является исходным материалом для преобразования большей части твердых горючих ископаемых - углей гумусового типа (гумолитов).

Различают три стадии образования твердых топлив гумусового типа: торфяную, буроугольную и каменноугольную. В результате преобразования органической массы содержания углерода в ней повышается, при этом содержание кислорода, водорода и азота уменьшается. Процессы преобразования протекают в различных условиях (температура, давление, среда), а, следовательно, и с различной интенсивностью.

Поэтому степень углефикации топлива, под которой понимают освобождение от наиболее непрочных содержащих кислород компонентов и

обогащение углеродом, различна. Степень углефикации, т.е. химического старения, твердого топлива не всегда соответствует его геологическому возрасту, под которым, в свою очередь, понимают период времени процесса углеобразования.

В соответствии со степенью углефикации твердые топлива можно выстроить в следующий ряд: торф, бурый уголь, каменный уголь, антрацит.

Самое молодое из них - торф, представляет собой темно-бурую бесструктурную массу, в которой встречаются остатки неразложившихся и полуразложившихся растений.

Следующим по “возрасту” являются бурые угли - землистая или черная однородная масса, которая при хранении на воздухе частично окисляется и рассыпается в порошок.

Из бурых углей далее образуются каменные угли, обладающие, как правило, повышенной прочностью и меньшей пористостью, и наконец - антрациты, которые отличаются высокой твердостью и наибольшим содержанием углерода (до 95%).

Процесс образования углей сапропелевого класса происходит несколько иначе. В качестве исходного углеобразующего вещества выступают низшие растения (водоросли, лишайники и др.), бактерии, грибы, а также микроорганизмы (планктон). Оседая на дно озер, заливов, застойных водоемов мелководных морей, они подвергались разложению практически без доступа воздуха. В результате разложения образовывался твердый остаток - гниющий ил (сапрпель). Сапрпель отличается от твердого продукта преобразования высших растений (гумуса) повышенным содержанием водорода, воска, смолистых веществ и относительно низким содержанием кислорода и минеральных примесей. Торфяная стадия изменения сапрпеля завершается образованием плотной бесструктурной массы. Дальнейшая углефикация приводит к образованию сапрпелевых углей. Буроугольная стадия этих углей - богхеды.

За исключением богхедов, твёрдые горючие ископаемые сапропелевого происхождения встречаются относительно редко.

Существуют также угли смешанного происхождения с преобладанием гумусового или сапропелевого материала. К твёрдым топливам этого класса относятся горючие сланцы, представляющие собой многозольные глинисто-известковые твёрдые минеральные породы, пропитанные нефтеподобными органическими веществами сапропелевого происхождения.

1.2.2 Нефть и природный газ

Естественное жидкое топливо - сырая нефть - представляет собой смесь органических соединений, главным образом, различных углеродов (метанового – C_nH_{2n+2} , нафтенового - C_nH_{2n} , ароматического - C_nH_{2n-6} классов), а также включает в себя некоторое количество жидких кислородосодержащих, сернистых и азотистых соединений, парафин и смолы.

Нефть - вязкая маслянистая жидкость бурого цвета (плотность от 730 до 1040 кг/см³). Нефть в основном перерабатывается с целью извлечения более лёгких фракций (бензин, керосин, лигроин, газойль). Оставшийся после переработки нефти тяжёлый остаток - мазут - используется как энергическое топливо.

Природный газ представляет собой смесь горючих и негорючих газов, содержащую определенное количество водяного пара и механических примесей (пыли и смолы).

Существует различные представления о происхождении нефти и газа. Наиболее вероятной и достоверной считается теория органического происхождения. Согласно этой теории, основой для образования нефти и газа послужил сапропель, процесс преобразования которого происходил на значительной глубине при повышенных давлении и температуре. В результате воздействия естественных катализаторов (например, глины, входящей в состав ила, радиоактивных элементов и др.) из сапропеля образовывались жидкие

углероды с различной молекулярной массой, т.е. нефть, и газообразные смеси, состоящие преимущественно из лёгких углеродов метанового ряда, - природные газы.

Таким образом, газы образовывались вместе с нефтью. Значительная часть более тяжелых составляющих их растворена в нефти, а часть, состоящая, в основном, из более легких компонентов, скапливается над уровнем нефти.

Благодаря большой проникающей способности, природные газы перемещаются в пористых горных породах на большие расстояния от места своего образования и, накапливаясь, образуют чисто газовые месторождения.

1.3 Элементный состав топлива

Состав и качество топлива определяются в специально оборудованных лабораториях химическим и механическим анализами средней пробы партии топлива.

Газообразное топливо представляет собой смесь горючих и негорючих газов, содержащую некоторое количество примесей (воды и пыли). Состав и содержание отдельных газов, входящих в газообразное топливо, сравнительно легко определяются газовым анализом. Поэтому состав газообразного топлива принято выражать в виде объемных долей отдельных газов (CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} , C_5H_{12} , CO , H_2 , CO_2 , N_2 , O_2 и др.) в процентах к объему сухого газа в смеси при нормальных условиях (температура 0 С, давление 760 мм рт.ст.).

Все вещества в составе твёрдого и жидкого топлива находятся в нём в виде сложных высокомолекулярных органических соединений. Качественный, и, особенно, количественный анализы соединений, входящих в состав твёрдого и жидкого топлива, требуют проведения сложных и трудоёмких лабораторных исследований. Поэтому состав топлива принято выражать не в виде соединений, а содержанием (в процентах по массе) отдельных химических элементов: углерода (С), водорода (Н), серы летучей (S), кислорода (О), азота (N), а также золы (А) и влаги (W).

Горючими элементами твёрдого и жидкого топлива являются углерод, водород и сера (органическая и пиритная). В связанном с ними состоянии кислород и азот, которые образуют внутренний балласт топлива. Зола и влага составляют внешний балласт топлива.

Основным горючим элементом твёрдого и жидкого топлива, содержание которого обуславливает выделение основного количества теплоты, является углерод. Он имеет высокую удельную теплоту сгорания (120,5 МДж/кг), но его содержание в топливе сравнительно мало (1+5 % в твёрдых топливных и 10÷11 % в мазуте), поэтому доля водорода в суммарном тепловыделении при горении топлива значительно меньше, чем углерода.

Сера имеет невысокую теплоту сгорания (9,3 МДж/кг), содержится в топливе в небольших количествах (0,3÷3 % в углях и мазуте) и поэтому не представляет ценности как горючий элемент.

Сера в топливе содержится в трёх видах: органическая S_o , пиритная (или сульфидная) $S_{п}$ и сульфатная S_{so4} .

Органическая сера входит в состав сложных высокомолекулярных соединений, пиритная сера находится в топливе в виде сульфиде металлов, например, FeS_2 (пирит, или железный колчедан), $CuFeS_2$ (халькопирит, или медный колчедан). Органическая и пиритная сера составляют горючую (летучую) серу, которая отдельной составляющей входит в элементный состав топлива:

$$S_{л} = S_o + S_{п}, \% \quad (1)$$

Сера в сульфатах ($CaSO_4$, $MgSO_4$, $FeSO_4$ и т.д.) находится в виде высших оксидов, поэтому её дальнейшее окисление (горение) не происходит. Сульфаты являются минеральной примесью топлива и входят в состав золы.

При горении серы образуется серистый ангидрид SO_2 и некоторое количество серного ангидрида SO_3 . Серный ангидрид при соединении с водяным паром, содержащимся в продуктах сгорания, образует пары серной кислоты, которые, конденсируясь на низкотемпературных элементах различных теплотехнических установок, вызывают их сернокислотную

(низкотемпературную) коррозию. Кроме того, оксиды серы и пары серной кислоты отравляют атмосферу и оказывают вредное влияние на животный и растительный мир. Поэтому сера является вредным и нежелательным элементом в топливе.

Кислород и азот, связанные с горючими элементами топлива (в виде органических соединений), снижают удельную теплоту его сгорания и образуют внутренний балласт топлива. Азот, являясь инертным газом, тем не менее, при высоких температурах образует в соединении с кислородом высокотоксичные NO_x . Предельно допустимая концентрация оксидов азота в приземном слое $\text{ПДК}_{\text{NO}_x} = 0,085 \text{ мг/м}^3$, а проблема снижения выбросов NO_x при сжигании всех видов топлива (особенно твёрдых) актуальна во всём мире.

1.4 Виды исходной массы топлива

Топливо в том виде, в котором оно поступает к потребителю, называется рабочим, а составляющее его вещество - рабочей массой. Все компоненты рабочей массы обозначаются индексом r (от *англ. raw - сырой, необработанный*):

$$C^r + H^r + S_{o+p}^r + O^r + N^r + A^r + W^r = 100\% \quad (2)$$

Влажность и зольность твердого топлива, даже в пределах одного сорта и одного месторождения, могут значительно колебаться, а также изменяться в процессе транспортировки и хранения. Поэтому элементный состав рабочей массы топлива является неустойчивой характеристикой топлива. Более устойчивой характеристикой является элементный состав сухой массы топлива (индекс d - от *англ. dry - сухой*):

$$C^d + H^d + S_{o+p}^d + O^d + N^d + A^d = 100\% \quad (3)$$

Сухую массу топлива целесообразно использовать для выражения содержащейся в нем золы A^d . Однако и сухая масса топлива *также не является устойчивой* характеристикой, так как содержание золы зависит от способа и условий ее добычи.

Устойчивой (неизменяемой) характеристикой любого твердого топлива является сухая беззольная (горючая) масса. Сухая беззольная масса представляет собой сумму горючих элементов (C, H, S_{o+p}) и химически связанного с ними внутреннего балласта (индекс daf - от англ. dry ash free - сухой, беззольный):

$$C^{daf} + H^{daf} + S_{o+p}^{daf} + O^{daf} + N^{daf} = 100\% \quad (4)$$

По аналогии вводится понятие беззольной массы (индекс af - от англ. ash free - беззольный), которое фигурирует в классификации топлива.

Для проведения лабораторных исследований твердого топлива пользуются отобранной пробой рабочего топлива, измельченной и подсушенной до такой влажности, которая при хранении топлива в лабораторных условиях не изменяется, - воздушно-сухая, или аналитическая проба (индекса а):

$$C^a + H^a + S_{o+p}^a + O^a + N^a + A^a + W^a = 100\% \quad (5)$$

Состав твердого и жидкого топлива можно представить в виде графического отображения (рис.1):

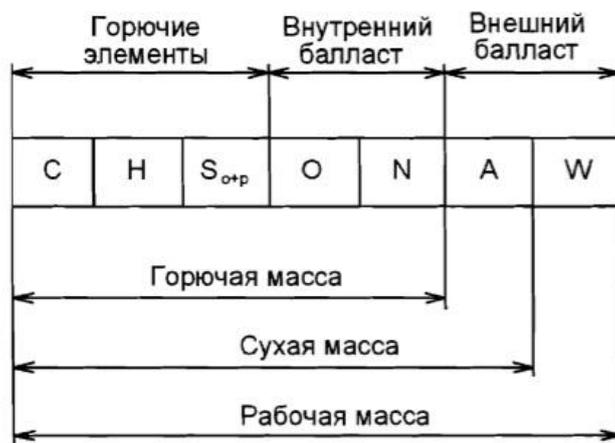


Рисунок 1 - Элементный состав топлива

Состав топлива различных видов и месторождений приводится в таблицах технических характеристик топлива. Пересчёт элементного состава топлива с одной массы на другую осуществляется с помощью соответствующих формул.

При заданной рабочей массе топлива содержание каждого из компонентов в горючей (сухой беззольной) массе рассчитывается по формуле:

$$X^{daf} = X^r \cdot \frac{100}{100 - W^r - A^r}, \quad (6)$$

где X^{daf} и X^r - содержание соответствующего компонента в горючей и рабочей массе, %.

При заданной влажности и зольности рабочей массы определение остальных ее составляющих по известному составу горючей массы производится по формуле:

$$X^{daf} = X^r \cdot \frac{100 - W^r - A^r}{100} \quad (7)$$

Если известен состав сухой массы топлива, то формула пересчёта любой из составляющих на горючую массу:

$$X^{daf} = X^d \cdot \frac{100}{100 - A^d}, \quad (8)$$

а на рабочую массу (при заданной влажности):

$$X^r = X^d \cdot \frac{100 - W^r}{100} \quad (9)$$

Соответствующие коэффициенты пересчета приведены в таблице 1.

Таблица 1

Коэффициенты пересчета состава топлива

Заданная масса топлива	Искомая масса топлива		
	рабочая	сухая	горючая
Рабочая	1	$\frac{100}{100 - W^r}$	$\frac{100}{100 - W^r - A^r}$
Сухая	$\frac{100 - W^r}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^d}$
Горючая	$\frac{100 - W^r - A^r}{100}$	$\frac{100 - A^d}{100}$	1

Для оценки топлива при расчетах и эксплуатации удобно пользоваться так называемыми приведенными характеристиками зольности A^n , влажности W^n и серности $S_{л}^n$, отнесенными к 1 МДж низшей теплоты сгорания 1 кг рабочей массы топлива Q_i^r :

$$A^n = \frac{A^r}{Q_i^r}, \frac{\% \cdot \text{кг}}{\text{МДж}} \quad (10)$$

$$W^n = \frac{W^r}{Q_i^r}, \frac{\% \cdot \text{кг}}{\text{МДж}} \quad (11)$$

$$S_{л}^n = \frac{S_{л}^r}{Q_i^r}, \frac{\% \cdot \text{кг}}{\text{МДж}} \quad (12)$$

1.5. Теплотехнические характеристики топлива

К теплотехническим характеристикам топлива относятся теплофизические свойства, которые оказывают существенное *влияние* на процесс горения, эксплуатацию топок, камер сгорания и устройств для транспортировки, хранения и подготовки топлива к сжиганию: содержание горючих веществ, влаги, минеральных примесей, удельную теплоту сгорания, физико-механические характеристики (плотность, вязкость и др.). Для твёрдого топлива важными характеристиками являются также выход летучих веществ, свойства кокса и золы.

Состав и основные теплотехнические характеристики топлива приведены в приложении.

1.5.1. Влажность топлива

Влага топлива подразделяется на внешнюю (свободную) и внутреннюю (связанную).

Внешняя влага, в свою очередь, делится на поверхностную и капиллярную.

К поверхностной, или механически удерживаемой, влаге относят ту часть воды, которая, попадая в топливо из подземных и грунтовых вод или атмосферных осадков, осажается на поверхности частиц топлива. Очевидно, что количество поверхностной влаги зависит от удельной поверхности частиц топлива (чем меньше размер кусков, тем больше удельная поверхность) и свойств этой поверхности, в первую очередь, её способности к смачиванию. Поэтому измельчение твердого топлива целесообразно лишь после транспортировки с места добычи к месту потребления. Количество поверхностной влаги обычно не превышает 3-5 % массы топлива.

Капиллярная влага находится в капиллярах и порах частиц топлива. Поры с диаметром более 10 мкм заполняются при прямом контакте с водой, в порах с меньшим размером возможна конденсация влаги из воздуха. Ее содержание зависит от водоносности месторождения и атмосферных условий в период транспортировки и хранения топлива. С повышением степени углефикации (содержание углерода в топливе) количество капиллярной влаги уменьшается.

Внешняя влага может быть удалена механическими средствами и тепловой сушкой.

К внутренней относят коллоидную и гидратную влагу.

Коллоидная влага является составной частью органической массы топлива. Ее количество зависит от вида топлива и его химического возраста. По мере увеличения степени углефикации содержание коллоидной влаги уменьшается. (В торфе и бурых углях 10-15 %, в молодых каменных углях 3-6%, в старых углях и антрацитах 0,5-1 %). Коллоидная влага удаляется в процессе сушки при температуре 102-105 °С.

Гидратная, или кристаллизационная, влага химически связана с минеральными примесями топлива и образует соединения минеральных веществ с водой, например, силикаты $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$, $Fe_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$, сульфаты $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, $MgSO_4 \cdot 2H_2O$ (так называемые кристаллогидраты) и др. Содержание гидратной влаги в топливе обычно невелико. Она становится заметной лишь в многозольном топливе. При сушке топлива гидратная влага,

в отличие от коллоидной, не испаряется. Она выделяется только при дегидратации в процессе термического разложения топлива при температуре 600 °С и выше.

Технической характеристикой, отражающей содержание в топливе влаги, является влажность W_t^r . Она определяется по изменению массы топлива в результате сушки при температуре 102-105 °С в стандартных условиях и выражается в процентах от начальной навески топлива. Так как при сушке вода из гидратов топлива не выделяется, то влажность меньше действительного содержания влаги W на величину кристаллогидратной воды $W_{\text{гидр}}$, т.е. $W_t^r = W - W_{\text{гидр}}$. Однако это расхождение незначительно.

1.5.2 Состав и содержание минеральных примесей. Зольность топлива.

Свойства золы топлива.

Несгоревшая часть топлива образует очаговые остатки, которые, в зависимости от условий сжигания и от местонахождения в разных частях топки и газоходах, могут принимать форму шлака или золы.

Зола — это твёрдый негорючий порошкообразный остаток, получившийся после завершения преобразований в минеральной части топлива в процессе его горения. Различают летучую золу — пылевидные фракции, уносимые уходящими газами, и провал — более крупные фракции золы, покидающие зону горения через холодную воронку.

Шлак — это минеральная масса, подвергшаяся высокотемпературному нагреву, в результате которого она приобрела значительную прочность за счёт оплавления и спекания.

Зольность, как техническая характеристика, представляет собой массу золы, отнесённую, как правило, к сухой массе топлива и выраженную в процентах A^d .

Минеральные примеси, в зависимости от их происхождения, подразделяются на первичные, вторичные и третичные.

Состав и содержание первичных примесей, внесённых в топливо с исходным органическим углеобразующим материалом, и вторичных, которые попадают в топливо в процессе углеобразования, для каждого конкретного месторождения довольно стабильны. Они равномерно распределены в топливе, и их механическое отделение практически неосуществимо.

Третичные (внешние) минеральные примеси попадают в топливо в процессе разработки месторождения, добычи топлива, его транспортировки и хранения (пустая порода, земля, песок). Третичные примеси обычно неравномерно распределены в топливе и могут сравнительно легко отделяться от топлива (например, в процессе его обогащения).

Минеральные примеси уменьшает содержание горючих веществ в единице массы топлива снижают удельную теплоту его сгорания.

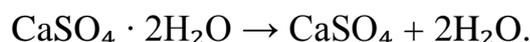
Основными минеральными примесями твёрдых топлив являются:

- кремнезём SiO_2 (до 50%);
- глинозём Al_2O_3 (до 25%);
- оксиды Na_2O , K_2O , CaO , MgO , Fe_2O_3 , TiO_2 (до 25%);
- сульфиды (преимущественно FeS_2);
- карбонаты CaCO_3 , MgCO_3 , FeCO_3 ;
- сульфаты CaSO_4 , MgSO_4 ;
- фосфаты, хлориды, соли щелочных металлов.

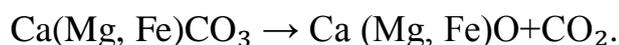
Помимо перечисленных основных компонентов, в минеральных примесях твердого топлива могут присутствовать соединения многих редких элементов: германия, кобальта, никеля, палладия, платины, урана и др.

При сжигании топлива многие компоненты его минеральных примесей подвергаются химическим преобразованиям, в результате которых масса и состав образующейся золы всегда отличается от массы и состава исходных минеральных примесей топлива:

При температуре свыше 500÷600 °С протекают реакции дегидратации, т. е. происходит выделение гидратной влаги из гипса, алюмосиликатов (глин), оксидов и гидроксидов железа с образованием Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , H_2O , например:



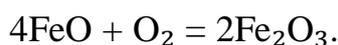
В интервале температур 500÷900 °С происходит разложение карбонатов с выделением диоксида углерода:



Разложение сульфата железа протекает при 850÷950 °С:

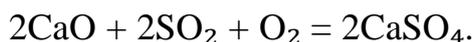


При температуре выше 400 °С начинается окисление соединений Fe^{+2} до Fe^{+3} :



Улетучивание хлоридов и соединений щелочных металлов происходит при температуре выше 500 °С.

В интервале температур 700÷1000 °С происходит образование сульфата кальция:



Эта реакция протекает по мере выделения SO_2 при сгорании органической серы и окислении дисульфида железа (железного колчедана), а также разложения карбонатов, содержащихся в минеральной массе углей. Именно благодаря протеканию этой реакции возможно эффективное связывание оксидов серы в топках с низкотемпературным кипящим слоем. При температуре выше 1000 °С начинается диссоциация сульфатов.

При рассмотрении реакций, происходящих в процессе преобразования минеральных примесей топлива, можно сделать следующие общие выводы:

1. В процессе горения химический состав минеральной части топлива значительно изменяется, поэтому масса и состав золы никогда не равны массе и составу минеральных веществ.

2. Среди реакций, протекающих в минеральной массе при озолении углей, преобладают реакции разложения, поэтому зольность угля почти всегда получается несколько меньше, чем содержание минеральной массы.

3. Каждая из приведенных реакций протекает на определенных стадиях озоления угля и в определенном интервале температур. В соответствии с этим масса и состав золы, полученной при озолении одного и того же угля при разных температурах (например, 800 и 1500 °С), будут значительно различаться.

При сжигании твёрдого многозольного топлива возникают затруднения, обусловленные плавлением золы и образованием шлака, обладающего определённой плавкостью и вязкостью, в зависимости от состава золы и температурных условий. В состав минеральных примесей твёрдого топлива входят вещества, имеющие как сравнительно низкую температуру плавления 800-1000 °С (оксиды натрия и калия), так и очень высокую – 1600-2500 °С (оксиды магния и алюминия). Однако плавкость золы зависит не только от температуры плавления отдельных компонентов, но и от среды, в которой она нагревается. В полувосстановительной среде, которая не содержит кислород, зато включает в себя восстановительные компоненты (СО, Н₂, СН₄) и СО₂, температура плавления золы топлива на 100-300 °С ниже, чем в окислительной среде, содержащей свободный кислород.

Стандартный метод определения характеристик плавкости золы (рис.2) заключается в постепенном нагревании в полувосстановительной среде специально спрессованной из золы трёхгранной пирамидки высотой 13 мм, в основании которой лежит равносторонний треугольник со стороной, равной 6 мм, причём одна из граней пирамидки перпендикулярна к её основанию. В процессе нагревания фиксируют характерные значения температур в печи, при которых пирамидка изменяет геометрические формы:

t_A — температура, при которой вершина пирамидки начинает изгибаться или закругляться, — температура начала деформации;
 t_B — вершина пирамидки наклоняется до основания, или пирамидка превращается в шар, — температура начала размягчения;
 t_C — пирамидка растекается по подставке — температура начала жидкоплавкого состояния.

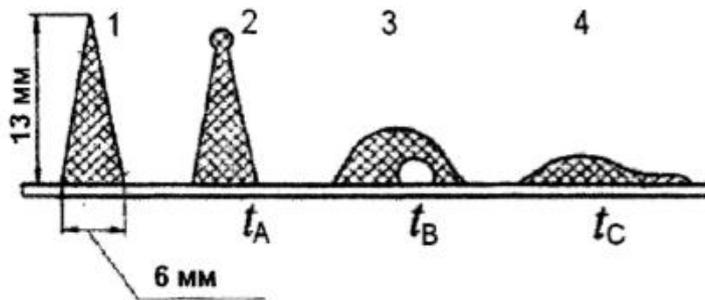


Рисунок 2 - Характерные конфигурации образца при определении плавкости золы:

1—до нагрева; 2—начало деформации; 3—размягчение; 4 - жидкоплавкое состояние

Температуры плавкости золы приводятся в таблицах технических характеристик топлив в справочной литературе.

В зависимости от температуры начала жидкоплавкого состояния t_C все твёрдые топлива разделяются на три группы:

- с легкоплавкой золой ($t_C < 1350$ °С);
- с золой средней плавкости ($t_C = 1350-1450$ °С);
- с тугоплавкой золой ($t_C > 1450$ °С).

Большинство энергетических топлив имеют легкоплавкую золу.

Характерной является также температура, при которой все компоненты шлака полностью расплавляются, и в нём отсутствует твёрдая фаза (температура истинно жидкого состояния, или критическая). При такой температуре шлак подчиняется законам течения жидкости.

На работу топки (в первую очередь, на стойкость огнеупорных материалов) существенное влияние оказывают химические свойства золы и шлака топлива.

Оксиды, входящие в состав золы, можно разделить на три группы:

- кислые — SiO_2 , TiO_2 , P_2O_5 ;
- основные — CaO , MgO , FeO , K_2O , Na_2O ;
- амфотерные — Al_2O_3 , Fe_2O_3 .

Для амфотерных оксидов характерно то, что в сплавах, содержащих преобладающее количество основных оксидов, они ведут себя как кислые, и наоборот.

Зола и шлак по химическим свойствам разделяются на кислые, основные и нейтральные.

К кислым относятся зола и шлак, у которых отношение содержания кислых оксидов к суммарному содержанию основных и амфотерных оксидов, называемое кислотностью, $K > 1$.

К основным — если отношение содержания основных оксидов к суммарному содержанию кислых и амфотерных, называемое основностью, $O > 1$.

Зола и шлак, не удовлетворяющие этим условиям, являются нейтральными.

Расплавленный шлак не только осложняет эксплуатацию слоевых и факельных топок, загрязняет конвективные поверхности нагрева котла, снимает интенсивность теплообмена, но может и разрушать огнеупорную обмуровку.

Огнеупорные материалы по своим химическим свойствам так же, как и зола и шлак, делятся на кислые, основные и нейтральные. Если футеровка топки выполнена из огнеупорного материала, химическая среда которого не соответствует химическим свойствам золы и шлака сжигаемого топлива (например, огнеупорный материал кислый, а зола и шлак - основные, или наоборот), то между футеровкой и золой (шлаком) может произойти химическое взаимодействие, вызывающее интенсивное разрушение футеровки. Поэтому при выборе материала для футеровки стен топки необходимо учитывать химические свойства золы топлива, которое предполагается сжигать.

1.5.3 Теплота сгорания топлива

Наиболее важной теплотехнической характеристикой топлива является теплота сгорания (теплотворная способность), т.е. количество теплоты, выделяющейся при полном сгорании единицы массы твёрдого или жидкого (кДж/кг) или единицы объёма газообразного (кДж/м³) топлива.

Теплоту сгорания, так же как и элементный состав, относят к рабочей, сухой или горючей массе топлива: Q^r , Q^d , Q^{daf} .

В зависимости от того, в каком состоянии (жидком или газообразном) находятся в продуктах сгорания водяные пары, различают высшую (Q_s) и низшую (Q_i) теплоту сгорания (индексы s — от *англ.* superior — *высший*, i — inferior — *низший*).

Высшей теплотой сгорания Q_s называют максимальное количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании единицы количества топлива (1 кг — твёрдое или жидкое, 1 м³ — газообразное) с учётом теплоты конденсации водяным паров, содержащихся в продуктах сгорания.

В реальных промышленных установках температура входящих газов во избежание низкотемпературной коррозии должна превышать температуру конденсации водяного пара, а, следовательно, теплота его конденсации не используется. Поэтому во всех практических расчётах в качестве показателя теплотворной способности топлива применяют так называемую низшую теплоту сгорания Q_i . Таким образом, низшая теплота сгорания Q_i получается вычитанием из высшей теплоты сгорания Q_s теплоты конденсации водяных паров, которые образуются при испарении влаги, содержащейся в топливе, а также при сгорании водорода топлива:

$$Q_i^r = Q_s^r - Q_{\text{квп}} \quad (13)$$

Возникает вопрос, как определить численное значение теплоты конденсации водяных паров $Q_{\text{квп}}$.

Теплота конденсации водяных паров зависит от количества водяных паров, образующихся при сжигании 1 кг топлива $G_{ВП}$ (H_2O / кг топлива), а также от удельной (так называемой «скрытой») теплоты парообразования (или конденсации) r (кДж/кг):

$$Q_{квп} = r \cdot G_{ВП}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (14)$$

Скрытая теплота конденсации (парообразования) при атмосферном давлении $r = 539 \text{ ккал/кг} = 2260 \text{ кДж/кг}$. С учётом некоторого охлаждения дымовых газов можно принять $r = 600 \text{ ккал/кг} = 2500 \text{ кДж/кг}$.

Для определения расхода (количества) водяных паров необходимо понять источник (или источники) их возникновения. Во-первых, водяные пары образуются при испарении влаги, входящей в состав топлива, при этом их масса равна массе влаги в топливе:

$$G_1 = \frac{W^r}{100}, \frac{\text{кг } H_2O}{\text{кг топлива}} \quad (15)$$

Во-вторых, водяные пары образуются при сжигании водорода, входящего в состав топлива, в соответствии с реакцией



Из реакции следует, что при полном сгорании 1 моля водорода (молекулярная масса водорода равна 2 кг) образуется 1 моль водяного пара (молекулярная масса 18 кг), т.е. при сжигании 2 кг водорода образуется 18 кг H_2O , а при сжигании 1 кг водорода — 9 кг H_2O . Тогда количество (масса) водяного пара, образовавшегося при сжигании 1 кг топлива, содержащегося водород в количестве H^r , получится:

$$G_2 = 9 \cdot \frac{H^r}{100}, \frac{\text{кг } H_2O}{\text{кг топлива}} \quad (16)$$

В итоге теплота конденсации водяных паров:

$$Q_{квп} = r \cdot (G_1 + G_2) = 2500 \cdot \left(\frac{W^r}{100} + 9 \frac{H^r}{100} \right) = 25 \cdot (W^r + 9H^r), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (17)$$

Тогда соотношение (математическая связь) между низшей и высшей теплотой сгорания представляется следующим образом:

$$Q_i^r = Q_s^r - 25(W^r + 9H^r), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (18)$$

$$Q_i^d = Q_s^d - 225H^d, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (19)$$

$$Q_i^{daf} = Q_s^{daf} - 225H^{daf}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (20)$$

В отличие от теплоты сгорания рабочей массы топлива Q^r , которая зависит от содержания внешнего балласта (зола и влаги), теплота сгорания горючей массы топлива Q^{daf} - величина, достаточно постоянная для конкретного месторождения. Поэтому, зная Q^{daf} и (по данным технического анализа топлива) влажность W^r и зольность A^r , можно рассчитать Q^r :

$$Q_i^r = Q_i^{daf} \frac{100 - W^r + A^r}{100} - 25W^r, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (21)$$

Соответственно, связь между теплотой сгорания рабочей и сухой массы:

$$Q_i^r = Q_i^d \frac{100 - W^r}{100} - 25W^r, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (22)$$

Пересечёт теплоты сгорания рабочей массы топлива при изменении влажности с W^{r_1} на W^{r_2} производится по формуле:

$$Q_{i2}^r = (Q_{i1}^r + 25W_1^r) \frac{100 - W_2^r}{100 - W_1^r} - 25W_2^r, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (23)$$

При одновременном изменении влажности и зольности топлива теплота сгорания пересчитывается так:

$$Q_{i2}^r = (Q_{i1}^r + 25W_1^r) \frac{100 - W_2^r - A_2^p}{100 - W_1^r - A_1^p} - 25W_2^r, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (24)$$

1.5.3.1. Определение теплоты сгорания топлива

Наиболее точно теплота сгорания твёрдого и жидкого топлива определяется экспериментально в специальном приборе (рис.3) - калориметрической бомбе.

В герметически закрываемом стальном цилиндрическом сосуде (калориметрической бомбе) сжигают навеску топлива в среде кислорода, подаваемого под давлением 2,5-3 МПа. Количество теплоты, выделяемой при сжигании топлива, определяется по повышению температуры воды в

калориметре, в который помещена калориметрическая бомба, и частей самого калориметра с учётом их водяного эквивалента. Температура воды в калориметре близка к температуре окружающего воздуха (20 °С), поэтому водяной пар, образующийся в бомбе при сжигании топлива, практически полностью конденсируется. Следовательно, тепловой эффект, измеряемый с помощью калориметра, должен соответствовать высшей теплоте сгорания. Однако, определённая таким образом теплота сгорания в бомбе Q_6 превышает высшую теплоту сгорания Q_s , так как при сгорании топлива в бомбе в среде кислорода протекают экзотермические реакции образования серной и азотной кислоты, которые в топочных условиях не имеют места.

Поэтому при расчёте теплоты сгорания следует соответствующие поправки.

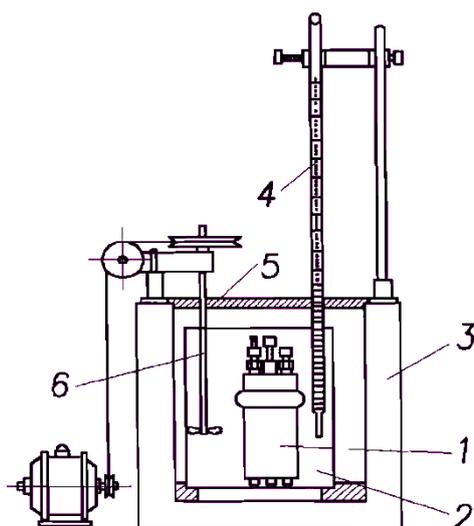


Рисунок 3 - Калориметрическая установка

1 — калориметрическая бомба; 2 - калориметр; 3 — наружная оболочка; 4 — термометр; 5 — крышка; 6 — мешалка с приводом

С учетом кислотообразования при сжигании навески аналитической массы топлива:

$$Q_s^a = Q_6^a - (\beta \cdot S_t^a + \alpha \cdot Q_6^a), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (25)$$

где β - коэффициент, учитывающий теплоту образования серной кислоты при окислении продуктов сгоревшей в бомбе серы S_t^a , %, от SO_2 до SO_3 и растворении серного ангидрида в воде. Численно этот коэффициент равен 94 кДж на 1% серы; α - коэффициент, учитывающий теплоту образования азотной кислоты, и равный: 0,001 для тощих углей, антрацита и жидкого топлива и 0,0015 - для других углей, сланцев и торфа.

При отсутствии опытных данных теплота сгорания твёрдого и жидкого топлива при заданном элементном составе топлива может быть приближённо рассчитана по формуле Д.И.Менделеева:

$$Q_i^r = 339C^r + 1030H^r + 109S_{o+p}^r - 109O^r - 25W^r, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (26)$$

где $C^r, H^r, S_{o+p}^r, O^r, W^r$ - соответственно, содержание углерода, водорода, летучей серы, кислорода и влаги в рабочей массе топлива, %.

Теплоту сгорания газообразного топлива определяют экспериментально в газовом калориметре и относят к 1 м^3 сухого газа при нормальных физических условиях.

При отсутствии опытных данных она определяется как сумма произведений объёмных долей отдельных горючих газов на теплоту их сгорания (МДж/м³):

$$Q_i^d = 0,01 \cdot [\sum(Q_{C_m H_n}) + Q_{CO} CO + Q_{H_2} H_2 + Q_{H_2 S} H_2 S], \quad (27)$$

где, $Q_{C_m H_n}, Q_{CO}, Q_{H_2}, Q_{H_2 S}$ - теплота сгорания отдельных газов (табл.2), МДж/м³, $C_m H_n, CO, H_2, H_2 S$ - объёмные доли соответствующих компонентов, %.

Подставив значения теплоты сгорания отдельных компонентов в формулу (1), можно получить универсальную формулу для расчёта теплоты сгорания газообразного топлива (МДж/м³):

$$Q_i^d = 0,01 \cdot [10,8 \cdot H_2 + 12,65 \cdot CO + 35,85 \cdot CH_4 + 63,8 \cdot C_2H_6 + \dots + 23,4 \cdot H_2S] \quad (28)$$

При сжигании смеси двух видов топлива теплота сгорания смеси определяется по формуле:

$$Q_{i_{см}}^r = Q_{i_1}^r m_1 + Q_{i_2}^r (1 - m_1), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, \quad (29)$$

где m_1 - массовая доля топлива с теплотворной способностью Q_{i1}^r .

Таблица 2

Теплота сгорания горючих газов

Газ	Химическая формула	Теплота сгорания Q_i^d , МДж/м ³
Водород	H ₂	10,8
Оксид углерода	CO	12,65
Метан	CH ₄	35,85
Этан	C ₂ H ₆	63,8
Пропан	C ₃ H ₈	91,3
Бутан	C ₄ H ₁₀	123,8
Пентан	C ₅ H ₁₂	146,3
Этилен	C ₂ H ₄	60,10
Пропилен	C ₃ H ₆	87,50
Бутилен	C ₄ H ₈	115,20
Ацетилен	C ₂ H ₂	56,90
Сероводород	H ₂ S	23,4

1.5.4 Выход летучих веществ и свойства коксового остатка

При нагревании твёрдого топлива происходит разложение термически нестойких молекул органических веществ горючей массы и углеводородистых соединений. Выделяющиеся при этом горючие (CH₄, CO, H₂) и негорючие (CO₂, O₂, N₂, SO₂ и др.) газы называются летучими веществами. (Водяной пар, выделяющийся при испарении влаги топлива, в состав летучих веществ не входит). Летучие вещества в топливе *не содержатся*, а образуются в результате его термического разложения. Поэтому говорят о выходе летучих веществ, а не об их содержании в топливе.

В процессе термического разложения в летучие вещества переходит не весь углерод топлива. Оставшийся после термического разложения углерод вместе с минеральными примесями образует твёрдый нелетучий остаток, называемый коксом.

Так как количество выделяющихся летучих веществ зависит от температуры и продолжительности нагрева, то при определении выхода летучих веществ температурный режим, условия и продолжительность нагрева топлива строго регламентированы.

При экспериментальном определении выхода летучих веществ навеску аналитической (воздушно-сухой) пробы топлива выдерживают в муфельной печи без доступа воздуха при температуре 830-870°C. Выход летучих - уменьшение массы пробы топлива (за вычетом содержащейся в ней влаги) - принято относить к горючей массе топлива и обозначать V^{daf} , % (от *англ. volatile* - *летучий*).

По величине выхода летучих все топлива делятся на две группы: пламенные и тощие.

Температура, при которой начинается выход летучих веществ, а также их количество зависят от химического возраста топлива. По мере увеличения степени углефикации топлива выход летучих веществ уменьшается, а температура начала их выхода увеличивается. При этом вследствие уменьшения количества инертных газов теплота сгорания летучих веществ увеличивается.

Выход летучих веществ и их состав оказывают существенное влияние на процесс воспламенения и горения. Топливо с высоким выходом летучих (торф, бурые угли, молодые каменные угли) при нагревании быстро выделяет значительное количество горючих газообразных веществ, которые легко воспламеняются и быстро сгорают. Оставшийся после выделения летучих кокс такого топлива содержит относительно малое количество углерода, поэтому горение его протекает также сравнительно быстро и с малыми потерями теплоты от недожога. Наоборот, топливо с малым выходом летучих (антрацит,

тощие угли) воспламеняется значительно труднее, а горение его коксового остатка протекает более продолжительное время.

Таблица 3

Выход и температура начала выхода летучих веществ

Вид топлива	Выход летучих, V^{daf} , %	Температура начала выхода летучих, °С
Торф	70 - 75	100 - 120
Бурые и молодые каменные угли	30 - 60	150 - 170
Старые каменные угли	10 - 15	380 - 400
Антрациты	2 - 9	400

Выход летучих веществ оказывает определённое влияние и на механические свойства коксового остатка. Топливо с очень высоким или малым выходом летучих веществ образует механически непрочный, легко рассыпающийся кокс. Это затрудняет слоевое сжигание такого топлива вследствие образования порошкообразного слоя кокса, плохо продуваемого воздухом.

При содержании в угле битуминозных веществ, которые при нагревании переходят в пластическое состояние или расплавляются, коксовый остаток может спекаться и вспучиваться. Способность топлива при термическом разложении без доступа воздуха переходить в пластическое состояние и образовывать относительно прочный кокс называется спекаемостью.

Процесс термического разложения топлива протекает в несколько стадий. При нагревании некоторых углей выше 300°С без доступа воздуха из них выделяются парогазовые и жидкие продукты, происходит размягчение частиц угля, благодаря чему они становятся пластичными (переход в пластическое состояние). При температуре 500-550°С пластическая масса затвердевает, и образуется спекшийся твердый остаток - полукокс. При

дальнейшем увеличении температуры (до 1000°C и более) в полукоксе снимается содержание кислорода, водорода, серы, а содержание углерода возрастает. Полукоксы переходят в кокс с повышенной твердостью и прочностью.

Коксуемость — свойство измельченного угля спекаться с последующим образованием кокса с установленными крупностью и прочностью кусков.

В зависимости от внешнего вида и прочности, различают следующие разновидности коксового остатка:

- порошкообразный;
- слипшийся;
- слабоспекшийся;
- спекшийся, не сплавленный;
- сплавленный, не вспученный;
- сплавленный, вспученный;
- сплавленный, сильно вспученный.

Угли, образующие спекшийся и сплавленный коксовый остаток, являются ценным технологическим топливом и используются, в первую очередь, для производства металлургического кокса (коксуемые угли).

1.6 Промышленная классификация твердого топлива

Ископаемые угли по установленным в России стандартам условно делятся на три основных типа: бурые, каменные и антрациты. Добываются они либо подземным способом (при глубоком залегании), либо открытым (при помощи экскаваторов), когда залежи их выходят на поверхность.

Угли могут подвергаться сортировке и обогащению (отделению от угля пустой породы).

К бурому (марка Б) относятся угли с

- неспекшимся коксовым остатком;
- высоким выходом летучих веществ ($V^{\text{daf}} > 40\%$);
- высшей теплотой сгорания беззольной массы $Q_s^{\text{af}} < 24 \text{ МДж/кг}$.

Бурые угли характеризуются пониженным содержанием углерода и повышенным содержанием кислорода, серы и влаги, имеют окраску от бурого до чёрного цвета. Содержание золы в сухой массе A^d колеблется, как правило, от 20 до 30 %. При сушке на воздухе они теряют механическую прочность, растрескиваются и обладают повышенной склонностью к самовозгоранию.

В зависимости от содержания влаги в беззольном топливе W^{af} , бурые угли делятся на три группы:

$$1Б — W^{af} \geq 50 \%;$$

$$2Б — 30 \% \leq W^{af} < 50 \%;$$

$$3Б — W^{af} < 30 \%$$

Бурые угли относятся к низкосортному топливу. Вследствие высокого содержания внешнего балласта бурые угли имеют невысокую низшую теплоту сгорания рабочей массы топлива: $Q_i^r = 23 \div 27,5$ МДж/кг.

К каменным относятся угли с

- высшей теплотой сгорания беззольной массы $Q_s^{af} > 24$ МДж/кг;
- выходом летучих веществ $V^{daf} > 9 \%$.

Вследствие меньшего содержания внешнего балласта ($A^d = 15-20 \%$, $W^r = 4-12 \%$) каменные угли обладают более высокой теплотой сгорания, чем бурые угли $Q_i^r = 23 - 27,5$ МДж/кг.

В зависимости от выхода летучих веществ и толщины пластического слоя, каменные угли подразделяются на следующие технологические марки:

- длиннопламенный - Д;
- газовый - Г;
- газовый жирный отощённый - ГЖО;
- газовый жирный - ГЖ;
- жирный - Ж;
- коксовый жирный - КЖ;
- коксовый - К;
- коксовый отощённый;

- коксовый слабоспекающийся низкометаморфизованный - КСН;
- коксовый слабоспекающийся - ОС;
- отощённый спекающийся - ОС;
- тощий спекающийся - ТС;
- слабоспекающийся - СС;
- тощий - Т.

Каменные угли обладают высокой механической прочностью, плотностью, способностью к коксованию, мало подвержено выветриванию и самовозгоранию.

По цвету и характеру излома кусков каменные угли можно разделить на следующие группы:

- блестящие, имеющие черный и яркий блеск;
- матовые, с тёмно-чёрным цветом без блеска;
- волокнистые, густого чёрного цвета, сохраняющие структуру древесины;
- слоистые, образованные рядом чередующихся слоёв и дающие в изломе блестящие и матовые полосы.

Угли с выходом летучих веществ $V^{daf} = 2 \div 9 \%$ относятся к антрацитам. Антрациты (марка А) характеризуется очень высоким содержанием углерода, достигающим в горючей массе $C^{daf} = 95 \div 96 \%$. Они обладают высокой механической прочностью, имеют черный с металлическим блеском цвет, не самовозгораются.

Угли, промежуточные между каменными и антрацитами, относят к полуантрацитам. Они отличаются выходом летучих веществ $V^{daf} = 5 \div 10 \%$ и теплотой сгорания несколько большей, чем у антрацитов (за счёт повышенного содержания водорода.)

Классификация углей по размеру кусков приведена в таблице 4.

Классификация углей по размеру кусков

Наименование	Обозначение	Размер кусков, мм
Плита	П	> 100
Крупный	к	50 - 100
Орех	О	25 - 50
Мелкий	М	13 - 25
Семечко	С	6 - 13
Штыб	Ш	< 6
Рядовой	Р	не ограничен

Торф по способу добычи подразделяется на *кусковой* (в виде кирпичей или брикетов) и *фрезерный* (в виде мелкой крошки). По глубине залегания торф подразделяется на *верховой*, *переходный* и *низинный*. Воздушно-сухой торф содержит до 40-50 % влаги. Зольность сухой массы колеблется от 3 до 10 %. Вследствие высокой влажности торф имеет низкую рабочую теплоту сгорания. Торф характеризуется плохой сыпучестью, склонностью к слеживанию, повышенной взрывоопасностью, высокой гигроскопичностью и легкостью смерзания.

Горючие сланцы характеризуются высоким выходом летучих веществ, достигающим 70-80 % в горючей массе, высокой зольностью (до 40-60 %), наличием серы (до 4 %) и карбонатов кальция, магния и железа, которые при сгорании сланца разлагаются, выделяя диоксид углерода. Влажность сланцев достигает 15-20 %. Наиболее целесообразно использовать сланцы в качестве сырья для газификации и получения горючих газов. При сухой перегонке сланцев выделяется значительное количество смол, близких по составу к нефти. Сланцы в основном образовались 450 млн. лет тому назад на дне моря из растительных и животных остатков.

1.7 Жидкое топливо

Одним из важных источников углеводородов является нефть - маслянистая жидкость темно-коричневого или черного цвета с плотностью 730-1040 кг/м³. Нефть представляет собой сложную смесь преимущественно жидких органических веществ.

По составу нефть бывает парафиновая (состоит из предельных углеводородов с прямой или разветвленной цепью), нафтеновая (содержит предельные циклические углеводороды) и ароматическая (включает ароматические углеводороды — бензол и его гомологи). Однако чаще встречается нефть смешанного типа. Кроме углеводородов, в состав нефти входят примеси органических кислородсодержащих и сернистых соединений, а также вода и растворенные в ней минеральные соли. Содержатся в нефти и механические примеси — песок и глина.

Нефть используют для получения высококачественных видов моторного топлива, а продукты её химической переработки являются ценным сырьём для получения многочисленных соединений, включая смазочные масла, ароматические вещества и другие синтетические материалы.

1.7.1 Переработка нефти

Наиболее простым способом переработки нефти является температурная перегонка — разделение её на фракции по температурам выкипания углеводородов, входящих в состав нефти (рис.4).

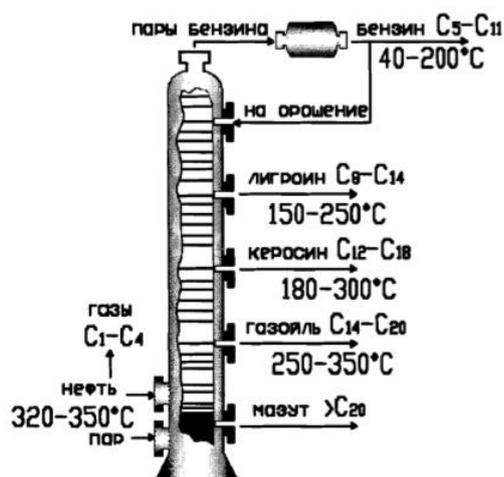


Рисунок 4 - Температурная перегонка нефти

Процесс разделения нефти на фракции основан, на том, то с увеличением молекулярной массы углеводородов повышается температура их кипения. При нагревании 200°C отгоняются наиболее лёгкие бензиновые фракции, при 250-300°C - керосиновые и т.д. В результате перегонки нефти на фракции получают 55-75% моторных топлив (бензина, керосина, газойля и др.) и 25-45 % тяжёлого нефтяного остатка (мазута). При таком способе переработки нефти молекулярная структура углеводородов не разрушается.

Бензин - горючая смесь лёгких углеводородов с температурой кипения от 40 до 200 °С. Плотность около 750 кг/м³. Температура замерзания ниже минус 60 °С. Теплотворная способность примерно 10500 ккал/кг (46 МДж/кг, или 34,5 МДж/л).

Лигроин - прозрачная желтоватая жидкость, не растворимая в воде. Пределы кипения 150-250 °С, плотность 785-795 кг/м³ и вязкость 1,2 мм²/с (при 20 °С). Лигроин вырабатывался, главным образом, как моторное топливо для тракторов. В связи с переводом тракторного парка на дизельные двигатели лигроин как моторное топливо утратил своё значение и применяется, в основном, в приборостроении в качестве наполнителя жидкостных приборов и как растворитель в лакокрасочной промышленности. Является более тяжёлым, чем бензин, и более лёгким, чем керосин.

Керосин - смесь углеводородов (от C_{12} до C_{18}), выкипающая в интервале температур 180-300°C, прозрачная, слегка маслянистая на ощупь, горючая жидкость. Плотность 780-850 кг/м³ (при 20 °С), вязкость 1,2-4,5 мм²/с (при 20 °С), температура вспышки 28-72 °С, теплота сгорания около 43 МДж/кг. Применяется в качестве растворителя (технический и осветлительный керосин) и авиационного топлива (авиакеросин).

Газойль - смесь углеводородов различного строения (от C_{14} до C_{20}) и примесей (серо-, азот- и кислородсодержащих) с пределами выкипания 250-500 °С. Лёгкий газойль (пределы выкипания 250-350 °С) - основной компонент дизельного топлива, тяжёлый газойль (350-500 °С) - маловязкий компонент топочного мазута.

Мазут - жидкий продукт темно-коричневого цвета, остаток после выделения из нефти бензиновых, керосиновых и газойлевых фракций, выкипающих до 350-360 °С.

В связи с интенсивным развитием всех видов транспорта и постоянно увеличивающейся потребностью в лёгких моторных топливах широкое применение получил способ глубокой переработки нефтепродуктов. Этот процесс глубокой переработки, основанный на расщеплении молекул тяжёлых углеводородов на более лёгкие, называется крекингом.

Крекинг протекает при высокой температуре 450-600 °С и резком снижении давления ($P = 4-5$ МПа). Чтобы ускорить крекинг, увеличить выход лёгких моторных топлив и провести его при более низкой температуре, применяют специальные катализаторы (каталитический крекинг).

1.7.2 Свойства мазута

Основным видом жидкого энергетического топлива является мазут. Он представляет собой тяжёлый остаточный продукт переработки нефти и состоит из наиболее тяжёлых углеводородов ($>C_{20}$). В состав мазута входят также асфальтосмолистые вещества, сернистые соединения, минеральные примеси и

влага, перешедшая в мазут из нефти. Мазут получают на нефтеперерабатывающих заводах одновременно с производством других продуктов (моторных топлив, смазочных масел и др.). В зависимости от условий переработки нефти (температурная разгонка или крекинг), получают либо прямогонный мазут, либо крекинг-мазут, который может содержать более сложные и тяжёлые жидкие углеводороды — например, гудрон и полугудрон.

Минеральные примеси мазута представляют собой соли щелочных металлов, которые при сжигании мазута частично переходят в оксиды, обуславливая образование золы, а также продукты коррозии резервуаров. Зольность топочных мазутов обычно не превышает 0,1 %.

Согласно стандартам, в мазуте, поставляемом потребителям, содержание воды не должно превышать 1,5 %. Однако при разогреве мазута паром перед сливом из цистерн происходит значительное повышение влагосодержания мазута — до 5 % и более. При сжигании обводнённого мазута возрастают аэродинамическое сопротивление и расход энергии на собственные нужды электростанции, при этом уменьшаются адиабатическая температура (теоретическая температура горения) и теплоотдача в топке, вследствие чего снижается КПД котла. Кроме того, влага усложняет эксплуатацию мазутного хозяйства и может привести к расстройству режима горения мазута из-за возможного образования водяных пробок, прерывающих равномерную подачу топлива к форсункам.

Основными характеристиками мазута, оказывающими существенное влияние на его использование, являются:

- вязкость;
- плотность;
- температура вспышки;
- температура воспламенения;
- температура самовоспламенения;
- температура застывания.

Одной из важнейших характеристик мазута является его вязкость, в связи с чем она положена в основу маркировки мазута.

Для сравнительной оценки высоковязких продуктов, каким является мазут, обычно пользуются условной вязкостью, которая представляет собой отношение времени истечения 200 мл мазута при заданной температуре ко времени истечения такого же объёма дистиллированной воды при 20 °С. Она выражается в градусах условной вязкости (°ВУ).

От вязкости мазута зависят затраты энергии на его транспортировку по трубопроводам, время слива из ёмкости, скорость и полнота отстаивания от воды и механических примесей, эффективность распыления.

Вязкость мазута зависит от температуры, давления и предварительной термообработки.

При увеличении температуры вязкость мазута уменьшается, поэтому для облегчения транспортировки и повышения качества распыления производят его подогрев (до температуры на 20 °С ниже температуры вспышки). При этом для обеспечения необходимой вязкости температуры подогрева высоковязких и маловязких сернистых мазутов различаются несущественно. Например, для мазутов М40 и М100 в случае, если необходимо получить одинаковую вязкость перед механической форсункой (3,5 °ВУ), разница в подогреве должна составлять всего 20 °С (104 и 124 °С).

С ростом давления вязкость мазута повышается, при этом, чем сложнее молекулярное строение компонентов мазута, тем большее влияние оказывает давление на вязкость.

Предварительная термообработка мазута меняет его вязкостные свойства. Связано это с присутствием в мазуте углеводородов, образующих при относительно низких температурах более или менее жесткие структуры.

В качестве жидкого котельного топлива чаще всего применяется мазут марок М40 и М100.

Марка топлива определяется предельной величиной вязкости при 80 °С, составляющей:

для мазута М 40 — 8,0 °ВУ;

для мазута М 100 — 16,0 °ВУ.

Для передвижных котельных установок применяется так называемый мазут флотский — марок Ф5 и Ф12.

Флотские мазуты относятся к категории легких топлив, топочный мазут марки М40 — к категории средних топлив, топочный мазут марки М100 — к категории тяжелых топлив.

Плотность отражает товарное качество нефтепродукта. Показателем плотности пользуются в расчётах для определения вместимости резервуаров мазута, расхода энергии на его перекачку и т.д. Для практических целей часто пользуются относительной плотностью, которая представляет собой безразмерную величину, численно равную отношению плотности мазута при заданной температуре к плотности дистиллированной воды при 4°С. Например, при температуре 20 °С относительная плотность мазута ρ_4^{20} находится в диапазоне от 0,95 до 1,06.

Плотность мазута в сочетании с вязкостью в значительной степени определяет скорость отстаивания его от воды и осаждения механических примесей. При плотности мазута, меньшей плотности воды, отстаивание происходит сравнительно быстро (от 100 до 200 ч). При приближении относительной плотности к единице скорость отстаивания падает, а для мазутов, плотность которых превышает единицу, отстаивание практически не происходит, так как мазут в резервуаре находится ниже воды.

Для перекачки мазута, заполнения и слива его из ёмкостей температура мазута должна быть не ниже 60-70 °С, что соответствует вязкости - 30°ВУ.

Температурой вспышки называют температуру, при которой пары топлива, нагреваемого в стандартных условиях, образуют с окружающим воздухом горючую смесь, вспыхивающую при поднесении к ней пламени. Горение при этом моментально прекращается, т.е. $\tau_{гор} \rightarrow 0$.

Если продолжать нагревание жидкости, то при достижении определённой температуры продукт, вспыхнувший от внешнего источника пламени, горит в

течение нескольких секунд (не менее 5 с). Эту температуру называют температурой воспламенения, или верхним пределом температуры вспышки жидкого топлива.

Температуры вспышки и воспламенения связаны с температурой кипения соответствующих фракций топлива. Чем легче фракция, тем ниже температура вспышки и воспламенения. Ниже приведены температуры вспышки некоторых жидких топлив, °С:

бензиновые фракции	до минус 40
сырая нефть	20-40
парафинистые мазуты	50-70
мазут М 40	90
мазут М 100	110
прямогонные мазуты, не содержащие парафинов	140-230

Температура воспламенения нефтепродуктов обычно на 50-70 °С выше температуры вспышки.

Температурой самовоспламенения называется температура, при которой жидкое топливо воспламеняется без внешнего источника пламени. Для мазутов она находится в пределах 500-600 °С.

Для транспортировки мазута по трубопроводу и слива его из железнодорожных цистерн большое значение имеет температура, при которой он теряет подвижность, т.е. застывает (температура застывания). При определении температуры застывания мазут предварительно подогревают, а затем охлаждают в пробирке до предполагаемой температуры застывания. Температура, при которой уровень мазута в пробирке, наклонённой к горизонту под углом 45°, остаётся неподвижным в течение 1 мин, принимается за температуру застывания.

Прямогонные мазуты, и особенно крекинг-мазуты, обладают высокой температурой застывания (до 42 °С), причём она уменьшается при понижении

плотности и вязкости. Температура застывания мазута М 40 равна 10 °С, а мазута М 100 - + 25 °С

По содержанию серы мазуты разделяются на четыре группы:

- низкосернистые (массовое содержание серы $S^r \leq 0,5 \%$);
- малосернистые ($0,5 \% < S^r \leq 1,0 \%$);
- сернистые ($1 \% < S^r \leq 2,0 \%$);
- высокосернистые ($2\% < S^r \leq 3,5 \%$).

Теплота сгорания мазута $Q_i^d = 39,8 - 41,3$ МДж/кг.

Технологический тракт подготовки мазута на электростанции (рис.5) включает приемно-сливное устройство, основные резервуары для хранения постоянного запаса мазута, мазутонасосную систему, систему трубопроводов для мазута и пара, группу подогревателей мазута и фильтров.

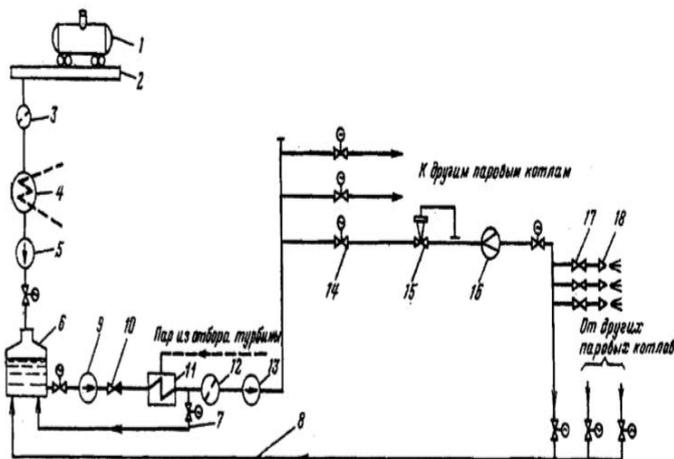


Рисунок 5 - Технологическая схема подготовки мазута на электростанции:

1 — цистерна с мазутом; 2 — сливное устройство; 3 — фильтр грубой очистки; 4 — сливной резервуар с Подогревом; 5 - перекачивающий насос; 6 — основной резервуар; 7, 8 — линии рециркуляции мазута; 9 — насос первого подъема; 10 - обратный клапан; 11 — подогреватель мазута; 12 — фильтр тонкой очистки; 13 — насос второго подъема; 14 — запорная задвижка; 15 - регулятор расхода; 16 — расходомер; 17 — задвижка; 18 — форсунка.

Мазут перед сжиганием необходимо подготовить: удалить механические примеси, повысить давление мазута и подогреть (для снижения потерь давления при транспортировке по трубопроводам и обеспечения тонкого распыливания). Температура в баках поддерживается на уровне 60-80 °С за счет циркуляционного подогрева.

Типовой является двухступенчатая схема подачи топлива, предусматривающая двухступенчатое повышение давления.

Очистка мазута от твердых фракций происходит вначале в фильтрах грубой очистки с размером ячеек 1,5x1,5 мм, а затем в фильтрах тонкой очистки с ячейками 0,3-0,5 мм, установленных перед насосами второй ступени.

1.7.3 Газообразное топливо

Основным видом газообразного топлива является природный газ газовых и газоконденсатных месторождений. В качестве местного топлива применяются также различные виды искусственных горючих газов — коксовый, доменный, пиролиза нефтепродуктов и др.

Газообразное топливо представляет собой смесь различных горючих и негорючих газов. Основными горючими составляющими большинства газообразных топлив являются предельные углеводороды: метан CH_4 , содержание которого в большинстве природных газов составляет 90-98 % по объёму, этан C_2H_6 , пропан C_3H_8 , бутан C_4H_{10} , пентан C_5H_{12} , а также водород H_2 , оксид углерода CO и сероводород H_2S (в редких случаях и в очень малых количествах). Преобладающее содержание метана в природных газах обуславливает близость их физических свойств и теплотехнических характеристик.

Теплота сгорания большинства природных газов находится в сравнительно узком диапазоне $Q_i^d = 35,5 - 37,7$ МДж/м³. Негорючий балласт природного газа, как правило, состоит из двуоксида углерода CO_2 и азота, а в некоторых случаях — незначительного количества гелия и других газов.

Плотность природных газов близка к плотности основного компонента - метана и изменяется обычно в узких пределах $\rho_z = 0,7-0,8$ кг/м³. Перед подачей потребителям природный газ подвергают осушке от паров воды до влагосодержания 0,05-0,5 г/м³. Если газ содержит сернистые соединения, то их удаляют в процессе его очистки.

Эксплуатационные свойства газообразного топлива определяются его токсичностью, взрывоопасностью и плотностью.

Большинство горючих газов и пары жидких топлив содержат токсичные компоненты, среди которых наиболее опасны оксид углерода CO и сероводород H₂S. В искусственных газах, кроме этого, могут содержаться в небольших количествах аммиак NH₃, сульфид углерода CS и чрезвычайно токсичный цианистый водород HCN.

Природные и искусственные горючие газы невидимы и почти не имеют запаха (при отсутствии сероводорода), поэтому они очень опасны в случае проникновения их в помещение через неплотности в газопроводах и арматуре. Чтобы своевременно обнаружить присутствие газа в помещениях, к нему добавляют сильно пахучее вещество - одорант. В качестве одоранта обычно применяют сернистые соединения - меркаптаны, чаще всего метилмеркаптан CH₃SH или этилмеркаптан C₂H₅SH, которым присущ характерный резкий неприятный запах.

Горючие газы в смеси с воздухом взрывоопасны. Нижним и верхним пределом воспламенения (взрываемости) газа называют, соответственно, наименьшее (от 3 до 6 %) и наибольшее (от 12 до 16%) содержание его в смеси с воздухом, при котором возможен взрыв. Если концентрация горючего вещества находится в диапазоне между нижним и верхним концентрационными пределами, то смесь газа с воздухом способна взрываться от внешнего источника зажигания. Обогащение воздуха кислородом расширяет концентрационные пределы воспламенения.

1.8 Биотопливо

Рост тарифов на традиционные виды топлива мотивирует активное внедрение альтернативных видов топлива, одним из которых стали пеллеты или топливные гранулы, завоевавшие прочное место на мировом рынке биотоплива.

Топливные, или древесные, гранулы (пеллеты) представляют собой спрессованные цилиндры диаметром 4-10 мм, длиной 2-5 см (рис.6), переработанные из высушенных отходов лесоперерабатывающего производства: древесные опилки, стружка, кора, сучки, ветки и т.д. Содержание энергии в 1 кг древесных гранул примерно соответствует 0,5 л жидкого топлива.



Рисунок 6 – Древесные гранулы (пеллеты)

Топливные гранулы — экологически чистое топливо с содержанием золы не более 3%. Кроме экономического эффекта, использование пеллет способствует снижению выбросов парниковых газов в атмосферу, поскольку при сжигании гранул в атмосферу выбрасывается ровно столько CO_2 сколько было поглощено растениями во время их роста.

Гранулы менее подвержены самовоспламенению, так как не содержат пыли и спор, которые также могут вызывать аллергическую реакцию у человека.

Гранулы отличаются от обычной древесины высокой сухостью (8-12 % влаги против 30-50 % в дровах) и большей - примерно в полтора раза - плотностью.

Эти качества обеспечивают высокую теплотворную способность по сравнению со щепой или дровами - при сгорании 1 т гранул выделяется приблизительно 5 тыс. кВт/ч тепла (при теплоте сгорания около 18 МДж/кг), что в полтора раза больше , чем у обычных дров.

Низкая влажность- это не только преимущество гранул как топлива, но и проблема их производства. Сушка может оказаться одной из основных статей расходов при производстве топливных материалов из отходов деревообработки. Кроме того, в зависимости от производства, сбор, сортировка и очистка сырья также могут повлечь дополнительные затраты. Процесс сушки важно тщательно спланировать, что позволит уменьшить риски, связанные с качеством продукции, её себестоимостью и пожароопасностью производства. Лучшим вариантом является производство биотоплива из сухой стружки.

Одно из важнейших преимуществ гранул- высокая и постоянная насыпная плотность, позволяющая относительно легко транспортировать этот сыпучий продукт на большие расстояния. Благодаря правильной форме, небольшому размеру и однородной консистенции продукта гранулы можно пересыпать через специальные рукава, что позволяет автоматизировать процессы погрузки-разгрузки, а также сжигания этого вида топлива.

Различают два вида пеллет. К первому относятся гранулы для отопления жилых домов, которые из-за особой белизны называют “белыми”. Этот высококачественный вид гранул продается значительно дороже, чем гранулы для больших котельных (промышленные пеллеты), которые, как правило, большего диаметра, чем “белые”. Промышленные гранулы из-за наличия в них высокой доли коры не имеют такого белого цвета, как гранулы для жилых помещений. Соотношение потребления гранул для частного отопления и для промышленных систем составляет примерно 1:10.

Цена на пеллеты для отопления жилых помещений составляет от 140 до 160 евро за тонну. Они реализуются либо в мешках, либо в специальных контейнерах. Подача древесных гранул (пеллет) в котельные крупных производственных объектов и отопительных систем осуществляется автоматически. Цена на промышленные пеллеты составляет в среднем 85 евро за тонну.

Гранулы больших размеров называются брикетами. Топливные брикеты выпускаются на специальном оборудовании. Также серийно выпускаются прессы, которые могут выпускать одновременно и гранулы, и брикеты, и они уже используются в России. Древесностружечные брикеты, как правило, используются для бытовых систем отопления и имеют различные размеры и форму.

Стоимость древесных брикетов на европейском рынке может быть иногда выше стоимости гранул, но они занимают и значительно меньший сегмент рынка сжатых топлив. Соотношение выпуска топливных брикетов и гранул в мире составляет примерно 1:20.

Энергетический лес - деревья и кустарники, выращиваемые для энергетических нужд, в частности, для производства топливных гранул. Виды используемых для этого растений: быстрорастущие культуры - эвкалипт, тополь, ива, акация и др. Испытано около 20 различных видов растений - древесных, кустарниковых и травянистых, в том числе кукуруза и сахарный тростник. Раз в несколько лет деревья срубают, и урожай может составлять около 7 т/га в год. Собранная биомасса используется для производства тепловой и электрической энергии, а также может служить в качестве сырья для производства различных видов жидкого биотоплива (например, биоэтанола).

Биогаз - газ, получаемый в результате разложения биомассы под воздействием трех видов бактерий (гидролизные, кислотообразующие, метанообразующие).

Состав биогаза: метан - 50-87%, CO₂ - 13-50%, незначительные примеси H₂ и H₂S. После очистки биогаза от CO₂ получается биометан. Биометан - полный аналог природного газа, отличие только в происхождении.

Перечень органических отходов, пригодных для производства биогаза: навоз, птичий помёт, зерновая барда, отходы рыбных и забойных цехов (кровь, жир, кишки), трава, бытовые отходы, отходы молокозаводов, отходы от производства соков - жом фруктовый, ягодный, овощной, виноградная выжимка, водоросли, отходы производства крахмала и патоки, отходы переработки картофеля, производства чипсов - очистки, шкурки, гнилые клубни, кофейная пульпа и т.д.

2 Теория горения

2.1 Историческое развитие общих представлений о горении

До середины XVII в. В науке господствовало метафизическое представление о горении как о выделении особого "вещества огня" с отрицательным весом, названного "флогистоном".

Великий русский ученый М.В. Ломоносов в 1756г. Положил начало современному научному представлению о горении как о процессе соединения горючего вещества с "тяжелыми частицами воздуха".

В 1773 г. французский ученый А. Лавуазье установил роль кислорода в горении и тем самым окончательно подтвердил представление о горении как о химическом окислительном процессе.

В конце XIX в. французский ученый Ле Шателье, а также русский В.А. Михельсон впервые выявили роль физических и тепловых параметров в процессе горения.

Основы теории горения газообразных топлив разработаны советскими и зарубежными учеными, такими как: Н.Н. Семенов, Н.А. Шилов, Я.Б. Зельдович, Д.А. Франк-Каменецкий, Л.Н. Хитрин, С. Хиншелвуд, Г. Эльбе, Г. Хоттель и др.

За выдающиеся работы по установлению и исследованию механизма цепного горения газов Н.Н. Семенову и С. Хиншелвуду в 1956 г. была присуждена Нобелевская премия.

Фундаментальное исследование процесса горения углерода были выполнены коллективами ученых МГУ, МЭИ и ВТИ (чл.-корр. АН СССР А.С. Предводителей).

Всестороннее и комплексное исследование сложного процесса горения твердого топлива проведено коллективами ученых ЦКТИ, ЛПИ, МВТУ, (проф. Г.Ф. Кнорре).

Эти работы, а также более поздние исследования ряда советских, российских и зарубежных ученых и коллективов составляют основу современной теории горения.

Развитие науки о горении неразрывно связано с практикой топливоснабжения. Большие заслуги в создании наиболее эффективных методов сжигания различных топлив принадлежит советским ученым-энергетикам, таким как К.В. Кирш, В.Н. Шретер, Т.В. Макарьев, Г.Ф. Кнорре, В.В. Померанцев и др.

2.2 Общие сведения о горении

Основу горения составляют самоускоряющиеся реакции окисления горючих веществ топлива, в результате которых исходные вещества (горючие и окислитель) преобразуются в продукты сгорания, т.е. в новые вещества с иными физическими и химическими свойствами.

Характерным признаком горения является быстропротекающий процесс, сопровождающийся интенсивным выделением теплоты и резким повышением температуры. Для протекания химической реакции между горючими веществами топлива и окислителем, прежде всего, необходимо создать физический контакт между молекулами взаимодействующих веществ и довести

молекулы до такого состояния, при котором становятся возможными химические реакции между ними.

Первое (т.е. физический контакт) осуществляется в процессе образования горючей смеси, второе – при её воспламенении.

Таким образом, горение – это сложный физико-химический процесс, включающий в себя ряд последовательно и параллельно протекающих физических и химических стадий.

Различают полное горение, т.е. без потерь теплоты, и неполное, т.е. с потерями теплоты. При полном горении все горючие вещества топлива принимают участие в окислительных процессах, при этом образуются только оксиды- CO_2 , SO_2 , H_2O .

Реальное горение, как правило, является неполным. Различают механическую и химическую неполноту сгорания.

В первом случае (механический недожог) некоторое количество топлива в процессе горения топлива не участвует. Например, газовым потоком из топки выносятся наиболее мелкие фракции угля, а наиболее крупные, наоборот, могут оседать в нижней части топки (на поду) и удаляться вместе с золой и шлаком. В слоевой топке возможен также провал мелких фракций топлива через отверстия колосниковой решетки.

Потери с химическим недожогом возникают в случае химически неполного окисления углеродосодержащих соединений с образованием окиси углерода CO , а также в случае, когда часть горючих газообразных веществ, образовавшихся при испарении и термическом разложении жидкого и твердого топлива (CO , H_2 , и др.), покидает топку до завершения окислительных процессов.

В качестве окислителя при горении преимущественно используется не чистый кислород, а атмосферный воздух, что объясняется его доступностью и простотой использования.

В технологических установках, например, мартеновских или доменных печах применяется также воздух, обогащенный кислородом, или чистый кислород.

Расход кислорода $V^{\circ}_{O_2}$ или воздуха V° , теоретически необходимый для полного сгорания единицы количества топлива (килограмм или кубометр), определяется из стехиометрических уравнений горения.

При реальном горении, в зависимости от назначения огнетехнического устройства, действительное количество окислителя (кислорода или воздуха) может быть больше или меньше теоретически необходимого. Отношение действительного количества воздуха к теоретическому необходимому называется коэффициентом избытка воздуха: $\alpha = V/V^{\circ}$.

2.3 Материальный баланс горения топлива.

Несмотря на то, что далеко не каждый получает удовольствие от приготовления пищи, наверное, общие представления о том, как это делается, доступны всем. Например, для того чтобы сварить кастрюлю солянки, требуется следующие продукты: томатная паста, мясо, сосиски, картофель, морковь, оливки, сахар, соль. (возможно, что-то, – мы же изучаем на кулинарию.). а еще надо бы добавить несколько ломтиков лимона, а в тарелку положить сметану (по вкусу). Причем, в зависимости от соотношения этих ингредиентов, итоговый продукт может получиться очень вкусным или вообще несъедобным. Так вот, соотношения исходных компонентов и конечных продуктов, отнесенное к единице объема воды, можно назвать материальным балансом процесса приготовления солянки.

Поскольку в основе процесса горения лежит реакция окисления горючих компонентов топлива, то материальный баланс процесса горения выражает количественное соотношение между исходными компонентами (топливо и окислитель), и конечными продуктами (дымовые газы, т.е. продукты сгорания), отнесенное к единице объема (или массы) топлива.

Несмотря на то, что непосредственным окислителем в реакциях горения является кислород, на практике чистый кислород используется очень редко (лишь в специфических технологических процессах). В теплоэнергетике в качестве окислителя используется воздух как наиболее доступный и дешёвый газ, в котором содержится примерно 21% кислорода (по объему). Оставшиеся примерно 79% составляет азот (концентрация других компонентов, как правило, ничтожно мала), который при нормальных условиях не принимает участия в процессе горения, поскольку является инертным газом. При высоких температурах, к сожалению (или даже – к несчастью), протекают реакции образования высокотоксичных оксидов азота (их принято называть NOx). Но это уже другие реакции, которые к материальному балансу процесса горения отношения не имеют.

Материальный баланс процесса горения твёрдого и жидкого топлива составляет на 1кг топлива. Первоочередной целью материального баланса является определение теоретического объема воздуха, необходимого для полного сгорания топлива, а также теоретического объема продуктов сгорания. Переходя на язык “чайников”, необходимо определить, сколько кубометров воздуха надо подать в топку в пересчете на каждый килограмм топлива и сколько кубометров продуктов сгорания при этом образуется (опять-таки при сгорании 1кг топлива).

Определение объемов воздуха и продуктов сгорания – это не самоцель. Впоследствии, когда по результатам теплового баланса будет найден секундный расход топлива, необходимые для выбора (по результатам аэродинамического расчета котла) соответствующего тягодутьевого оборудования: вентилятора и дымососа.

Поскольку речь зашла о тепловом балансе, сделаем небольшое отступление и начнем с определения расхода топлива, ведь именно в топливе скрыта потенциальная энергия, выделяющаяся в процессе горения в виду горячих дымовых газов, теплота которых, в свою очередь, передается в котле воде, превращая ее в пар (если речь идет о паровом котле).

Любая теплотехническая установка, в которой осуществляется сжигание топлива и передача тепла дымовых газов “рабочему телу” (под “рабочим телом” понимается вода, или любой другой теплоноситель, в зависимости от назначения установки), характеризуется такими параметрами, как производительность и тепловая мощность. В связи с тем, что в теплоэнергетике и теплотехнике мы имеем дело с установками непрерывного действия, выражать теплоту, выделившуюся при сжигании топлива, в Джоулях (Дж) бессмысленно. Целесообразно характеризовать тепловую нагрузку количеством теплоты, выделившийся в единицу времени, т.е Джоуль в секунду, а в системе СИ $1\text{Дж}/\text{с}=1\text{Вт}$. В ваттах измеряется мощность, поэтому мы и используем термин – тепловая мощность. Производительность котельного агрегата, как правило, указана в самой маркировке. Например, ДКВР-20/13 или БКЗ-75/40. Здесь первое число представляет собой количество генерируемого пара (20 т/ч насыщенного пара в ДКВР и, соответственно, 75 т/ч перегретого пара в БКЗ), а второе число- давление пара (атм).

Для покрытия проектной номинальной нагрузки необходимо сжечь определенное количество топлива. Спектр используемых топлив довольно широк: природный газ, мазут, бурый или каменный уголь, очень “модные” на сегодняшний день древесные пеллеты, кора и многие другие. При этом каждое топливо характеризуется таким важнейшим параметром, как теплотворная способность или теплота сгорания. Естественно, что требуемый расход высококалорийного мазута будет значительно меньше расхода низкокалорийного бурого угля.

Для определения расхода топлива составляется так называемый тепловой баланс котельного агрегата, т.е. опять баланс, только не материальный, а тепловой. Вообще, в основе большинства теплотехнических расчетов как лежат как раз лежат уравнения теплового и материального баланса. Эти уравнения (их суть) необходимо понять и осознать, а не заучивать и запоминать.

Левая часть уравнения теплового баланса (например, котла) представляет собой количество тепла, выделившегося (в единицу времени) при сгорании

определенного количества заданного топлива, т.е. это произведение расчетного расхода топлива V_p (кг/с) на его удельную теплоту сгорания Q_i^r (МДж/кг). В результате получаются МДж/с, т.е. МВт – тепловая мощность котла.

В правой части уравнения теплового баланса – полезное тепло, которое затрачивается на образование заданного по проекту количества пара определенных параметров (давление и температура). Это полезное тепло при выработке насыщенного пара, соответственно, получится (в упрощенном виде, без некоторых нюансов) умножение расхода пара $D_{\text{нп}}$ (кг/с) на разность энтальпии насыщенного пара $i_{\text{нп}}$ и питательной воды $i_{\text{пв}}$.

Под полезным теплом мы понимаем лишь ту его часть, которая действительно пошла на парообразование. Ведь в реальных условиях при сжигании топлива существуют потери тепла с уходящими газами q_2 , химическими q_3 и механическим недожогом q_4 , потери тепла в окружающую среду через обмуровку котла q_5 , а также потери с физическим теплом шлака q_6 (при сжигании твердых топлив). Сумма этих потерь определяет величину КПД котла $\eta_{\text{ка}}$. Поэтому при составлении теплового баланса левую его часть необходимо умножить на КПД:

$$V_p Q_i^r \eta_{\text{ка}} = D_{\text{нп}} (i_{\text{нп}} - i_{\text{пв}}) \quad (30)$$

Из уравнения теплового баланса определяют расход топлива, и, как уже отмечалось, с помощью материального баланса и аэродинамического расчета выбирают тягодутьевое оборудование.

Однако мы отвлеклись от основной темы, т.е. материального баланса процесса горения топлива.

Материальный баланс процесса горения выражает количественные соотношения между исходными веществами (топливо, воздух) и конечными продуктами (дымовые газы).

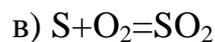
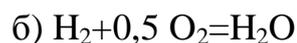
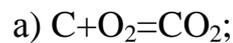
Составление материального баланса можно *уголовно* разделить на две стадии:

- Определение объема воздуха, теоретически необходимого для полного сгорания топлива, и теоретического объема продуктов сгорания;
- Определение действительных объемов воздуха и продуктов сгорания (с учетом коэффициента избытка воздуха).

Для твердого и жидкого топлива материальный баланс составляет на 1 кг топлива, для газообразного- на 1 м³ сухого газа при нормальных условиях (P=0,1013 МПа, t=0°C).

2.3.1 Материальный баланс процесса горения твердого и жидкого топлива

Согласно закону Дальтона, горючие составляющие топлива вступают в химическое реагирование с кислородом в определенном количественном соотношении, определяемом из стехиометрических уравнений полного горения углерода, водорода и серы, записанных для одного 1 кг моля каждого горючего элемента:



При расчете объемов воздуха и продуктов сгорания условно принимают, что все горючие составляющие окисляются полностью, т.е. в соответствии с реакциями (2а, б, в).

Из уравнения (2а) следует, что для полного окисления одного моля углерода (молекулярная масса углерода $\mu_{\text{C}}=12\text{кг}$) расходуется 1 моль кислорода, и образуется 1 моль двуокиси углерода CO_2 . Выразив газообразные составляющие (O_2 и CO_2) в объемных единицах (объем 1 моля любого газа при нормальных условиях составляет 22,4 м³), получим, что для полного сгорания 1 кг углерода потребуется 22,4/12=1,866 м³ кислорода, при этом образуется

1,866м³CO₂. При известном составе рабочей массы в 1кг топлива содержится (C^r/100) кг углерода, а для его полного сгорания необходимо 1,866(C^r/100) м³ кислорода, и при этом образуется 1,866(C^r/100) м³ CO₂.

Аналогично, из уравнения (2б) на окисление водорода (μ_{H2}=2,02кг), содержащегося в 1 кг топлива, потребуется 0,5(22,4/2.02)(H^r/100) м³ кислорода, при этом образуется 0,5(22,4/2,02)(H^r/100) м³ водяного пара, а, как следует из уравнения (2в), на окисление горючей серы (μ_S=32кг), и и образуется такой же объем SO₂. (здесь и далее под S^r будет подразумеваться содержание горючей, или летучей, серы).

Суммируя полученные выражения и учитывая кислород, который содержится в топливе (μ_{O2}=32кг), после несложных преобразований получим формулу для определения количества кислорода, теоретически необходимого для полного сжигания 1кг твердого или жидкого топлива:

$$V^o_{O_2}=0,01(1,C^r+5,55H^r+0,7S^r-0,7O^r), \text{ м}^3/\text{кг} \quad (31)$$

Объемная доля кислорода получается умножением массовой доли O^r/100 на удельный объем кислорода, равный 22,4/32=0,7 м³/кг.

Как уже отмечалось, в воздухе содержится примерно 21% кислорода (по объему), поэтому количество воздуха, теоретически необходимого для полного сгорания 1кг топлива:

$$V^o=(100/21) V^o_{O_2}=0,0889 C^r+0,265 H^r+0,33 S^r-0,033 O^r, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (32)$$

В результате полного сгорания топлива образуются газообразные продукты, которые состоят из CO₂, SO₂, H₂O и N₂. Оксиды углерода и серы являются сухими трехатомными газами, которые принято объединить и обозначить



При горении твердых и жидких топлив теоретические объемы продуктов сгорания вычисляются в соответствии со стехиометрическими уравнениями (2а, б, в) с учетом содержания соответствующих компонентов в топливе и воздухе.

Теоретический объем трехатомных газов в соответствии с уравнениями (2а, в):

$$V_{\text{RO}_2}^0 = 0,01(1,866C^r + 0,7S^r), \text{ м}^3/\text{кг} \quad (33)$$

Теоретический объем азота равен объему азота, поступившего с воздухом $V_{\text{N}_2}^{\text{возд}}$, и объему азота, выделяемого из топлива $V_{\text{N}_2}^T$:

$$V_{\text{N}_2}^0 = V_{\text{N}_2}^{\text{возд}} + V_{\text{N}_2}^T = 0,79V^0 + (N^r/100)(22,4/28) = 0,79V^0 + 0,8N^0/100, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (34)$$

Здесь первое слагаемое получается в результате того, что 21% воздуха (т.е. кислород) расходуется на окисление горючих компонентов, а 79% представляет собой инертный азот. Таким образом, зная теоретический объем воздуха, легко определить теоретический объем азота, внесенного воздухом $0,79V^0$. Второе слагаемое, т.е. объем азота, внесенного с топливом, получается умножением массового содержания азота в топливе $N^r/100$ на удельный объем азота, равный $22,4/28=0,8 \text{ м}^3/\text{кг}$ (молекулярная масса азота $\mu_{\text{N}_2}=28\text{кг}$)

Теоретический объем водяного пара $V_{\text{H}_2\text{O}}^0$ складывается из следующих составляющих:

- Водяные пары, образующиеся при сгорании водорода, входящего в состав топлива $V_{\text{H}_2\text{O}}^H$ (реакция 2б);
- Водяные пары, образующиеся при испарении влаги топлива $V_{\text{H}_2\text{O}}^W$;
- Водяные пары, вносимые в топку с окислителем (воздухом) $V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{возд}}$.

Объем водяных паров, образующихся при сгорании водорода $V_{\text{H}_2\text{O}}^H$, определяется в соответствии со стехиометрическим уравнением (2б), т.е. при сгорании 1 моля водорода ($\mu_{\text{H}_2}=2,02\text{кг}$) образуется 1 моль водяного пара ($22,4 \text{ м}^3$):

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^H = (H^r/100)(22,4/2,02) = 0,111H^r, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (35)$$

Объем водяных паров, образующихся при испарении влаги, входящей в состав топлива:

$$V_{H_2O}^H = (W^r/100)v_{H_2O} = 0,0124W^r, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (36)$$

где $v_{H_2O} = 22,4/18 = 1,24$ - удельный объем водяного пара, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Объем водяных паров, вносимых с воздухом, зависит от теоретического объема воздуха V^O и его влагосодержания d_v .

Влагосодержание воздуха выражается в кг влаги на кг воздуха. Для перевода в м^3 необходимо умножить выражение на плотность воздуха ρ_v , а умножение на удельный объем водяного пара v_{H_2O} мы добиваемся перевода массовых долей пара в объемные.

$$V_{H_2O}^{\text{возд}} = V^O d_v \rho_v v_{H_2O} = V^O \cdot 0,01 \cdot 1,293 \cdot 1,24 = 0,0161V^O, \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (37)$$

где d_v – влагосодержание воздуха (принимается $d_v = 0,01$ кг влаги/кг воздуха),

$\rho_v = 1,293$ $\text{кг}/\text{м}^3$ – плотность воздуха при $t = 0^\circ\text{C}$.

В итоге теоретический объем водяных паров :

$$V_{H_2O}^H = 0,111H^r + 0,0124W^r + 0,0161V^O, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (38)$$

Примечание. При паровом распылении мазута теоретический объем водяного пара увеличивается на объем водяного пара, подаваемого в форсунку:

$$V_{H_2O}^\Phi = G_\Phi(22,4/18) = 1,24G_\Phi, \quad (39)$$

где G_Φ – удельный расход пара на распыление мазута, кг пара/кг мазута.

Суммарный теоретический объем продуктов сгорания:

$$V_r^O = V_{RO_2}^O + V_{N_2}^O + V_{H_2O}^O, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (40)$$

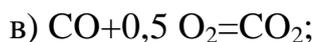
2.3.2 Материальный баланс процесса горения газа.

Газообразное топливо представляет собой смесь различных горючих и негорючих газов. Основными горючими составляющими большинства

газообразных топлив являются предельные углеводороды метанового ряда, а также водород, оксид углерода и иногда сероводород. Негорючий балласт газообразного топлива, как правило, состоит из двуокиси углерода, азота и кислорода.

Для газообразного топлива материальный баланс составляет на 1 м^3 сухого газа при нормальных условиях.

Согласно закону Дальтона горючие составляющие газа вступают в химическое реагирование с кислородом в определенном количественном соотношении, определяемые из стехиометрических уравнений горения углеводородов (общая формула C_mH_n), водорода H_2 , оксида углерода CO и сероводорода H_2S , записанных для 1 кмоль каждого горючего элемента:



При расчете объемов воздуха и продуктов сгорания условно принимают, что все горючие составляющие окисляются полностью, т.е. в соответствии с реакциями (3а, б, в, г).

Из уравнения 3б, например, следует, что для полного окисления 1 моля водорода потребуется 0,5 моля кислорода, и образуется 1 моль водяного пара H_2O . Объем 1 моля любого газа при нормальных условиях величина постоянная ($22,4 \text{ м}^3$), следовательно, для полного сгорания 1 м^3 водорода потребуется $0,5 \text{ м}^3$ кислорода, при этом образуется $1 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$.

Тогда теоретический объем кислорода, необходимого для полного окисления водорода, входящего в состав газа (при известном объемном содержании водорода в газе $\text{H}_2^T, \%$), определяется как :

$$0,5(\text{H}_2^T/100), \text{ м}^3 \text{O}_2/\text{ м}^3 \text{ газа}, \quad (41)$$

при этом объем образовавшихся водяных паров:

$$(\text{H}_2^T/100), \text{ м}^3 \text{H}_2\text{O}/\text{ м}^3 \text{ газа}. \quad (42)$$

Аналогично определяется объем кислорода, необходимого для полного окисления углеводородов, из уравнения (3а) $\sum(m+0,25n)C_mH_n^T$, оксида углерода из уравнения (3в) $0,5CO^T$, сероводорода из уравнения (3г) $1,5H_2S^T$

Суммируя полученные выражения и учитывая кислород, который содержится в топливе O_2^T , получим выражения для определения объема кислорода, теоретически необходимого для полного сгорания $1m^3$ газа:

$$V_{O_2}^O = 0,01(\sum(m+0,25n)C_mH_n^T + 0,5H_2^T + 0,5CO^T + 1,5H_2S^T - O_2^T), m^3 O_2 / m^3 \text{ газа.}$$

Объем воздуха, теоретический необходимый для полного сгорания $1m^3$ газообразного топлива (с учетом концентрации кислорода в воздухе):

$$V^O = (100/21)V_{O_2}^O = 0,0476(\sum(m+0,25n)C_mH_n^T + 0,5H_2^T + 0,5CO^T + 1,5H_2S^T - O_2^T), m^3 / m^3. \quad (43)$$

В результате полного сгорания топлива образуются газообразные продукты, состоящие из трехатомных газов, водяных паров и азота.

Теоретические объемы продуктов сгорания вычисляются в соответствии со стехиометрическими уравнениями (3а, б, в, г) с учетом содержания соответствующих компонентов в топливе и воздухе.

Теоретический объем трехатомных газов складывается из следующих составляющих:

$V_{CO_2}^{CmHn}$ – объем CO_2 , образовавшегося в результате сгорания углеводородов по реакции (3а);

$V_{CO_2}^{CO}$ – объем CO_2 , образовавшегося в результате сгорания оксида углерода по реакции (3в);

$V_{SO_2}^{H_2S}$ – объем SO_2 , образовавшегося в результате сгорания сероводорода по реакции (3г);

$V_{CO_2}^T$ – объем CO_2 , входящего в состав топлива.

Таким образом, с учетом стехиометрических коэффициентов, теоретический объем трехатомных газов:

$$\begin{aligned} V_{RO_2}^O &= V_{CO_2}^{CmHn} + V_{CO_2}^{CO} + V_{SO_2}^{H_2S} + V_{CO_2}^T = \\ &= 0,01(\sum M C_m H_n^T + CO^T H_2 S^T + CO_2^T), m^3 RO_2 / m^3 \text{ газа} \end{aligned} \quad (44)$$

Теоретический объем азота равен сумме объема азота, поступившего с воздухом $V_{N_2}^{B03д}$, и объема азота, входящего в состав газообразного топлива $V_{N_2}^T$:

$$V_{N_2}^O = V_{N_2}^{B03д} + V_{N_2}^T = 0,79V^O + 0,01N_2^T, \text{ м}^3 \text{ N}_2/\text{м}^3 \text{ газа.} \quad (45)$$

Теоретический объем водяных паров $V_{H_2O}^O$ складывается из следующих составляющих:

$V_{H_2O}^{CmHn}$ – водяные пары, образующиеся при сгорании углеводородов по реакции (3а);

$V_{H_2O}^{H_2}$ – водяные пары, образующиеся при сгорании водорода по реакции (3б);

$V_{H_2O}^{H_2S}$ – водяные пары, образующиеся при сгорании сероводорода по реакции (3г);

$V_{H_2O}^T$ – $v_{H_2O} \cdot d_r = 1,24d_r$ – водяные пары, внесённые в зону горения с топливом (газом) – здесь $d_r = 0,01$ кг/м³ – влагосодержание газа;

$V_{H_2O}^B$ – водяные пары, внесенные в зону горения с воздухом.

Объем водяных паров, вносимых с воздухом, зависит от теоретического объема воздуха V^O и его влагосодержания d_b :

$$V_{H_2O}^B = V^O d_b \rho_b v_{H_2O} = 0,0161V^O \text{ м}^3 \text{ H}_2\text{O}/\text{м}^3 \text{ газа,} \quad (46)$$

где $d_b = 0,01$ кг влаги/кг воздуха – влагосодержание воздуха;

$\rho_b = 1,293$ кг/м³ – плотность воздуха;

$v_{H_2O} = 22,4/18 = 1,24$ м³/кг – удельный объем водяного пара.

Таким образом, теоретический объем водяных паров:

$$\begin{aligned} V_{H_2O}^O &= V_{H_2O}^{CmHn} + V_{H_2O}^{H_2} + V_{H_2O}^{H_2S} + V_{H_2O}^T + V_{H_2O}^B = \\ &= 0,01(\sum 0,5n C_m H_n^T + H_2^T + H_2S^T) + 1,24d_r + 0,0161V^O, \text{ м}^3 \text{ H}_2\text{O}/\text{м}^3 \text{ газа.} \end{aligned} \quad (47)$$

Суммарный теоретический объем продуктов сгорания:

$$V_r^O = V_{RO_2}^O + V_{N_2}^O + V_{H_2O}^O, \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (48)$$

2.3.3 Действительный объем воздуха и продуктов сгорания

В процессе горения, по мере расходования топлива и кислорода и уменьшения их действующих концентраций, выгорания замедляется. Условия реагирования ухудшаются также в связи со сложностью перемешивания больших количеств топлива и окислителя.

Таким образом, в связи с несовершенством аэродинамики топочных устройств и невозможностью идеального (т.е. на молекулярном уровне) смешения топлива окислителя в реальных условиях, для полного сгорания топлива необходимо несколько большее количество воздуха, чем теоретический объем воздуха, полученный из стехиометрических уравнений горения.

Как уже отмечалось, отношение действительного объема V к теоретически необходимому V^0 называется коэффициентом избытка воздуха $\alpha = V/V^0$.

Таким образом, действительный объем воздуха, поступающего в зону горения:

$$V = \alpha V^0 \text{ или } V = V^0 + (\alpha - 1) V^0, \quad (49)$$

где $(\alpha - 1) V^0$ – избыточный воздух.

Действительный объем продуктов сгорания будет больше теоретического за счет азота, кислорода и водяного пара, содержащихся в избыточном воздухе.

Так как воздух практически не содержит трёхтомных газов, то их объем не зависит от коэффициента избытка воздуха и остается постоянным, равным теоретическому:

$$V_{RO_2} = V^0_{RO_2}. \quad (50)$$

В реальных условиях при любом (сколь угодно большом) значении коэффициент избытка на окислении горючих компонентов пойдет лишь тот объем, который теоретически необходим, согласно стехиометрическим

соотношениям, а весь избыточный воздух добавится к продуктам сгорания. Поэтому речь уже пойдет не об объеме азота, а об объеме двухатомных газов, ведь, кроме азота, избыточный воздух содержит и кислород.

Объем двухатомных газов включает в себя теоретический объем азота и избыточный воздух:

$$V_{R2} = V_{N2}^0 + (\alpha - 1)V^0. \quad (51)$$

Действительный объем водяных паров увеличивается (по сравнению с теоретическим) на количество водяных паров, внесенных с избыточным воздухом:

$$V_{H2O} = V_{H2O}^0 + 0,0161(\alpha - 1)V^0 \quad (52)$$

Суммарный объем продуктов сгорания:

$$V_r = V_{RO2} + V_{R2} + V_{H2O} = V_r^0 + 1,0161(\alpha - 1)V^0 \quad (53)$$

2.4 Тепловой баланс процесса горения

Эффективность использования топлива в топочном устройстве определяется двумя основными факторами: полнотой сгорания топлива в топочной камере и глубиной охлаждения продуктов сгорания.

Распределение вносимой в топку теплоты на полезно используемую и тепловые потери производится путем составления теплового баланса. Тепловой баланс составляется на 1 кг твердого или жидкого топлива либо на 1 м³ газообразного топлива.

Располагаемая теплота:

$$Q_p = Q_i^r + i_{тл} + Q_{\phi} + Q_{в.вн}, \text{ кДж/кг (кДж/м}^3\text{)} \quad (54)$$

где Q_i^r – низшая теплота сгорания рабочей массы топлива; $i_{тл}$ – физическая теплота топлива; Q_{ϕ} – теплота, вносимая в топку с паровым дутьем или при

паровом распылении мазута; $Q_{в.вн}$ – теплота, внесенная в топку воздухом при его подогреве вне котла.

Для большей части достаточно сухих и малосернистых твёрдых топлив принимается $Q_p = Q_i^r$, а для газового топлива – $Q_p = Q_i^d$.

Для твёрдых топлив с высоким содержанием влаги и жидких топлив учитывается физическая теплота топлива $i_{тл}$, которая зависит от температуры и теплоёмкости поступающего на горение топлива:

$$i_{тл} = c_{тл} t_{тл}, \quad (55)$$

где $c_{тл}$ – удельная теплоёмкость топлива, кДж/(кг·°С); $t_{тл}$ – температура топлива, °С.

В летний период времени температура топлива принимается равной $t_{тл} = 20$ °С, а теплоёмкость топлива определяется по формуле:

$$c_{тл} = 0,042 W_t^r + c_{тл}^d (1 - 0,01 W_t^r), \text{ кДж/(кг·°С)} \quad (56)$$

Теплоёмкость сухой массы топлива $c_{тл}^d$ составляет:

- для бурых углей – 1,13 кДж/(кг·°С);
- для каменных углей – 1,09 кДж/(кг·°С);
- для углей А, ПА, Т – 0,92 кДж/(кг·°С).

В зимний период принимается $t_{тл} = 0$ °С, и физическая теплота топлива не учитывается.

Температура мазута для обеспечения тонкого распыла в форсунках котельного агрегата должна быть достаточно высокой. Обычно она составляет:

$$t_{тл} = 90 \div 140 \text{ °С.}$$

Теплоёмкость мазута $c_{тл} = 1,74 + 0,0025 t_{тл}$, кДж/(кг·°С).

При распылении мазута с помощью паромеханических форсунок в топку котельного агрегата вместе с разогретым мазутом поступает пар, который вносит в топку дополнительную теплоту Q_ϕ , определяемую по формуле:

$$Q_\phi = G_\phi (i_\phi - 2380), \text{ кДж/кг}, \quad (57)$$

где G_ϕ – удельный расход пара на 1 кг мазута, кг пара/кг мазута; i_ϕ –

энтальпия пара, поступающего в форсунку, кДж/кг.

Параметры пара, поступающего на распыл мазута: $P = 0,3 \div 0,6$ МПа, $t = 280 \div 350$ °С, удельный расход пара $G_{\phi} = 0,03 \div 0,05$ кг пара/кг мазута.

В случае предварительного (внешнего) подогрева воздуха в калориферах перед его поступлением в воздухоподогреватель котельного агрегата, теплота такого подогрева $Q_{в.вн}$ включается в располагаемую теплоту топлива и рассчитывается по формуле:

$$Q_{в.в} = \beta_{в}(\Gamma_{в}^{\circ} - \Gamma_{ХВ}^{\circ}), \quad (58)$$

где $\beta_{в}$ – отношение количества предварительно подогретого воздуха к теоретически необходимому; $\Gamma_{ХВ}^{\circ}$ – энтальпия теоретического объёма холодного воздуха; $\Gamma_{в}^{\circ}$ – энтальпия теоретического объёма воздуха на входе в воздухоподогреватель.

Располагаемая теплота Q_p расходуется на производство полезной теплоты Q_1 и тепловые потери на 1 кг твердого или жидкого топлива либо на 1м^3 газообразного топлива:

$$Q_p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \quad (59)$$

где Q_1 – полезно используемая теплота; Q_2 – потери теплоты с уходящими газами; Q_3 – потери теплоты с химической неполнотой сгорания топлива; Q_4 – потери теплоты с механической неполнотой сгорания; Q_5 – потери теплоты в окружающую среду через обмуровку; Q_6 – потери с физической теплотой шлака.

Разделив правую и левую части формулы (10) на Q_p и умножив на 100 %, получим уравнения теплового баланса в следующем виде:

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = 100 \% , \quad (60)$$

где q_1 – доля полезно использованной теплоты, %, $q_2 - q_6$ – потери теплоты, выраженные в %.

Коэффициент полезного действия котла:

$$\eta_{ка} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) = 100 - \sum_{i=1}^n q_i \quad (61)$$

Большая часть теплоты, вносимой в топку, воспринимается поверхностями нагрева и передается рабочему телу. За счет этой теплоты производится подогрев воды до температуры кипения, ее испарение и перегрев пара. Это полезно используемая теплота. Остальная часть составляет тепловые потери.

Полное количество теплоты, полезно использованной в котле:

- для водогрейного котла

$$Q_I = D_v(i''_v - i'_v), \text{ кВт}, \quad (62)$$

где D_v – расход воды через котел, кг/с; i'_v , i''_v – энтальпия воды на входе и на выходе из котла, кДж/кг;

- для парового котла

$$Q = D_{пе}(i_{пе} - i_{пв}) + D_{пр}(i_{кип} - i_{пв}), \text{ кВт}, \quad (63)$$

где $D_{пе}$ – расход перегретого пара, кг/с; $D_{пр}$ – расход продувочной воды, кг/с; $i_{пе}$ – энтальпия перегретого пара, кДж/кг; $i_{пв}$ – энтальпия питательной воды, кДж/кг; $i_{кип}$ – энтальпия кипящей воды, кДж/кг.

Наибольшими из потерь в котельном агрегате, как правило, являются потери теплоты с уходящими газами:

$$q_2 = \frac{I_{ух} - \alpha_{ух} I_{х.в}^0}{Q_p^p} (100 - q_4), \% , \quad (64)$$

Химическая неполнота сгорания топлива может являться следствием:

- Общего (или местного) недостатка воздуха (α_T);

- Плохого смесеобразования (способ сжигания топлива, конструкция горелочного устройства);
- Низких или высоких значений теплонапряжения топочного объема $q_v = B_p Q_i^r / V_m$ (в первом случае – низкая температура в топке; во втором – уменьшение времени пребывания газов в объеме топки и невозможность в связи с этим завершением реакции горения).

Потери теплоты с химическим недожогом зависят от вида топлива, способа его сжигания, конструкция горелок, аэродинамики камеры сгорания и принимаются на основании опыта эксплуатации котельных агрегатов.

Потери теплоты с химическим недожогом определяются суммарной теплотой сгорания продуктов неполного окисления горючей массы топлива:

$$q_3 = \frac{V_{cr} (126,4 CO + 358,8 CH_4 + 107,9 H_2)}{Q_p} 100, \% , \quad (65)$$

где CO, CH_4, H_2 – объемный концентрации продуктов неполного сгорания топлива в сухих продуктах сгорания, %; V_{cr} – объем сухих продуктов сгорания, $м^3/кг$.

Потери теплоты с химическим недожогом зависят от коэффициента избытка воздуха (рис.7) и нагрузки топочного устройства (рис.8)

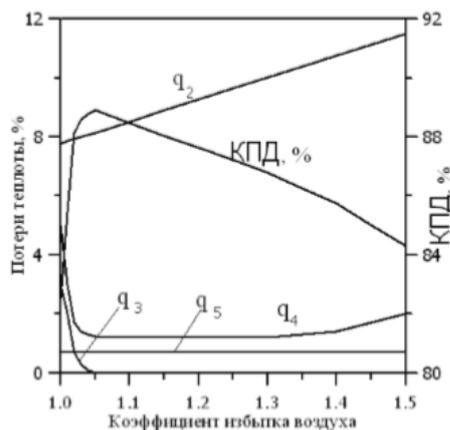


Рисунок 7 – Зависимость потерь теплоты и КПД от коэффициента избытка воздуха

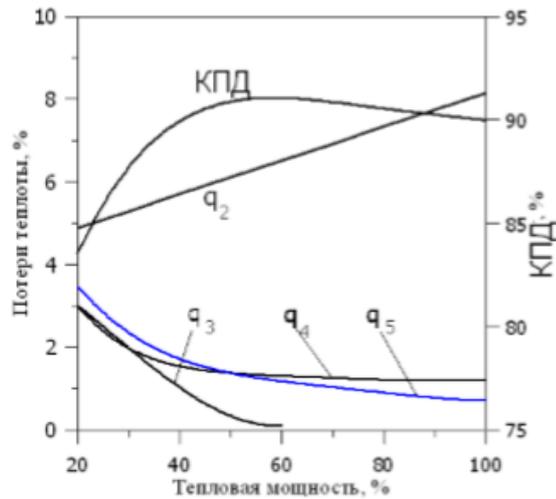


Рисунок 8 – Зависимость потерь теплоты и КПД от тепловой мощности котла

Наличие химического недожога при $\alpha = 1$ определяется несовершенством аэродинамики современных горелочных устройств и камер сгорания, не позволяющих достичь идеального (на молекулярном уровне) перемешивания топлива с воздухом. При коэффициенте избытка воздуха $\alpha_{кр}$ (кривая q_3) химический недожог не возникает. Обычно $\alpha_{кр} = 1,02 \div 1,03$, что и характеризует степень аэродинамического несовершенства горелочного устройства.

Механический недожог при сжигании твёрдых топлив (торфа, углей, сланцев) представляет собой коксовые частицы, которые покидают зону высоких температур, не успев полностью догореть. Механический недожог при сжигании газа и мазута может иметь место также в виде твердых частиц или сажи, возникающих в высокотемпературной зоне при недостатке кислорода. В нормальных условиях эксплуатации потери с механическим недожогом при сжигании твердых топлив составляют $q_4 = 0,5 \div 5$ %. При сжигании газа и мазута потери с мехнедожогом невелики (как правило, менее 1 %).

При камерном сжигании твердого топлива потери теплоты с механической неполнотой сгорания q_4 подразделяются на потери с уносом $q_4^{ун}$ со шлаком $q_4^{шл}$, при этом преобладающую часть составляет $q_4^{ун}$.

Потери q_4 существенно зависят от коэффициента избытка воздуха. При избытке воздуха ниже оптимального недожог определяется неполнотой перемешивания топлива с воздухом на выходе из горелки и развитием зон с недостатком кислорода, хотя температурный уровень достаточно высок.

При $\alpha > \alpha_{опт}$ наблюдается снижение температуры в зоне горения и замедление реакций окисления. Одновременно уменьшается время пребывания частиц в высокотемпературной зоне ввиду увеличения объема продуктов сгорания.

Повышенные потери q_4 у низкорреакционных топлив определяются поздним воспламенением коксовых частиц и затянутым горением в кинетической области, в связи с этим низкорреакционные топлива весьма чувствительны к режиму эксплуатации.

Потери теплоты с механической неполнотой сгорания рассчитываются по формуле:

$$q_4 = \left(a_{шл} \frac{\Gamma_{шл}}{100 - \Gamma_{шл}} + a_{ун} \frac{\Gamma_{ун}}{100 - \Gamma_{ун}} \right) \frac{32,7 A^r}{Q_p}, \%, \quad (66)$$

где $\alpha_{шл}$ и $\alpha_{ун}$ – соответственно, доли золы в шлаке и в уносе; $\Gamma_{шл}$ и $\Gamma_{ун}$ – содержание горючих в шлаке и уносе, %; 32,7 – теплота сгорания коксовых частиц в шлаке и уносе, МДж/кг.

Значение потерь теплоты в окружающую среду от наружного охлаждения q_5 составляет от 0,2 до 2,5 %.

Потери теплоты с физической теплотой шлака определяются по формуле:

$$q_6 = \frac{A^r a_{шл} (ct)_{шл}}{Q_p}, \%, \quad (67)$$

где $(ct)_{шл}$ – произведение температуры и теплоемкости шлака.

При снижении тепловой нагрузки котла происходит некоторое падение температуры уходящих газов, что приводит к уменьшению потерь теплоты с уходящими газами (см. рис. 3). Потери теплоты с химическим и механическим недожогом увеличиваются с уменьшением тепловой нагрузки из-за ухудшения процесса смешения топлива и воздуха при пониженных скоростях. Удельные потери теплоты через обмуровку также увеличиваются, поскольку абсолютное значение этих потерь теплоты остается практически неизменным, а тепловая нагрузка уменьшается. Таким образом, из-за различной зависимости тепловых потерь от нагрузки оказывается, что при пониженной нагрузке КПД котельного агрегата достигает максимального значения (см. рис.3).

Расход топлива B , подаваемого в топочную камеру котельного агрегата, можно определить из баланса между располагаемой и полезной теплотой:

$$B = \frac{Q_1 \cdot 100}{Q_p \cdot \eta_{ка}}, \text{ кг/с или м}^3/\text{с}.$$

Расчетный расход топлива с учетом механической неполноты сгорания:

$$B_p = \frac{B(100 - q_4)}{100}, \text{ кг/с}.$$

Коэффициент полезного действия котла (брутто) по прямому балансу:

$$\eta_{ка} = \frac{Q_1}{Q_p B} \cdot 100, \% . \tag{68}$$

2.5 Способы сжигания топлива

В теплоэнергетических установках топливо сжигается либо в слое, либо в объеме топочной камеры (камеры сгорания). В слое может сжигаться только твердое топливо, в объеме – газ, мазут и твердое топливо в пылевидном состоянии.

На рисунке 9 представлены разновидности способов сжигания.



Рисунок 9 – Разновидности способов сжигания

2.5.1 Слоевое сжигание

При сжигании в плотном слое (рис.10) твёрдое топливо, загруженное слоем определённой толщины (высоты) на распределительную колосниковую решётку, поджигается и продувается (как правило, снизу вверх) воздухом. Основное горение происходит в слое, образованном кусками топлива. Над слоем в объёме топочной камеры горят летучие вещества, выделяющиеся из топлива в процессе его прогрева (H_2 , CO , CH_4 и др.), а также догорают мелкие частицы, выносимые из слоя потоком воздуха и продуктов сгорания. Скорость газоздушного потока в слое ограничивается пределом устойчивости его залегания. Увеличение скорости воздуха (a , следовательно, и скорости дымовых газов) сверх определённого предела вызывает взрыхление слоя, так как воздух, прорывающийся через слой в отдельных местах, образует кратеры. Поскольку в слой всегда загружается полидисперсное топливо, то это приводит к выносу большого количества более мелких частиц топлива, которые не успевают догореть в объёме топки, что вызывает увеличение потерь теплоты с механическим недожогом q_4 .

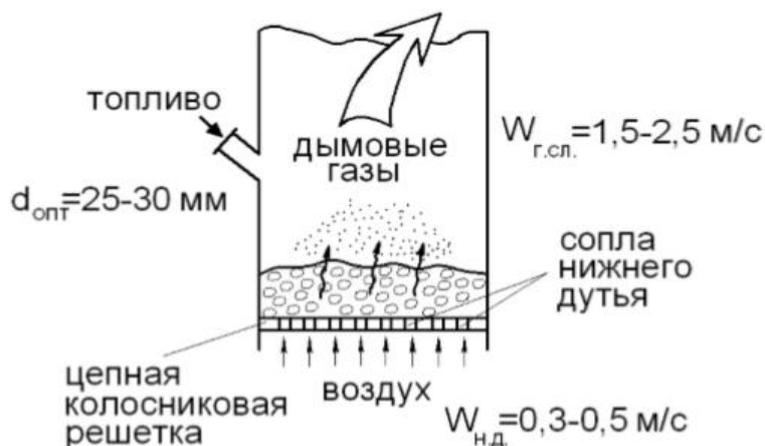


Рисунок 10 - Сжигании в плотном слое

Зона, в пределах которой практически полностью расходуется кислород воздуха, подаваемого под слой, называется кислородной (рис.6): её высота составляет два-три диаметра кусков топлива $h_{\text{кисл}} = (2 \div 4) \delta_{\text{к}}$.

Если высота слоя превышает высоту кислородной зоны, то за кислородной следует восстановительная зона, в которой протекают реакции восстановления CO_2 и H_2O на поверхности углеродных (коксовых) частиц:



В этом случае в состав дымовых газов, наряду с CO_2 , H_2O и N_2 , входят и горючие газы CO и H_2 , образовавшиеся не только в процессе выхода летучих, но и в результате восстановительных реакций CO_2 и H_2O , причём их концентрация возрастает по мере увеличения высоты восстановительной зоны.

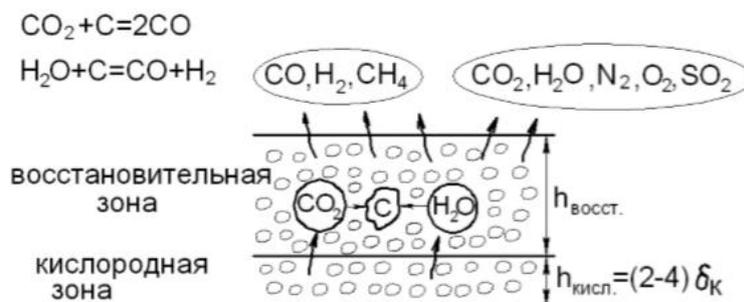


Рисунок 11 – Слой топлива

В слоевых топках высоту слоя следует поддерживать либо равной высоте кислородной зоны, либо несколько большей её. Для дожигания выносимой из слоя в топочный объём мелкодисперсной угольной пыли и продуктов неполного сгорания (H_2 , CO) осуществляется подача дополнительного воздуха над слоем топлива.

Топочные устройства для слоевого сжигания классифицируются в зависимости от способа подачи топлива, перемещения и шуровки слоя топлива на колосниковой решётке. Шуровка слоя необходима для удаления шлака и разрушения спеков (при сжигании спекающихся углей). В немеханизированных топках, где все три операции осуществляются вручную, можно сжигать не более 400 кг/ч угля.

В промышленной теплоэнергетике большее распространение получили слоевые топки с пневмомеханическими забрасывателями и цепной решёткой обратного хода (рис.12).

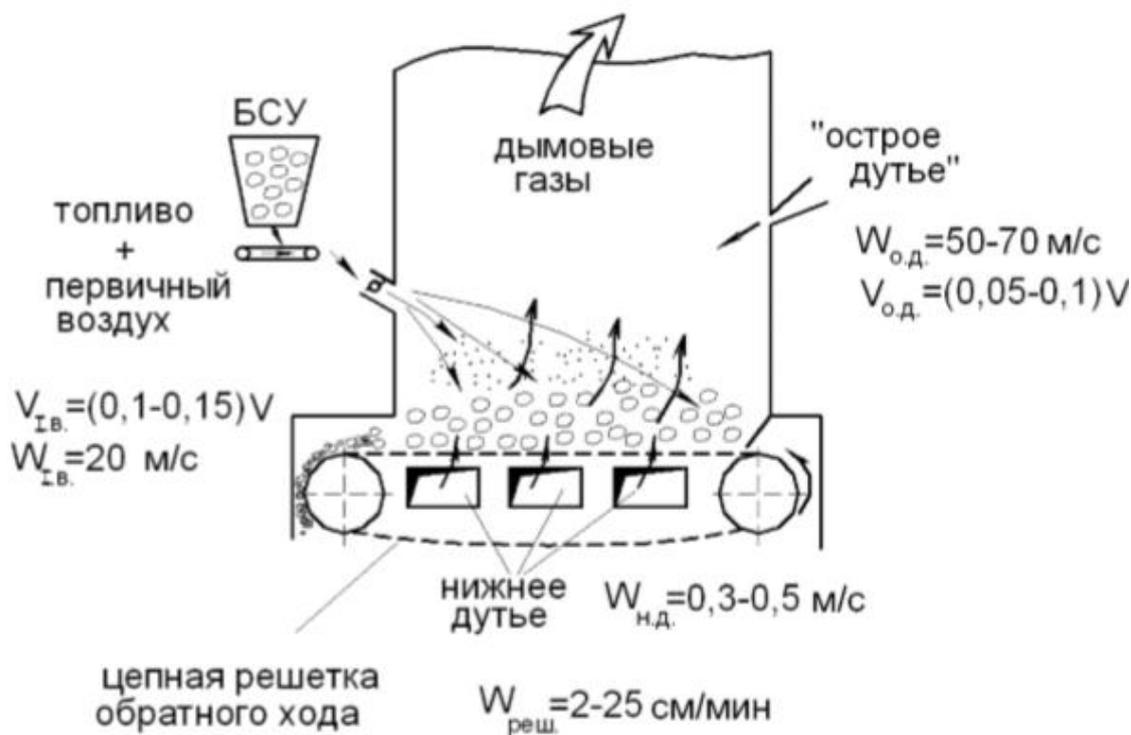


Рисунок 12 – Полумеханическая топка обратного хода

Топливо подаётся из бункера сырого угля ленточным питателем на лопасти ротора пневмомеханического забрасывателя и далее в топку на непрерывно движущуюся со скоростью от 2 до 25 см/мин колосниковую

решётку, сконструированную в виде полотна транспортной ленты. Полотно решётки состоит из отдельных колосниковых элементов, закреплённых на бесконечных шарнирных цепях, приводимых в движение “звёздочками”. Воздух для горения подаётся специальными соплами через зазоры между элементами колосников. По законам инерции более крупные куски летят к задней стенке, и время их пребывания на решётке, а, следовательно, и время горения, больше. Самые мелкие фракции (размер частиц меньше 1 мм) сгорают в топочном объёме на лету, для чего специально подаётся воздух (10÷15 % от общего расхода) со скоростью порядка 20 м/с.

Для интенсификации горения в топочном объёме через сопла, расположенные в задней стенке, дополнительно подаётся воздух (5÷10 % от общего расхода) в виде струй “острого дутья” со скоростью 50÷70 м/с. Как правило, вместе с “острым дутьём” в топку возвращается уловленный в золоуловителе унос с относительно высоким содержанием горючих веществ, что снижает потери теплоты с механическим недожогом. При отсутствии острого дутья и возврата уноса q_4 может превышать 10 %.

Описанная топка, по сути, является факельно-слоевой, поскольку часть топлива сгорает в факеле.

Оптимальный размер кусков угля для слоевых топок составляет $\delta_{\text{опт}} = 25\div 50$ мм. Для такого фракционного состава топлива оптимальная скорость газов в слое (с точки зрения устойчивости залегания слоя) $W_{\text{г}} = 1,5\div 2,5$ м/с, что соответствует скорости нижнего дутья $W_{\text{нд}} = 0,3\div 0,5$ м/с.

Преимуществами слоевых топок являются:

- Простота эксплуатации;
- Отсутствие углеразламывающих устройств (систем пылеприготовления);
- Возможность устойчивой (без погасаний) эксплуатации в широком диапазоне нагрузок

К недостаткам слоевого способа сжигания следует отнести:

- Ограниченная производительность,
- Повышение потери тепла с механическим недожогом q_4 и с уходящими газами q_2 (из-за необходимости поддерживать высокий коэффициент избытка воздуха $\alpha=1,3\div 1,4$ и выше) и, как следствие, низкий КПД;
- Возможность сжигать только твердое топливо;
- Проблематичность (невозможность) сжигания топлива с очень высокой зольностью и влажностью.

2.5.2 Факельное сжигание.

В основу факельных (камерных) топок положен принцип, при котором топливо вдувается в топку (камеру сгорания) через горелки вместе с необходимым для горения воздухом (рис.13).

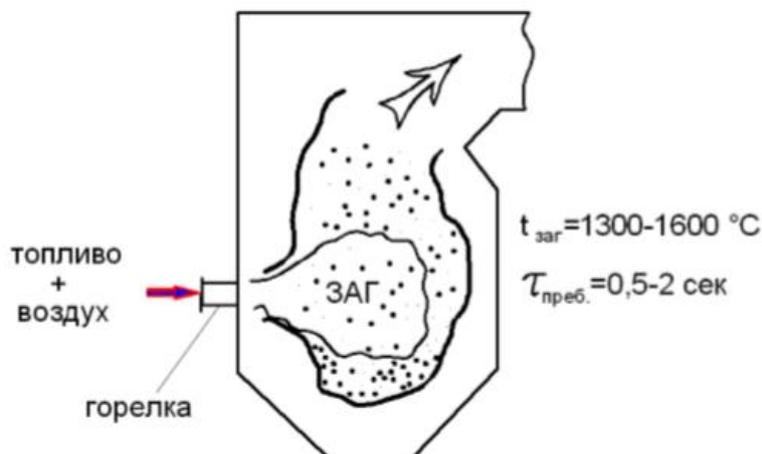


Рисунок 13 – Факельный способ сжигания

Топливо непрерывно транспортируется через топочную камеру потоком воздуха и продуктов сгорания. На пути от входа (выход из горелки) до выхода из топки совершается процесс горения с образованием факела горящего топлива, заполняющего объем топочной камеры. Температура в зоне активного горения (ЗАГ) порядка $1300\div 1500 \text{ } ^\circ\text{C}$. Продолжительность пребывания частиц

топлива в зоне активного горения от 0,5 до 2 с. Для обеспечения полного выгорания топлива за такое короткое время твёрдое топливо перед поступлением в топку предварительно подсушивают и тщательно размалывают до пылевидного состояния, а жидкое – распыляют с помощью форсунок до мельчайших капель.

Твёрдое топливо измельчается в мельничных устройствах и вдувается в топочную камеру через пылеугольные горелки (рис.14). Конструкции горелок чрезвычайно разнообразны, так как диапазон изменения теплотехнических характеристик углей очень велик. Например, выход летучих, в значительной степени определяющий реакционные качества топлива, меняется от 2 % у метаантрацита до 92 % у эстонского сланца. Тем не менее, практически во всех пылеугольных горелках определённая часть воздуха, предназначенная для подсушки и транспортировки угольной пыли к горелке, смешивается с топливом до поступления в топку (первичный воздух), а оставшаяся часть (вторичный воздух) смешивается с аэросмесью уже после выхода из горелки, т.е. в топочном объёме.

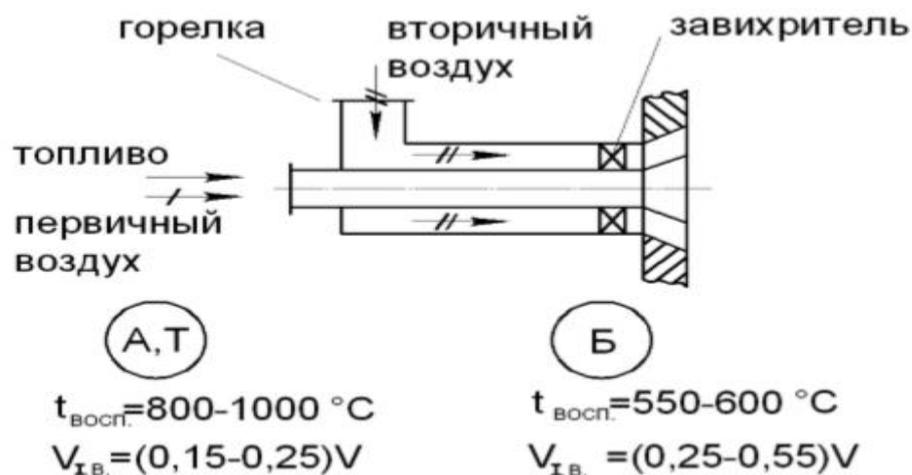


Рисунок 14 – Вихревая пылеугольная горелка

При камерном сжигании угольной пыли летучие вещества, выделяющиеся в процессе её прогрева и термического разложения, сгорают в факеле, образуя с воздухом гомогенную смесь, что способствует разогреву твёрдых частиц (кокса) до температуры воспламенения, а также стабилизирует

факел. Первичный воздух должен обеспечить сжигание летучих, поэтому его количество V_{IB} (доля от общего объёма воздуха) определяется выходом летучих веществ. Для углей с малым выходом летучих (например, антрацита или тощего угля, температура воспламенения которых от 800 до 1000 °С) доля первичного воздуха $V_{\text{IB}} = (0,15 \div 0,25) \cdot V$, а для топлив с высоким выходом летучих (бурых углей с температурой воспламенения от 550 до 600 °С) $V_{\text{IB}} = (0,2 \div 0,55) \cdot V$.

Остальной необходимый для горения воздух (вторичный воздух), как уже было отмечено, подаётся в топку по отдельному каналу и смешивается с угольной пылью уже в процессе горения непосредственно в топочном объёме.

При сгорании летучих расходуется, главным образом, кислород первичного воздуха. Горение летучих ускоряет прогрев коксовых частиц и их воспламенение. Горение же коксовых частиц происходит, в основном, за счёт кислорода вторичного воздуха.

Изложенная схема факельного способа сжигания угольной пыли, безусловно, является упрощённой, так как в реальных условиях сжигается полидисперсная пыль. Поэтому стадии выхода летучих и горения коксового остатка протекают последовательно только для каждой отдельной частицы (или отдельной фракции). А для всего факела, в целом, эти процессы протекают параллельно, поскольку мелкие частицы (размером в несколько микрометров) прогреваются, воспламеняются и сгорают значительно быстрее, чем крупные частицы. При факельном сжигании максимальный размер частиц может достигать: для каменных углей – нескольких сотен микрометров, для бурых углей, сланцев и торфа – нескольких миллиметров.

2.5.3. Расположение горелок на стенках топочной камеры.

Интенсивность процессов горения, тепло- и массообмена, а следовательно, и условия надёжной эксплуатации топочной камеры определяются не только конструкцией горелок и режимными параметрами, но

и схемой размещения горелок на стенках топки. Наибольшее распространение для обычных однокамерных топок получили фронтальное, встречное и угловое расположение горелок.

При фронтальном расположении горелок струи, истекающие из отдельных горелок, первоначально развиваются самостоятельно, а затем сливаются в единый поток. По мере распространения струя подсасывает (эжектирует) топочные газы, масса её значительно увеличивается, а концентрация окислителя снижается. Во избежание касания струёй противоположной (задней) стенки топочной камеры при фронтальном расположении целесообразно использование вихревых горелок, которые дают относительно короткий факел.

При встречном расположении (рис.10б) горелки устанавливаются либо на противоположных боковых стенках, либо на фронтальной и задней, причём возможна как встречно-лобовая, так и встречно-смещённая компоновка.

На рисунке 15 представлены модельные снимки свободно распространяющегося пламени вихревой осесимметричной горелки при различных углах крутки вторичного воздуха в сравнении с пламенем незакрученного параллельноструйного потока.

При встречно-лобовой компоновке в топке получается концентрированный удар встречных потоков, в результате чего поток разделяется на два направления: одна часть потока поднимается в верхнюю половину топки, а другая опускается вниз. При неравенстве импульсов встречных потоков возникает асимметричность течения, и результирующий факел может приблизиться к одной из стен.

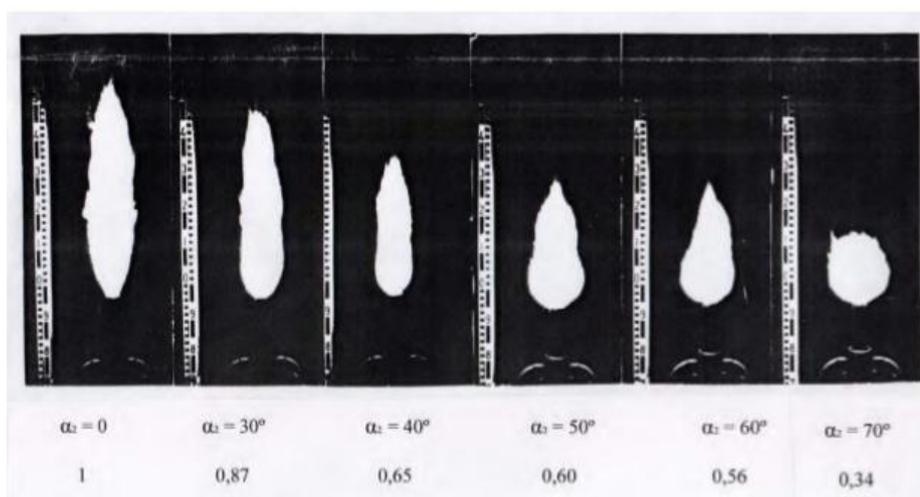


Рисунок 15 - Модельные снимки свободно распространяющегося пламени вихревой осесимметричной горелки.

При встречно-смещённой компоновке горелок потоки взаимно проникают друг в друга, при этом происходит лучшее заполнение факелом топочного объёма, выравнивается поле температур, обеспечивается интенсивный подвод теплоты к корню факела, стабилизируется воспламенение.

При угловом расположении горелок возможны следующие схемы их установки: диагональная, блочная, тангенциальная. Подобные компоновки также имеют ряд преимуществ, аналогичных встречно-смещённой компоновке.

Ещё более интенсифицируются процессы тепло- и массопереноса за счёт дополнительной турбулизации (крутки) потоков с помощью вихревых горелок, однако при несоответствии импульсов возможно искажение аэродинамики результирующего потока и, как следствие, неравномерность тепловосприятия по горизонтальному сечению топочной камеры.

Применение вихревых горелок кардинально изменяет аэродинамику истекающих потоков: профиль скорости, скорость вдоль оси струи, угол раскрытия струи, эжектирующую способность струи, – по сравнению с прямоточными горелками

При незначительной крутке на оси струи уменьшается статическое давление. Струя распространяется под действием центробежных сил, вызванных движением вращающихся частиц потока. До тех пор, пока между

силами сжатия и центробежными силами сохраняется равновесие, профиль осевой составляющей скорости подобен случаю распространения свободной незакрученной струи (рис.16, кривая а).

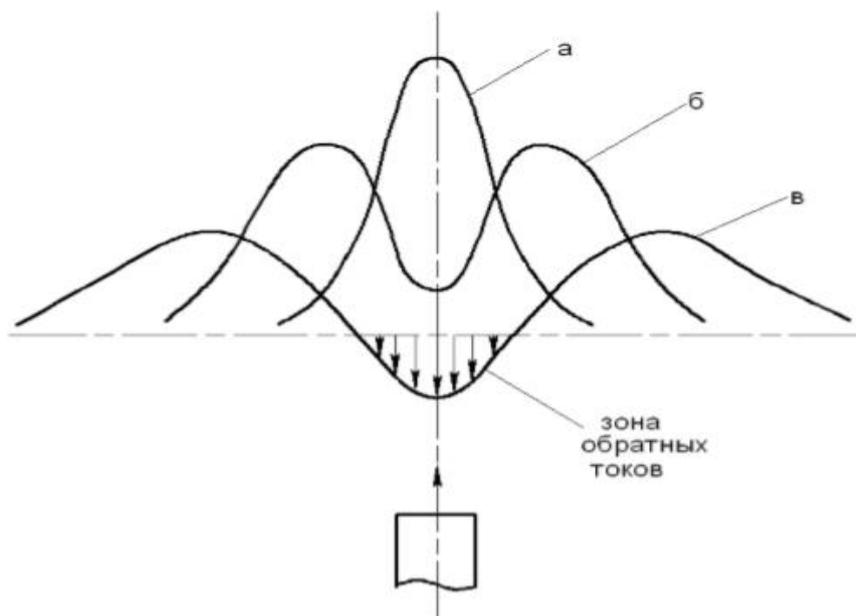


Рисунок 16 – Изменение профиля осевой составляющей скорости в околоторелочной области

При усилении крутки потока силы сжатия компенсируют часть импульса осевого потока и тем самым замедляют его. Поскольку максимальное падение давления происходит на оси струи, наибольшее торможение осевого потока имеет место также на оси. При дальнейшем повышении степени крутки образуется профиль скорости со впадиной посередине (рис.16, кривая б).

Последующее увеличение крутки приведёт к тому, что силы сжатия превысят осевой импульс потока вблизи оси и вынудят повернуть осевой поток в обратном направлении (рис.16, кривая в).

Образующийся в околоторелочной области обратный вихрь играет важнейшую роль, в первую очередь, при стабилизации вихревого пламени, поскольку за счёт эффекта внутренней рециркуляции происходит подсос горячих дымовых газов в корень факела, в отличие от прямоточных горелок, которые эжектируют горячие газы только с внешней (периферийной) поверхности.

Вихревые горелки обеспечивают устойчивое воспламенение угольной пыли (особенно при сжигании топлив с низким выходом летучих), при этом вторичный воздух закручивается с помощью аксиально или радиально расположенных направляющих лопаток или “улитки”. В результате, истекающий в топочное пространство поток образует мощный турбулентный закрученный факел, на оси которого создаётся разрежение, что обеспечивает подсос большого количества раскалённых продуктов сгорания из ядра факела к устью горелки – так называемая зона внутренней (приосевой) рециркуляции дымовых газов. Это ускоряет прогрев смеси топлива с первичным воздухом и её воспламенение, т.е. стабилизирует факел. Размер зоны внутренней рециркуляции (зоны обратных токов) и её удаление от среза горелки определяются геометрией горелки, степенью крутки и соотношением режимных параметров.

При факельном сжигании угольной пыли в топке в каждый момент времени находится ничтожный запас топлива – не более нескольких десятков килограммов. Это делает факельный процесс значительно более чувствительным к изменениям расходов топлива и воздуха (в сравнении со слоевым сжиганием) и позволяет в случае необходимости практически мгновенно изменять тепловую производительность топки (как при сжигании газа и мазута). Факельный способ сжигания предъявляет дополнительные требования к надёжности непрерывной подачи угольной пыли в топку, поскольку малейший (даже несколько секунд) перерыв может привести к погасанию факела, что связано с опасностью взрыва при возобновлении подачи топлива. Поэтому в пылеугольных котлах устанавливают несколько горелок.

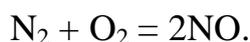
Преимущества факельного способа сжигания по сравнению со слоевым:

- Камеры пригодны для сжигания любого вида топлива, включая отходы углей, образующиеся при их обогащении;
- Возможность создания топки практически на любую, сколь угодно большую мощность;

- Надежная эксплуатация при низких коэффициентах избытка воздуха (даже при снижении угольной выли $\alpha=1,115\div 1,2$);
- Пониженный мехнедожог
К недостаткам следует отнести следующее:
- Ограничен нижний предел производительности (при сжигании угольной выли тепловая мощность не ниже 20 МВт), т.е. невозможно сжигать угольную пыль в маленьких топках, особенно при переменных режимах работы;
- Повышение энергозатраты на собственные нужды в связи с необходимостью предварительной подготовки топлива (системы пылеприготовления - СПП);
- Более высокие концентрации токсичных газов (оксидов азота и серы).

2.5.4 Сжигание в кипящем слое

Устойчивое горение пылеугольного факела возможно только при высокой температуре в ядре факела – не ниже $1300\div 1500$ °С. В этом диапазоне температур заметно возрастает скорость образования “термических воздушных” оксидов по реакции:

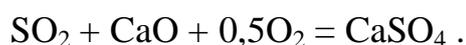


В атмосфере оксид азота NO доокисляется до высокотоксичного диоксида NO₂, предельно допустимая (безопасная для людей) концентрация (ПДК) которого в приземном слое не должна превышать 0,085 мг/м³. Даже строительство высоких дымовых труб (для обеспечения рассеивания дымовых газов на как можно большую площадь) не всегда обеспечивает экологическую безопасность, особенно в районах сосредоточения большого количества топливоиспользующих установок.

При сжигании топлив, содержащих серу, образуется токсичный диоксид серы SO₂, вызывающий образование фотохимического смога и кислотных

дождей, пагубно воздействующий не только на здоровье людей (вызывает раковые заболевания), но и на флору и фауну.

Одним из наиболее эффективных способов уменьшения вредных выбросов является снижение температуры в зоне активного горения до 850÷950 °С. При этих температурах скорость образования оксида азота по реакции (11) незначительна, а диоксид серы соединяется с оксидами кальция и магния, входящими в минеральную часть топлива, по реакции (аналогичным образом реагирует и MgO):



Если содержание оксидов кальция и магния в золе недостаточно для связывания всего SO₂ (как правило, необходим двух- или трёхкратный его избыток по сравнению со стехиометрическим соотношением по реакции (12)), к топливу подмешивается известняк CaCO₃. При температуре около 900 °С известняк интенсивно разлагается на CaO и CO₂, а гипс CaSO₄ не разлагается, т.е. реакция 12 необратима. Таким образом, токсичный SO₂ связывается до безвредного, практически не растворимого в воде гипса, который удаляется вместе с золой.

С другой стороны, в процессе жизнедеятельности человека образуется большое количество горючих органических отходов, которые не могут считаться топливом в общепринятом смысле: “хвосты” углеобогащения, отвалы при добыче угля, многочисленные отходы целлюлозно-бумажной и лесной промышленности и т.д. Например, огромные терриконы “пустой породы”, образующиеся вблизи угольных шахт, склонны к самовозгоранию, однако сжечь эту “породу” не удаётся ни в слоевых, ни в камерных топках из-за высокого содержания минеральных примесей. В слоевых топках зола, спекаясь при горении, препятствует проникновению кислорода к частицам горючего или забивает воздушные сопла, а в камерных – невозможно получить необходимую для устойчивого горения температуру.

Так возникшая перед человечеством проблема снижения вредных газообразных выбросов, а также необходимость разработки безотходных технологий поставили вопрос о создании топочных устройств для сжигания таких материалов. С этой целью разработан способ сжигания в кипящем слое.

Кипящим (псевдооживленным) называется слой мелкодисперсного материала, продуваемый снизу-вверх потоком какого-либо газа со скоростью, превышающей предел устойчивости плотного слоя, но недостаточной для выноса частиц из слоя. Интенсивная хаотичная циркуляция частиц в ограниченном объёме создаёт впечатление бурно кипящей жидкости, сам слой приобретает некоторые её свойства, и его поведение подчиняется законам гидростатики, что и объясняет происхождение названия.

Если в камере сгорания установить решётку, на которую поместить слой угля, и к решетке подать в небольшом количестве воздух, то после предварительного разогрева слоя начнётся горение топлива с поверхности с выделением газообразных продуктов сгорания. При восплавлении сгорающего топлива, т.е. при непрерывной подаче топлива, на решётке будет поддерживаться фиксированный горящий слой (слоевое сжигание топлива).

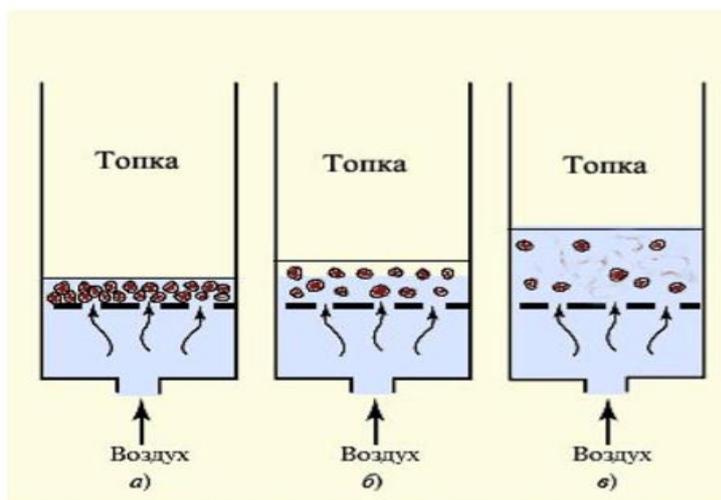


Рисунок 17 – Изменение слоя топлива при различных скоростях нижнего дутья.

Если увеличивать подачу воздуха под решетку, то на частицы топлива, находящегося на решётке, будет действовать скоростной напор, который будет

противодействовать силе тяжести, действующей на каждую частицу топлива. При некоторой скорости воздуха частицы топлива окажутся во взвешенном состоянии в подъёмном потоке воздуха, а толщина горящего слоя возрастет (рис.16б). Переход неподвижного слоя в кипящий происходит при такой скорости оживающего агента, когда гидродинамическое давление потока P уравнивает силу тяжести G , действующую на частицы. Минимальную скорость, при которой начинается псевдооживление, называют первой критической скоростью $W_{кр1}$.

При дальнейшем увеличении скорости толщина слоя ещё больше возрастает. Создаётся впечатление, что слой топлива “кипит”. Это так называемый стационарный пузырьковый кипящий слой (рис.17 в, 18).

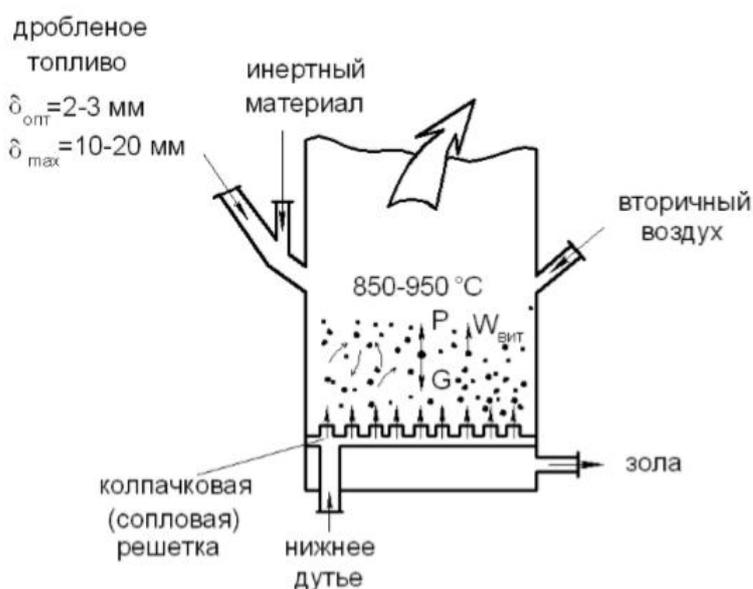


Рисунок 18 – Стационарный кипящий слой (СКС)

При ещё большей скорости воздуха подъёмная сила, действующая на частицы топлива, возрастает настолько, что частицы не успевают сгорать, вырываются из кипящего слоя, видимый слой исчезает, и при достижении условия $P > G$ частицы топлива начинают выноситься из слоя.

Скорость, при которой аэродинамическая сила становится равной силе тяжести частиц топлива, называется второй критической скоростью $W_{кр2}$.

Реальные топочные устройства с кипящим слоем работают со скоростями от $W_{кр1}$ до $W_{кр2}$.

Различают топки с обычным, или стационарным, кипящим слоем (когда скорость в нем близка к $W_{кр1}$) и топки с циркулирующим кипящим слоем (когда скорость близка к $W_{кр2}$). При этом оба параметра (первая и вторая критические скорости) имеют строго определенные значения только для монодисперсного материала с постоянной плотностью, а слой состоит из полифракционного инертного материала и частиц топлива разной плотности.

В топках с кипящим слоем количество горючего материала составляет обычно небольшую долю от массы слоя, основу которого составляет какой-либо инертный материал или зола топлива (при сжигании высокозольных углей). Интенсивное перемешивание твердых частиц под воздействием оживающего воздуха, проходящего через слой зернистого материала, обеспечивает повышенный тепло- и массообмен в слое. Погружение в кипящий слой поверхностей нагрева позволяет поддерживать температуру на таком уровне, при котором не происходит зашлаковки слоя.

В топку со стационарным кипящим слоем (см. рис.16) подаются известняк, песок, гранулированная зола или другой зернистый (инертный) материал, образующий с дробленным углем (размер частиц 1,5÷6 мм) суспензионный кипящий слой под действием восходящего потока воздуха, поступающего через сопла, расположенные в колпачковой решётке в нижней части топки.

Поддержание температуры кипящего слоя в необходимых пределах (850÷950 °С) и организация самого процесса “кипения” как раз и осуществляются за счёт того, что вместе с топливом подаётся какой-либо инертный мелкодисперсный материал (в соотношении примерно 1:1).

Простейшая топка с кипящим слоем имеет много общих конструктивных элементов со слоевой топкой. Принципиальное отличие заключается в интенсивном перемешивании частиц, что обеспечивает постоянство температуры по всему объёму (по высоте и сечению) кипящего слоя и, как

следствие, высокие значения коэффициента теплоотдачи к поверхностям теплообмена.

Технология кипящего слоя позволяет сжигать дроблёное топливо с размером частиц до 10÷20 мм (при сжигании древесных отходов – до 35 мм) при среднем оптимальном размере частиц $\delta_{\text{ср}}=2\div3$ мм. Такому размеру частиц соответствует рабочая оптимальная скорость псевдооживления (скорость витания частиц) от 1,5 до 4 м/с, что в 2÷3 раза превышает скорость предела устойчивости плотного слоя, состоящего из частиц такого диаметра.

Вторым поколением развития технологии сжигания в кипящем слое является топка с циркулирующим кипящим слоем (рис.19).

Принципиальное отличие заключается в том, что за топкой устанавливается циклон, в котором все недогоревшие частицы улавливаются и возвращаются обратно в топку. Таким образом, частицы оказываются “запертыми” в замкнутой системе топка-циклон-топка до тех пор, пока не сгорят полностью. Такие реакторы по экономичности практически не уступают камерным топкам, при сохранении всех экологических преимуществ.

Топки с циркулирующим кипящим слоем отличаются более высокой степенью выгорания топлива (примерно 98÷99 % против 90÷95 % у котлов со стационарным кипящим слоем) и могут работать с меньшим коэффициентом избытка воздуха.

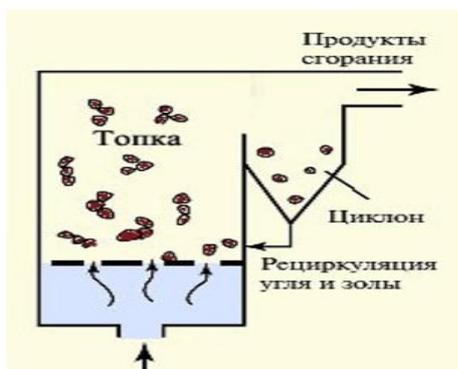


Рисунок 19 – Циркулирующий кипящий слой (ЦКС)

Преимущества топок с кипящим слоем (по сравнению с пылеугольными котлами):

- более высокий коэффициент конвективного теплообмена;
- длительное пребывание частиц в слое позволяет сжигать дроблёное топливо, а также уголь с повышенной зольностью и отходы производства;
- возможность создать более компактное топочное устройство без системы пылеприготовления;
- добавка известняка в слой связывает серу топлива с зольным остатком, что уменьшает выбросы сернистого ангидрида с дымовыми газами в атмосферу;
- низкие температуры в слое (800÷950 °С) обеспечивают отсутствие термических оксидов азота, что приводит к сокращению выбросов оксидов азота в атмосферу.

Наряду с преимуществами использования котлов с топками низкотемпературного кипящего слоя, многолетний опыт их эксплуатации показал и их явные недостатки:

- сложность регулирования производительности котла, что обусловлено узким диапазоном рабочих температур реактора кипящего слоя, так как при увеличении температуры кипящего слоя выше 900÷950 °С происходит шлакование слоя, что является аварийной ситуацией и вызывает необходимость остановки котла;
- при понижении температуры слоя до 750 °С горение становится неустойчивым и возможно его прекращение, вызывающее необходимость повторного запуска котла, что сопряжено с временными и трудовыми затратами;
- истирание частиц твёрдого инертного материала и унос их потоком ожижающего агента;
- эрозия поверхностей нагрева;
- ограниченный диапазон скоростей ожижающего агента;
- повышенный расход электроэнергии на привод высоконапорных вентиляторов для подачи воздуха в зону горения и создания кипящего слоя.

Область применения котлов с кипящим слоем – сжигание низкосортных твердых топлив при паропроизводительности до 250 т/ч как для новых ТЭС, так и проходящих модернизацию. В мире в настоящее время эксплуатируется более 200 энергетических котлов с ЦКС, в том числе освоен энергоблок мощностью 250 МВт. В России разрабатываются котлы с ЦКС паропроизводительностью 160, 500 и 1000 т/ч для сжигания каменных и бурых углей различных месторождений.

Топки с кипящим слоем широко используются не только (и даже не столько) в энергетике, но и в других отраслях промышленности для:

- сжигания колчеданов с целью получения SO_2 ;
- обжига различных руд и их концентратов (цинковых, медных, никелевых, золотосодержащих);
- термического обезвреживания различных вредных веществ (твёрдых, жидких и газообразных), например, шламов осветления сточных вод, городского мусора, бытовых отходов и т.д.

2.6 Вихревые топki.

2.6.1 Высокотемпературное вихревое сжигание

Высокотемпературное вихревое сжигание (ВТВ) осуществляется в циклонно-вихревых топках (рис.20). Этот способ также позволяет сжигать газообразное, жидкое и дроблёное твёрдое топливо (с размером частиц, как правило, до 5 мм).

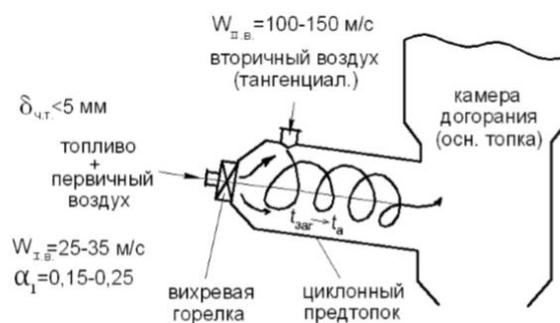


Рисунок 20 – Высокотемпературное вихревое сжигание

Перед основной топкой (камерой догорания) монтируется циклонный предтопок (обычно, незкранируемый). Смесь топлива с первичным воздухом подаётся по оси предтопка, а вторичный воздух – по касательной к образующей циклона со скоростью около 100 м/с. Таким образом создаётся мощный вихрь, обеспечивающий условия для многократной циркуляции частиц топлива в вихревом потоке, что увеличивает время их пребывания в зоне активного горения при температурах, близких к адиабатным (до 2000 °С), что и позволяет сжигать более крупные частицы, чем при факельном способе сжигания.

Циклонно-вихревые камеры подключаются к основному топочному объёму, что предусматривает ступенчатое сжигание со всеми его достоинствами. При этом в циклонной предтопке, во всем диапазоне нагрузок котла, имеет место активное циклонно-вихревое движение среды с интенсивным центробежным полем и высокой турбулентностью.

По ряду причин в энергетике этот способ сжигания используется очень редко. Как правило, сфера применения схожа с реакторами с кипящим слоем: технологические процессы, термическое обезвреживание и т.д.

2.6.2. Низкотемпературное вихревое сжигание.

Другой разновидностью вихревого сжигания является низкотемпературный вихревой (НТВ) способ сжигания, разработанный профессором В.В. Померанцевым (рис.21).

В основу НТВ-технологии заложен принцип организации низкотемпературного сжигания грубоизмельченного твердого топлива в условиях многократной циркуляции частиц в камерной топке.

В НТВ-топке организованы две зоны горения, которые условно разнесены по ее высоте: вихревая и прямоточная. Вихревая зона занимает объём нижней части топки от устья топочной воронки до горелок. Прямоточная зона горения располагается над вихревой зоной в верхней части топки.

Аэродинамика вихревой зоны создается за счет взаимодействия двух организованных потоков: первый поток сформирован из топливно-воздушной смеси, поступающей в топку через горелки; второй поток состоит из горячего воздуха, подаваемого в топку через систему нижнего дутья (скорость около 100 м/с). Потоки направлены навстречу друг другу по касательной и образуют пару сил, создающую вихревое движение в нижней части топки.

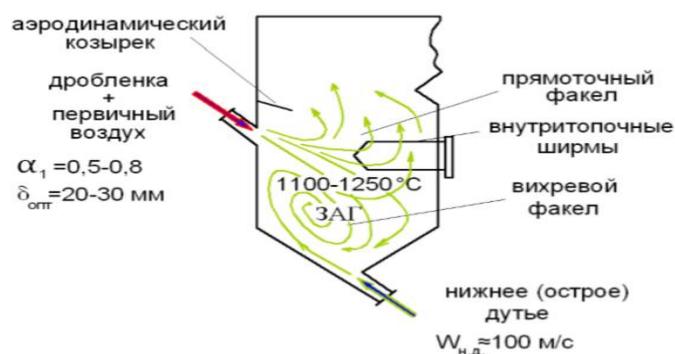


Рисунок 21 – Низкотемпературная вихревая топка Померанцева

В отличие от традиционной технологии пылеугольного сжигания, где основная часть топлива (до 95 %) сгорает в так называемой "зоне активного горения", расположенной в районе горелок и занимающей относительно небольшой объём топочной камеры, в вихревой топке с НТВ-технологией сжигания в "зону активного горения" вовлечен значительно больший объём топочного пространства. В результате снижается максимальная температура в вихревой топке (примерно на $100 \div 300^\circ \text{C}$), и за счет активной аэродинамики выравнивается уровень температуры в объёме вихревой зоны. Отсюда и название – низкотемпературный вихрь.

Пониженный температурный уровень и повышенная конвективная составляющая коэффициента теплоотдачи позволяют устанавливать внутритопочные ширмовые поверхности нагрева, что обеспечивает дополнительный теплосъём и позволяет уменьшить габариты (высоту) топочной камеры.

Снижение выбросов оксидов азота в НТВ-топке обусловлено условиями топочного процесса: низким уровнем температуры в зоне активного горения и

ступенчатым подводом окислителя к топливу. Максимальная температура продуктов сгорания в классической НТВ-топке не превышает 1100÷1250 °С. Вихревая зона топки является практически изотермичной. При таком температурном уровне образуются, в основном, топливные оксиды азота, количество воздушных оксидов азота ничтожно мало (см. раздел 11). Коэффициент избытка воздуха в горелках (доля первичного воздуха) зависит от марки топлива и лежит в диапазоне $\alpha_1 = 0,5 \div 0,8$. В результате применения НТВ-сжигания удастся снизить концентрацию оксидов азота на 20÷50 % в сравнении с традиционной технологией сжигания в прямоточном факеле.

В НТВ-топке созданы также благоприятные условия для связывания оксидов серы. Низкий уровень температуры определяет активное связывание оксидов серы основными оксидами (СаО, MgO) минеральной части топлива. Этому процессу способствует увеличение времени пребывания связывающих компонентов в вихревой зоне, а также меньшая оплавленность (т.е. большая поверхность реагирования) частиц золы. Применение НТВ-технологии сжигания позволяет повысить степень связывания оксидов серы в пределах газового тракта котла на 20÷50 % (в зависимости от марки топлива) в сравнении с технологией прямоточного факела. Кроме того, как показывает опыт, условия вихревой топки позволяют эффективно использовать различные сорбенты на основе СаО для повышения степени связывания оксидов серы.

Укрупнение помола топлива при НТВ-сжигании приводит к укрупнению летучей золы уноса. Испытания золоулавливающего оборудования котлов, переведённых на НТВ-сжигание, показали повышение эффективности работы золоуловителей циклонного типа и электрофильтров.

Таким образом, пониженный уровень температуры, ступенчатый ввод окислителя, многократная циркуляция горящих топливных частиц и огрубление гранулометрического состава золы в совокупности обеспечивают улучшенные показатели вихревых топок по вредным выбросам (оксидам азота и серы), а также повышают эффективность работы золоулавливающего оборудования котельной установки.

НТВ-топка отличается высокой устойчивостью воспламенения топлива, что особенно актуально при сжигании низкосортных топлив. Несмотря на пониженный уровень температуры, благодаря организованной многократной циркуляции горящих коксовых частиц топлива и ступенчатому подводу воздуха в вихревой зоне топки создан устойчивый и надежный механизм, стабилизирующий воспламенение и обеспечивающий выгорание топлива. Важную роль при этом имеет конструктивное исполнение горелочно-сопловых устройств и аэродинамические приемы, обеспечивающие взаимодействие горелочных и сопловых потоков между собой. НТВ-топка позволяет обеспечить эффективное сжигание низкосортных топлив без использования "подсветки" пылеугольного факела газом и мазутом.

Применение НТВ-сжигания позволяет практически полностью исключить шлакование поверхностей нагрева котла и повысить надежность его работы. Пониженный уровень температуры в зоне активного горения снижает количество расплавленных частиц золы, что в сочетании с активной аэродинамикой снижает вероятность возникновения отложений на поверхностях нагрева котла. НТВ-технология сжигания получила апробацию на широкой гамме твердых топлив, таких как торф, бурые и каменные угли, горючие сланцы, отходы деревообработки и микробиологического производства.

Характеристики опробованных при НТВ-сжигании твердых органических топлив находятся в следующих диапазонах:

- влажность на рабочую массу, W_t^r , % 14÷75;
- зольность на рабочую массу, A^r , % 5÷50;
- выход летучих на горючую массу, V^{daf} , % 23÷90;
- теплота сгорания, Q_i^r , МДж/кг 4,2÷26;
- содержание серы на рабочую массу, S^r , % 0,2÷3,0;
- содержание азота на рабочую массу, N^r , % 0,4÷2,0.

Достоинства НТВ-сжигания

Применение НТВ-технологии позволяет:

- упростить систему подготовки топлива (возможность сжигать дроблёный уголь с размером частиц до 20÷30 мм), увеличить её производительность, обеспечить взрывобезопасность, снизить затраты на подготовку топлива к сжиганию, увеличить срок службы размольного оборудования;

- стабилизировать воспламенение и горение и отказаться от "подсветки" факела газом или мазутом, даже при сжигании низкосортных топлив;

- обеспечить устойчивый процесс горения вне зависимости от колебаний нагрузки котла и технических характеристик топлива, что унифицирует топку по топливу;

- повысить коэффициент тепловой эффективности топки, что дает возможность увеличить паропроизводительность котла на 15÷20 %;

- создавать малогабаритные котлы большой мощности;

- исключить шлакование и загрязнение топочных и конвективных поверхностей нагрева;

- обеспечить снижение выбросов оксидов азота NO_x на 20÷50 %;

- обеспечить снижение выбросов оксидов серы SO_x на 20÷40 % за счет их связывания с основными оксидами золы (CaO и MgO) при благоприятных внутритопочных условиях;

- обеспечить более глубокое связывание оксидов серы за счет ввода в вихревую топку CaO -содержащих добавок.

Недостатки:

- повышенный мехнедожог (из-за уноса крупных недогоревших частиц);

- эрозия внутритопочных поверхностей нагрева.

В промышленной теплоэнергетике основным является факельное сжигание, когда в топочную камеру через прямоточные или вихревые горелки подаются потоки топлива и воздуха или топливовоздушной смеси (а иногда – ещё и газы рециркуляции). Реже применяются циклонно-вихревой способ, низкотемпературный вихрь и кипящий слой.

Литература

1. Акмен Р.Г. Топливо, основы теории горения и топочные устройства: текст лекций.- Харьков: НТУ «ХПИ», 2005.
2. Алаев Г.П. Топливо и теория горения: учебное пособие/ЛТА.- Л., 1990.
3. Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Основы сжигания газа: учебное пособие. - СПб., 2009.
4. Вулис П.А., Ярин Л.П. Аэродинамика факела.- Л.: Энергия, 1978.
5. Гладышев Н.Н., Короткова Т.Ю., Иванов В.Д. и др. Справочное пособие теплоэнергетика жилищно-коммунального предприятия.- СПб., 2008.
6. Григорьев К.А., Рундыгин Ю.А., Тринченко А.А. Технология сжигания органических топлив. Энергетическое топливо: учебное пособие.- СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006.
7. Лабейш В.Г. Введение в специальность. Теплоэнергетика: учебное пособие. - СПб.: Изд-во СЗТУ, 2007.
8. Мунц В.А., Павлюк Е.Ю. Основы теории горения топлива: учебное пособие-Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005.
9. Смородин С.Н., Иванов А.Н., Белоусов В.Н. Котельные установки и парогенераторы: учебное пособие. - СПб., 2009.
10. Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С., Топливо и теория горения: учебное пособие. - СПб., 2011.

Таблица П1 - Расчётные характеристики природных газов

№ П/П	Газопровод	Состав газа, %, по объему							Q_i^d , МДж/м ³	ρ , кг/м ³
		CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	CO ₂	N ₂		
1	Уренгой - Надым - Пунга - Ухта	98,72	0,12	0,01	<0,01	-	0,14	1,00	35,50	0,724
2	Уренгой-Ужгород	98,9	0,12	0,01	0,01	-	<0,06	0,9	35,59	0,724
3	Уренгой-Новопсковск	98,9	0,13	0,01	<0,01	-	0,08	0,87	35,59	0,723
4	Уренгой-Сургут-Челябинск	98,24	0,29	0,2	0,09	0,04	0,14	1,00	35,80	0,729
5	Надым - Пунга - Нижняя Тура- Свердловск - Челябинск	9,67	0,16	0,08	0,01	-	0,08	1,00	35,59	0,725
d	Нижний Новгород — ИвановО - Череповец	98,99	0,25	0,04	0,02	-	0,10	0,60	35,75	0,725
7	Бухара - Урал	94,24	3,00	0,89	0,39	0,3	0,28	0,90	37,56	0,771
8	Средняя Азия - Центр	94,08	2,8	0,73	0,3	0,09	1,0	1,0	36,76	0,771
9	Саратов - Москва	90,29	2,8	1,10	0,75	0,54	0,32	4,20	37,01	0,807
10	Мострансгаз (кольцо)	96,57	1,4	0,40	0,18	0,10	0,15	1,2	36,30	0,747
11	Оренбург - Александров Гай	86,43	3,90	1,72	0,87	0,37	0,01	6,70	36,80	0,828

* Концентрация пентана C₅H₁₂ и других более тяжёлых углеводородов.

Таблица П2 - Расчётные характеристики попутных газов

№ RR	Газопровод	Состав газа, %, по объему								Q_i^d , МДж/м ³	ρ , кг/м ³
		CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	H ₂ S	CO ₂	N ₂		
1	Каменный Лог-Пермь	38,70	22,60	10,70	2,70	0,70	0,80	-	23,80	42,37	1,196
2	Ярино-Пермь	38,00	25,10	12,50	3,30	1,30	1,10	-	18,70	46,89	1,196
3	Кулшовка-Самара	58,00	17,20	7,40	2,00	0,50	0,50	0,80	13,60	41,74	1,052
4	Безенчук-Чапаевск	42,70	19,60	12,60	5,10	1,30	0,80	1,00	16,90	46,98	1,196
5	Барса-Гельмес-Вышка-Небит-Даг	93,90	3,40	1,30	0,70	0,20	-	0,40	0,10	38,10	0,778
6	На входе в Краснодар, Крымск, Новороссийск	91,20	3,90	2,00	0,90	0,20	-	1,8	-	38,27	0,810
7	Вознесенская - Грозный, Карабулак - Грозный	76,70	13,20	5,40	2,50	2,20	-	-	-	47,02	0,971
8	Тэбук - Сосновка	48,20	18,20	11,90	3,30	1,00	-	0,90	16,50	45,13	1,164
9	Туймазм - Уфа	50,00	22,00	9,80	1,20	0,40	-	-	16,60	43,04	1,095
10	Шкапово - Туймазы	44,10	22,00	5,20	1,40	0,30	-	-	27,00	36,63	1,095
11	Казань - Бугульма - Лениногорск - Альметьевск	53,60	22,80	6,10	0,90	0,20	-	0,20	16,20	40,61	1,046

Таблица П5 - Основные теплотехнические характеристики горючих газов

газ	Пределы воспламеняемости и в смеси с воздухом, % газа		Температура воспламенения, °С	Низшая теплота сгорания, Q_i^d , МДж/м ³
	нижний	верхний		
Водород	4,1	74,2	510-590	10,78
Окись углерода	12,5	74,2	610-658	12,62
Метан	5,3	14,0	545-850	35,88
Этан	3,2	12,5	510-595	64,44
Пропан	2,4	9,5	500-590	92,91
Бутан	1,9	8,4	430-570	121,7
Ацетилен	2,5	80,0	335-500	56,08
Природный газ	4,5	17,0	560-800	35,7
Коксовый	5,6	31,0	500-640	18,06
Сланцевый	10,7	32,8	700	15,38
Доменный	35,0	74,0	530-680	3,94

