

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ  
УЗБЕКИСТАН**

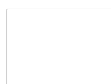
**СОТНИКОВА И. В.**

**КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ**

**“СБОРНИК ЗАДАЧ И РЕШЕНИЕ  
ПРИМЕРОВ”**

*Рекомендовано Министерством высшего и среднего  
специального образования Республики Узбекистан  
в качестве учебного пособия для студентов*

**ТАШКЕНТ - 2022**



**УДК 621.181**  
**ББК 31.361**

**Сотникова И.В. Котельные установки “Сборник задач и решение примеров”.** Учебное пособие. –Т.: «Fan va texnologiyalar nashriyot-matbaa uyi», 2022. 177 с.

**ISBN 978–9943–**

В учебном пособии отражены теоретические сведения по топливу и расчету теплообмена в котлах, даются примеры решений задач и задачи для самостоятельного выполнения.

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям бакалаврской подготовки: энергетика (теплоэнергетика); энергоаудит и энергетический контроль промышленных предприятий, изучающих курс котельные установки.

\*\*\*

O‘quv qo‘llanmasida yonilg‘i va qozonlarda issiqlik almashinuvini hisoblash bo‘yicha nazariy ma‘lumotlar aks ettirilgan, mustaqil bajarish uchun vazifalar va vazifalarni hal qilish misollari berilgan.

Qo‘llanma bakalavr ta‘lim yo‘nalishlari bo‘yicha tahsil olayotgan oliy o‘quv yurtlari talabalari uchun mo‘ljallangan: energetika (issiqlik energetikasi); qozonxonalar kursini o‘rganadigan sanoat korxonalarining energoaudit va energiya nazorati.

\*\*\*

The textbook reflects theoretical information on fuel and calculation of heat exchange in boilers, gives examples of solutions to problems and tasks for independent implementation.

The textbook is intended for students of higher educational institutions studying in the areas of bachelor's training: power engineering (heat power engineering); energy audit and energy control of industrial enterprises studying the course boiler installations.

**УДК 621.181**  
**ББК 31.361**

**Рецензенты:**

**Пирматов Н.Б.** – д.т.н., профессор (ТГТУ);

**Белоусов В.А.** – генеральный директор (ТашТЭЦ)

**ISBN 978–9943–**

© « Fan va texnologiyalar nashriyot-matbaa uyi», 2022.

© Ташкентский государственный технический университет, 2022

© Сотникова И. В.



## ВВЕДЕНИЕ

Существующие в настоящее время учебники и учебные пособия по котельным установкам содержат в основном теоретический и описательный материал и слабо способствуют привитию практических навыков выполнения расчетов. При выполнении курсового расчета тоже, как правило, не ставится задача детально проанализировать влияние различных факторов на результат расчета, проследить степень изменения конструкции в зависимости от особенностей характеристик сжигаемых топлив. Известно, что наиболее глубокое понимание любого явления достигается изучением влияния на него различных факторов путем разбора конкретных примеров. В предлагаемом учебном пособии использован именно этот метод обучения. Примеры и задачи подобраны таким образом, чтобы на конкретных расчетах проследить влияние различных факторов на рассматриваемый показатель.

Материал учебного пособия построен таким образом, что в начале каждого раздела в сжатом виде приводится нормативная методика расчета. Далее следует несколько примеров, конкретно раскрывающих влияние различных факторов на результат или содержащих варианты тепловые и конструктивные расчеты. Кроме усвоения приведенных зависимостей читатель имеет возможность на данных примерах ознакомиться с самой методикой расчета, приобрести навыки самостоятельного расчета. При решении задач принята следующая точность расчета величин: величины, имеющие большие численные значения (энтальпии, температуры газов и рабочей среды, объемы и поверхность стен топки и др.), ограничиваются одним знаком после запятой, удельные объемы – двумя знаками после запятой, величины, имеющие малые значения, – тремя значащими цифрами.

# ГЛАВА 1. ТВЕРДЫЕ, ЖИДКИЕ И ГАЗООБРАЗНЫЕ ТОПЛИВА

## 1.1. Состав топлива

*Твердые и жидкие топлива* состоят из горючих (углерода-С, водорода-Н, летучей серы- $S_l = S_{op} + S_k$ ) и негорючих (азота - N и кислорода - O) элементов и балласта (зола- $A$ , влаги - $W$ ).

*Газообразные топлива* состоят из горючих (СО, Н<sub>2</sub>, СН<sub>4</sub>, С<sub>m</sub>Н<sub>n</sub>) и негорючих (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, СО<sub>2</sub>) газов и небольшого количества водяного пара (Н<sub>2</sub>O).

При изучении характеристик твердых и жидких топлив и их состава различают рабочую, горючую и сухую массу. Состав рабочей, горючей и сухой массы обозначается соответственно индексами «р», «г» и «с» и выражается следующими равенствами:

– горючая масса

$$C^p + H^p + S_l^p + N^p + O^p + A^p + W^p = 100\% , \quad (1.1.)$$

– сухая масса

$$C^g + H^g + S_l^g + N^g + O^g = 100\% , \quad (1.2)$$

– рабочая масса

$$C^c + H^c + S_l^c + N^c + O^c + A^c = 100\% , \quad (1.3)$$

В формулах (1), (2), (3) содержание элементов дано в процентах на 1 кг топлива. Коэффициенты пересчета состава топлива из одной массы в другую приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Коэффициенты для пересчета элементарного состава топлив

Заданная масса топлива	Искомая масса топлива		
	рабочая	сухая	горючая
Рабочая	1	$100/(100 - W^P)$	$100/(100 - W^P - A^P)$
Сухая	$(100 - W^P)/100$	1	$100/(100 - A^C)$
Горючая	$(100 - W^P - A^P)/100$	$(100 - A^C)/100$	1

Для сланцев состава ( $C^P$ ,  $H^P$ ,  $S_l^c$ ,  $N^P$ ,  $O^P$ ,  $A^P$ ,  $W^P$ ) пересчет с рабочей массы на горючую осуществляется с помощью коэффициента:

$$K = 100 / [100 - A_{И}^P - W^P - (CO_2)_к^P] \quad (1.4)$$

где  $A_{И}^P$  – истинная зольность рабочей массы, %;  $W^P$  — влажность рабочей массы, %;  $(CO_2)_к^P$  — содержание углекислоты карбонатов, %.

Истинная зольность рабочей массы определяется по формуле:

$$A_{И}^P = A^P - [2,5(S_l^c - S_c^c) + 0,375S_k^c] \left( \frac{100 - W^P}{100} \right) \quad (1.5)$$

где  $S_l^c$  – содержание серы в лабораторной золе в процентах к массе топлива;  $S_c^c$  – содержание сульфатной серы в топливе, %.

Величина  $[2,5(S_l^c - S_c^c) + 0,375S_k^c]$  для ленинградских и эстонских сланцев может быть принята равной 2,0, для кашпирских — 4,1. Пересчет состава (%) рабочей массы топлива при изменении влажности проводится по формулам:

$$\left. \begin{aligned} C_2^P &= C_1^P \frac{100 - W_2^P}{100 - W_1^P} \\ H_2^P &= H_1^P \frac{100 - W_2^P}{100 - W_1^P} \end{aligned} \right\} , \quad (1.6)$$

где  $W_1^p$  — начальная влажность топлива, %,  $W_2^p$  — конечная влажность топлива, %.

Средний состав (%) смеси двух твердых или жидких топлив, заданных массовыми долями, — первого ( $C_1^p$ , %;  $H_1^p$ , %, ...) и второго ( $C_2^p$ , %;  $H_2^p$ , %.....) — определяется по уравнениям:

$$\left. \begin{aligned} C_{см}^p &= b_1 C_1^p + (1-b_1) C_2^p \\ H_{см}^p &= b_1 H_1^p + (1-b_1) H_2^p \\ \dots\dots\dots \end{aligned} \right\}, \quad (1.7)$$

где массовая доля  $b_1$  одного из топлив в смеси находится по формуле:

$$b_1 = B_1 / (B_1 + B_2), \quad (1.8)$$

Здесь  $B_1$  и  $B_2$  — массы топлив, входящих в смесь, кг.

**Задача 1.1.** Определить состав рабочей массы челябинского угля марки БЗ, если состав его горючей массы:

- $C^r = 71,1\%$ ;
- $H^r = 5,3\%$ ;
- $S_{л}^r = (S_{ор}^r + S_{к}^r) = 1,9\%$ ;
- $N^r = 1,7\%$ ;
- $O^r = 20,0\%$ ;

зольность сухой массы:  $A^c = 36\%$

и влажность рабочая:  $W^p = 18,0\%$

**Решение:** Пользуясь коэффициентами пересчета (табл. 1.1), определяем зольность рабочей массы топлива:

$$A^p = A^c \frac{100 - W^p}{100} = 36 \frac{100 - 18}{100} = 29,5\%$$

и находим состав рабочей массы топлива:

$$C^p = C^r \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = 71 \frac{100 - (29,5 + 18,0)}{100} = 37,3\%$$

$$H^p = H^r \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = 5,3 \frac{100 - (29,5 + 18,0)}{100} = 2,8\%$$

$$S_{л}^p = S_{л}^{\Gamma} \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = 1,9 \frac{100 - (29,5 + 18,0)}{100} = 1,0\%$$

$$N^p = N^{\Gamma} \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = 1,7 \frac{100 - (29,5 + 18,0)}{100} = 0,9\%$$

$$O^p = O^{\Gamma} \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = 20,0 \frac{100 - (29,5 + 18,0)}{100} = 10,5\%$$

Для проверки точности вычислений найдем сумму составляющих элементов рабочей массы топлива:

$$\begin{aligned} C^p + H^p + S_{л}^p + N^p + O^p + A^p + W^p &= \\ &= 37,3 + 2,8 + 1,0 + 0,9 + 10,5 + 29,5 + 18,0 = 100\% \end{aligned}$$

**Задача 1.2.** Определить состав горючей массы кизеловского угля марки Г, если состав его рабочей массы:  $C^p = 48,5\%$ ;  $H^p = 3,6\%$ ;  $S_{л}^p = 6,1\%$ ;  $N^p = 0,8\%$ ;  $O^p = 4,0\%$ ; зольность сухой массы  $A^p = 33,0\%$  и влажность рабочая  $W^p = 6,0\%$ .

*Ответ:*  $C^{\Gamma} = 77\%$ ;  $H^{\Gamma} = 5,7\%$ ;  $S_{л}^{\Gamma} = 9,7\%$ ;  $N^{\Gamma} = 1,3\%$ ;  $O^{\Gamma} = 6,3\%$ .

**Задача 1.3.** Определить состав рабочей массы кузнецкого угля марки Д, если состав его горючей массы:  $C^{\Gamma} = 78,5\%$ ;  $H^{\Gamma} = 5,6\%$ ;  $S_{л}^{\Gamma} = 0,4\%$ ;  $N^{\Gamma} = 2,5\%$ ;  $O^{\Gamma} = 13,0\%$ ; зольность сухой массы  $A^c = 15,0\%$  и влажность рабочая  $W^p = 12,0\%$ .

*Ответ:*  $A^p = 13,2\%$ ;  $C^p = 58,7\%$ ;  $H^p = 4,2\%$ ;  $S_{л}^p = 0,3\%$ ;  $N^p = 1,9\%$ ;  $O^p = 9,7\%$ .

**Задача 1.4.** Определить состав рабочей массы ленинградских сланцев, если состав их горючей массы  $C^{\Gamma} = 74,0\%$ ;  $H^{\Gamma} = 9,5\%$ ;  $S_{л}^{\Gamma} = 6,1\%$ ;  $N^{\Gamma} = 0,4\%$ ;  $O = 10,0\%$ ;  $A^p = 46,0\%$ ;  $W^p = 11,5\%$  и  $(CO_2)_к^p = 16,4\%$ .

**Решение:** Истинную зольность рабочей массы топлива определяем по формуле (5):

$$A_u^p = A^p - [2,5(S_n^c - S_c^c) + 0,375S_k^c] \left( \frac{100 - W^p}{100} \right) =$$

$$= A^p - 2 \frac{100 - W^p}{100} = 46 - 2 \frac{100 - 11,5}{100} = 44,2\%$$

По формуле (4) находим коэффициент пересчета состава топлива с горючей массы на рабочую:

$$K = 100 / [100 - A_u^p - W^p - (CO_2)_k^p] = \frac{100 - 44,2 - 11,5 - 16,4}{100} = 0,279$$

Тогда:

$$C^p = C^r K = 74,0 * 0,279 = 20,6\%$$

$$H^p = H^r K = 9,5 * 0,279 = 2,7\%$$

$$S_n^p = S_n^r K = 6,1 * 0,279 = 1,7\%$$

$$N^p = N^r K = 0,4 * 0,279 = 0,1\%$$

$$O^p = O^r K = 10,0 * 0,279 = 2,8\%$$

Проверим точность вычислений:

$$C^p + H^p + S_n^p + N^p + O^p + A_u^p + W^p + (CO_2)_k^p =$$

$$= 20,6 + 2,7 + 1,7 + 0,1 + 2,8 = 100\%$$

**Задача 1.5.** Определить состав горючей массы эстонских сланцев, если состав их рабочей массы:  $C^p=24,1\%$ ;  $H^p=3,1\%$ ;  $S_n^p=1,6\%$ ;  $N^p=0,1\%$ ;  $O^p=3,7\%$ ;  $A_u^p=40,0\%$ ;  $W^p=13,0\%$  и  $(CO_2)_k^p=14,4\%$ .

*Ответ:*  $C^r = 74,0\%$ ;  $H^r = 9,5\%$ ;  $S^r = 4,9\%$ ;  $N^r = 0,3\%$ ;  $O^r = 11,3\%$ .

**Задача 1.6.** В мельнице-вентиляторе подсушивается подмосковный уголь марки Б2 состава:  $C^{p_1} = 28,7\%$ ;  $H^{p_1} = 2,2\%$ ;  $(S_n^p)_1 = 2,7\%$ ;  $N^{p_1} = 0,6\%$ ;  $O^{p_1} = 8,6\%$ ;  $A^{p_1} = 25,2\%$ ;  $W^{p_1} = 32\%$ . Определить состав рабочей массы подсушенного топлива, если известно, что влажность топлива после подсушки  $W^{p_2} = 15\%$ .



Ответ:  $C^P_2 = 35,9\%$ ;  $H^P_2 = 2,7\%$ ;  $(S^P_{л})_2 = 3,4\%$ ;  $N^P_2 = 0,7\%$ ;  $O^P_2 = 8\%$ ;  $A^P_2 = 31,5\%$ .

**Задача 1.7.** В топке котла сжигается смесь, состоящая из  $3 \cdot 10^3$  кг донецкого угля марки Д состава:  $C^P_1 = 49,3\%$ ;  $H^P_1 = 3,6\%$ ;  $(S^P_{л})_1 = 3,0\%$ ;  $N^P_1 = 1,0\%$ ;  $O^P_1 = 8,3\%$ ;  $A^P_1 = 21,8\%$ ;  $W^P_1 = 13,0\%$  и  $4,5 \cdot 10^3$  кг донецкого угля марки Г состава:  $C^P_2 = 55,2\%$ ;  $H^P_2 = 3,8\%$ ;  $(S^P_{л})_2 = 3,2\%$ ;  $N^P_2 = 1,0\%$ ;

$O^P_2 = 5,8\%$ ;  $A^P_2 = 23,0\%$ ;  $W^P_2 = 8,0\%$ . Определить состав рабочей смеси.

**Решение:** Массовую долю одного из топлив в смеси определяем по формуле (8):

$$B_1 = B_1 / (B_1 + B_2) = 3000 / (3000 + 4500) = 0,4.$$

Состав рабочей смеси находим, пользуясь уравнениями (7):

$$C^P_{см} = b_1 C^P_1 + (1 - b_1) C^P_2 = 0,4 * 49,3 + 0,6 * 5,2 = 52,8\%$$

$$H^P_{см} = b_1 H^P_1 + (1 - b_1) H^P_2 = 0,4 * 3,6 + 0,6 * 3,8 = 3,7\%$$

$$(S^P_{л})_{см} = b_1 (S^P_{л})_1 + (1 - b_1) (S^P_{л})_2 = 0,4 * 3,0 + 0,6 * 3,2 = 3,1\%$$

$$N^P_{см} = b_1 N^P_1 + (1 - b_1) N^P_2 = 0,4 * 1,0 + 0,6 * 1,0 = 1,0\%$$

$$O^P_{см} = b_1 O^P_1 + (1 - b_1) O^P_2 = 0,4 * 8,3 + 0,6 * 5,8 = 6,8\%$$

$$A^P_{см} = b_1 A^P_1 + (1 - b_1) A^P_2 = 0,4 * 21,8 + 0,6 * 23 = 22,6\%$$

$$W^P_{см} = b_1 W^P_1 + (1 - b_1) W^P_2 = 0,4 * 13,0 + 0,6 * 8,0 = 10,0\%$$

Проверим точность вычислений:

$$\begin{aligned} C^P_{см} + H^P_{см} + (S^P_{л})_{см} + N^P_{см} + O^P_{см} + A^P_{см} + W^P_{см} = \\ = 52,8\% + 3,7\% + 3,1\% + 1,0\% + 6,8\% + 22,6\% + 10,0\% = 100\% \end{aligned}$$

**Задача 1.8.** В топке котла сжигается смесь, состоящая из 800 кг кузнецкого угля марки Д состава:  $C^P_1 = 58,7\%$ ;  $H^P_1 = 4,2\%$ ;  $(S^P_{л})_1 = 0,3\%$ ;  $N^P_1 = 1,9\%$ ;  $O^P_1 = 9,7\%$ ;  $A^P_1 = 13,2\%$ ;  $W^P_1 = 12,0\%$  и 1200 кг кузнецкого угля марки Г состава:  $C^P_2 = 66,0\%$ ;  $H^P_2 = 4,7\%$ ;  $(S^P_{л})_2 = 0,5\%$ ;  $N^P_2 = 1,8\%$ ;  $O^P_2 = 7,5\%$ ;  $A^P_2 = 11,0\%$ ;  $W^P_2 = 8,5\%$ . Определить состав рабочей смеси.

Ответ:  $C_{CM}^P=63,1\%$ ;  $H_{CM}^P=4,5\%$ ;  $(S_l^P)_{CM}=0,4\%$ ;  $N_{CM}^P=1,8\%$ ;  
 $O_{CM}^P=8,4\%$ ;  $A_{CM}^P=11,9\%$ ;  $W_{CM}^P=9,9\%$ .

## 1. 2. Характеристики топлива

**Теплотой сгорания топлива** называют количество теплоты в кДж, выделяемой при полном сгорании 1кг твердого (жидкого) или 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива.

Для твердого и жидкого топлива различают теплоту сгорания *высшую*  $Q_v$  (кДж/кг) и *низшую*  $Q_H$  (кДж/кг).

Величины высшей и низшей теплоты сгорания рабочей, горючей и сухой массы твердого (жидкого) топлива связаны с выражениями (1.9), (1.10), (1.11):

$$Q_v^P = Q_H^P + 225H^P + 25W^P, \quad (1.9)$$

$$Q_v^G = Q_H^G + 225H^P, \quad (1.10)$$

$$Q_v^C = Q_H^C + 225H^P, \quad (1.11)$$

Тепловые расчеты котлов выполняют, пользуясь низшей теплотой сгорания рабочей массы топлива:

низшая теплота сгорания (кДж/кг) рабочей массы твердого и жидкого топлива:

$$Q_H^P = 338C^P + 1025H^P - 108,5 (O^P - S_l^P) - 25W^P, \quad (1.12)$$

где  $C^P, H^P, O^P, S_l^P, W^P$  – содержание элементов в рабочей массе топлива, %;

низшая теплота сгорания (кДж/м<sup>3</sup>) газообразного топлива:

$$Q_H^C = 108H_2 + 126CO + 234H_2S + 358CH_4 + 591C_2H_4 + 638C_2H_6 + \\ + 860C_3H_6 + 913C_3H_8 + 1135C_4H_8 + 1187C_4H_{10} + \\ + 1461C_5H_{12} + 1403C_6H_6 \quad (1.13)$$

где H<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> и т. д. – объемное содержание газов, входящих в состав газообразного топлива, %.

При пересчете низшей теплоты сгорания пользуются следующими формулами:

с горючей массы на рабочую и обратно

$$Q_n^p = Q_n^r \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} - 25W^p, \quad (1.14)$$

$$Q_n^r = \frac{Q_n^p + 25W^p}{100 - (A^p + W^p)} 100, \quad (1.15)$$

с сухой массы на рабочую и обратно

$$Q_n^p = Q_n^c \frac{100 - W^p}{100} - 25W^p, \quad (1.16)$$

$$Q_n^c = \frac{Q_n^p + 25W^p}{100 - W^p}, \quad (1.17)$$

для горючих сланцев-с горючей массы на рабочую и обратно

$$Q_n^p = Q_n^r \frac{100 - A_u^p - W^p - (CO_2)_k^p}{100} - 25W^p - 40(CO_2)_k^p, \quad (1.18)$$

$$Q_n^r = \frac{Q_n^p + 25W^p + 40(CO_2)_k^p}{100 - A_u^p - W^p - (CO_2)_k^p} 100, \quad (1.19)$$

при изменении влажности

$$Q_{u2}^p = \frac{(Q_{u1}^p + 25W^p)(100 - W^p)}{100 - W^p} - 25W^p, \quad (1.20)$$

Для смеси двух твердых, жидких или газообразных топлив низшая теплота сгорания определяется по формуле:

$$Q_{исм}^p = b_1 Q_{n1}^p + (1 - b_1) Q_{n2}^p, \quad (1.21)$$

где  $b_1$ -массовая доля одного из топлив в смеси;

$Q_{n1}^p$ -низшая теплота сгорания первого вида топлива в смеси, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>);

$Q_{n2}^p$ -низшая теплота сгорания второго вида топлива, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>).

Для сравнения тепловой ценности различных видов топлива пользуются понятием условного топлива.

**Условным топливом** называют такое топливо, теплота сгорания которого равна 29300 кДж/кг.

Пересчет расхода натурального топлива на условное осуществляется по формуле:

$$B_y = B \mathcal{E}, \quad (1.22)$$

где  $B_y$  и  $B$  – соответственно расход условного и натурального топлива, кг, кг/с;  $\mathcal{E}$  – тепловой эквивалент топлива, определяемый по формуле:

$$\mathcal{E} = Q_n^p / 29\,300, \quad (1.23)$$

**Зольность, влажность и сернистость топлива.** При рассмотрении условий работы котлов на различных видах топлива пользуются приведенными величинами зольности  $A_{np}$ , влажности  $W_{np}$  сернистости  $S_{np}$  топлива:

приведенная зольность топлива, кг\*%/МДж,

$$A_{np} = A^p / Q_n^p, \quad (1.24)$$

приведенная влажность топлива, кг\*%/МДж,

$$W_{np} = W^p / Q_n^p, \quad (1.25)$$

приведенная сернистость топлива, кг\*%/МДж,

$$S_{np} = S^p / Q_n^p, \quad (1.26)$$

**Задача 1.9.** Определить низшую и высшую теплоту сгорания рабочей массы челябинского угля марки БЗ состава:  $C^p = 37,3\%$ ;  $H^p = 2,8\%$ ;  $S_l^p = 1,0\%$ ;  $N^p = 0,9\%$ ;  $O^p = 10,5\%$ ;  $A^p = 29,5\%$  и  $W^p = 18,0\%$ .

*Ответ:*  $Q_n^p = 13\,997$  кДж/кг;  $Q_v^p = 15\,077$  кДж/кг.

**Задача 1.10.** Определить низшую и высшую теплоту сгорания рабочей массы кузнецкого угля марки Д, если состав его горючей массы:  $C^r = 78,5\%$ ;  $H^r = 5,6\%$ ;  $S^r = 0,4\%$ ;  $N^r = 2,5\%$ ;  $O^r = 13,0\%$ . Зольность сухой массы  $A^c = 15\%$  и влажность рабочая  $W^p = 12,0\%$ .

**Решение:** Пользуясь коэффициентами пересчета (табл. 1.1), определяем зольность рабочей массы топлива:

$$A^p = A^c \frac{100 - W^p}{100} = 15 \frac{100 - 12,0}{100} = 13,2\%$$

и состав рабочей массы:

$$C^p = C^{\Gamma} \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = 78,5 \frac{100 - (13,2 + 12,0)}{100} = 58,7\%$$

$$H^p = H^{\Gamma} \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = 5,6 \frac{100 - (13,2 + 12,0)}{100} = 4,2\%$$

$$S_l^p = S_l^{\Gamma} \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = 0,4 \frac{100 - (13,2 + 12,0)}{100} = 0,3\%$$

$$N^p = N^{\Gamma} \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = 2,5 \frac{100 - (13,2 + 12,0)}{100} = 1,9\%$$

$$O^p = O^{\Gamma} \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = 13,0 \frac{100 - (13,2 + 12,0)}{100} = 9,7\%$$

Низшая теплота сгорания рабочей массы топлива, по формуле(1.12):

$$Q_n^p = 338C^p + 1025H^p - 108,5(O^p - S_n^p) - 25W^p =$$

$$= 338 \cdot 58,8 + 1025 \cdot 4,2 - 108,5(9,7 - 0,3) - 25 \cdot 12 = 22825 \text{ кДж / кг}$$

Высшая теплота сгорания, по формуле (1.9):

$$Q_b^p = Q_n^p + 225H^p + 25W^p =$$

$$= 22825 + 225 \cdot 4,2 + 25 \cdot 12,0 = 24070 \text{ кДж / кг}$$

**Задача 1.11.** Определить низшую теплоту сгорания рабочей и сухой массы донецкого угля марки Г, если известны его низшая теплота сгорания горючей массы  $Q_n^{\Gamma} = 33170$  кДж/кг, зольность сухой массы  $A^c = 25,0\%$  и влажность рабочая  $W^p = 8,0\%$ .

*Ответ:*  $Q_n^p = 22024$  кДж/кг;  $Q_n^c = 24157$  кДж/кг.

**Задача 1.12.** Определить низшую теплоту сгорания горючей и сухой массы кузнецкого угля марки Т, если известны его

низшая теплота сгорания рабочей массы  $Q_n^p = 26\,180$  кДж/кг, зольность сухой массы  $A^c = 18,0\%$  и влажность рабочая  $W^p = 6,5\%$ .

*Ответ.*  $Q_n^g = 34\,345$  кДж/кг;  $Q_n^c = 28\,174$  кДж/кг.

**Задача 1.13.** Определить высшую теплоту сгорания горючей и сухой массы кизеловского угля марки Г, если известны следующие величины:  $Q_n^p = 19\,680$  кДж/кг;  $H^p = 3,6\%$ ;  $A^p = 31,0\%$ ;  $W^p = 6,0\%$ .

*Ответ:*  $Q_n^c = 21\,961$  кДж/кг;  $Q_n^g = 32\,635$  кДж/кг.

**Задача 1.14.** Определить низшую и высшую теплоту сгорания рабочей массы ленинградских сланцев, если известны следующие величины:  $Q_n^g = 36\,848$  кДж/кг;  $H^p = 2,7\%$ ;  $A^p = 46,0\%$ ;  $W^p = 11,5\%$  и  $(CO_2)_k^p = 16,4\%$ .

*Ответ:*  $Q_n^p = 9337$  кДж/кг;  $Q_n^g = 10\,232$  кДж/кг.

**Задача 1.15.** Определить низшую и высшую теплоту сгорания горючей массы высокосернистого мазута, если известны следующие величины:  $Q_n^p = 38\,772$  кДж/кг;  $H^p = 10,4\%$ ;  $A^p = 0,1\%$ ;  $W^p = 3,0\%$ .

**Решение:** Содержание водорода в горючей массе определяем, пользуясь коэффициентом пересчета (табл. 1.1):

$$H^g = \frac{100}{100 - (A^p + W^p)} = 10,4 \frac{100}{100 - (0,1 + 3,0)} = 10,7\%$$

Низшая теплота сгорания горючей массы топлива, по формуле

$$(1.15): Q_n^g = \frac{Q_n^p + 25W^p}{100 - (A^p + W^p)} 100 = \frac{38772 + 25 * 3,0}{100 - (0,1 + 3,0)} 100 = 40090 \text{ кДж / кг}$$

Высшая теплота сгорания, по формуле (1.10):

$$Q_n^g = Q_n^g + 225H^p = 40090 + 225 * 10,7 = 42497 \text{ кДж / кг}$$

**Задача 1.16.** Определить низшую теплоту сгорания сухого природного газа Саратовского месторождения состава:

$CO_2 = 0,8\%$ ;  $CH_4 = 84,5\%$ ;  $C_2H_6 = 3,8\%$ ;  $C_3H_8 = 1,9\%$ ;  $C_4H_{10} = 0,9\%$ ;  $C_5H_{12} = 0,3\%$ ;  $N_2 = 7,8\%$ .

Ответ:  $Q_n^c = 35\,799$  кДж/м<sup>3</sup>.

**Задача 1.17.** Определить низшую теплоту сгорания рабочей массы челябинского угля марки БЗ состава:  $C^p = 37,3\%$ ;  $H^p = 2,8\%$ ;  $S_l^p = 1,0\%$ ;  $N^p = 0,9\%$ ;  $O^p = 10,5\%$ ;  $A^p = 29,5\%$ ;  $W^p = 18\%$ , - при увеличении его влажности до  $W^p = 20\%$ .

Ответ:  $Q_n^p = 13\,542$  кДж/кг.

**Задача 1.18.** В топке котла сжигается смесь, состоящая из  $3 \cdot 10^3$  кг кузнецкого угля марки Д и  $7 \cdot 10^3$  кг кузнецкого угля марки Т. Определить низшую теплоту сгорания смеси, если известно, что низшая теплота сгорания угля марки Д составляет  $Q_{н1}^p = 22\,825$  кДж/кг, а угля марки Т  $Q_{н2}^p = 26\,180$  кДж/кг.

Ответ:  $Q_n^p = 25\,174$  кДж/кг.

**Задача 1.19.** Определить высшую теплоту сгорания рабочей массы, приведенную влажность, приведенную зольность, приведенную сернистость и тепловой эквивалент подмосковного угля марки Б2 состава:  $C^p = 28,7\%$ ;  $H^p = 2,2\%$ ;  $S_l^p = 2,7\%$ ;  $N^p = 0,6\%$ ;  $O^p = 8,6\%$ ;  $A^p = 25,2\%$ ;  $W^p = 32\%$ .

**Решение:** Низшая теплота сгорания рабочей массы топлива, по формуле (1.12):

$$Q_n^p = 338C^p + 1025H^p - 108,5(O^p - S_l^p) - 25W^p = 338 \cdot 28,7 + 1025 \cdot 2,2 - 108,5(8,6 - 2,7) - 25 \cdot 32 = 10\,516 \text{ кДж/кг}$$

Высшая теплота сгорания рабочей массы топлива, по формуле (1.9),

$$Q_v^p = Q_n^p + 225H^p + 25W^p = 10\,516 + 225 \cdot 2,2 + 25 \cdot 32 = 11\,811 \text{ кДж/кг}$$

Приведенная влажность топлива, по формуле (1.25),

$$W_{np} = W^p / Q_n^p = 32 / 10\,516 = 3,04 \text{ кг} \cdot \% / \text{Мдж}$$

Приведенная зольность топлива, по формуле (1.24),

$$A_{np} = A^p / Q_n^p = 25,2 / 10\,516 = 2,39 \text{ кг} \cdot \% / \text{Мдж}$$

Приведенная сернистость топлива, по формуле (1.26),

$$S_{np} = S^p / Q_n^p = 2,7 / 10516 = 0,257 \text{ кг} * \% / \text{МДж}$$

Тепловой эквивалент топлива, по формуле (1.23),

$$\mathcal{E} = Q_n^p / 29300 = 10516 / 29300 = 0,36$$

**Задача 1.20.** Определить высшую теплоту сгорания рабочей массы, приведенную влажность, приведенную зольность, приведенную сернистость и тепловой эквивалент донецкого угля марки А, если известны следующие величины:  $Q_n^p = 22\,625$  кДж/кг;  $H^p = 1,2\%$ ;  $S_l^p = 1,7\%$ ;  $A^p = 22,9\%$ ;  $W^p = 8,5\%$ .

*Ответ:*  $Q_v^p = 23\,107,5$  кДж/кг;  $W_{np} = 0,375$  кг\*%/МДж;

$A_{np} = 1,01$  кг \*%/МДж;  $S_{np} = 0,075$  кг\* %/МДж;  $\mathcal{E} = 0,77$ .

**Задача 1.21.** Определить приведенную влажность, приведенную зольность и приведенную сернистость донецкого угля марки Т состава:  $C^p = 62,7\%$ ;  $H^p = 3,1\%$ ;  $S_l^p = 2,8\%$ ;  $N^p = 0,9\%$ ;  $O^p = 1,7\%$ ;  $A^p = 23,8\%$ ;  $W^p = 5\%$

*Ответ.*  $W_{np} = 0,203$  кг\*%/МДж;  $A_{np} = 0,966$  кг\*%/МДж;

$S_{np} = 0,114$  кг\*%/МДж.

**Задача 1.22.** Определить приведенную влажность, приведенную зольность и тепловой эквивалент челябинского угля марки БЗ, если известен состав его горючей массы:  $C^r = 71,1\%$ ;  $H^r = 5,3\%$ ;  $S^r = 1,9\%$ ;  $N^r = 1,7\%$ ;  $O^r = 20,0\%$ ; зольность сухой массы  $A^c = 36\%$  и влажность рабочая  $W^p = 18\%$ .

*Ответ:*  $W_{np} = 1,286$  кг\*%/МДж;  $A_{np} = 2,107$  кг\*%/МДж;

$\mathcal{E} = 0,48$ .

**Задача 1.23.** На складе котельной имеется  $60 * 10^3$  кг ангренского угля марки Б2, состав которого по горючей массе:  $C^r = 76,0\%$ ;  $H^r = 3,8\%$ ;  $S_l^r = 2,5\%$ ;  $N^r = 0,4\%$ ;  $O^r = 17,3\%$ ; зольность сухой массы  $A^c = 20,0\%$  и влажность рабочая  $W^p = 34,5\%$ . Определить запас угля на складе в кг условного топлива.

*Ответ:*  $B_y = 28\,315$  кг.



**Задача 1.24.** Для котельной, в которой установлены котлы с различными топками, подвезено  $50 \cdot 10^3$  кг донецкого угля марки Т состава:  $C^p = 62,7\%$ ;  $H^p = 3,1\%$ ;  $S_{\text{л}}^p = 2,8\%$ ;  $N^p = 0,9\%$ ;  $O^p = 1,7\%$ ;  $A^p = 23,8\%$ ;  $W^p = 5,0\%$ , и  $60 \cdot 10^3$  кг донецкого угля марки А состава:  $C^p = 63,8\%$ ;  $H^p = 1,2\%$ ;  $S_{\text{л}}^p = 1,7\%$ ;  $N^p = 0,6\%$ ;  $O^p = 1,3\%$ ;  $A^p = 22,9\%$ ;  $W^p = 8,5\%$ . Определить время работы топок, если известно, что топки, работающие на угле марки Т, расходуют  $2 \cdot 10^3$  кг/ч условного топлива, а топки, работающие на угле марки А, -  $2,3 \cdot 10^3$  кг/ч условного топлива.

**Решение:** Низшая теплота сгорания рабочей массы донецкого угля марки Т, по формуле (1.12):

$$Q_{\text{н1}}^p = 338C^p + 1025H^p - 108,5 (O^p - S_{\text{л}}^p) - 25W^p =$$

$$= 338 \cdot 62,7 + 1025 \cdot 3,1 - 108,5(1,7 - 2,8) - 25 \cdot 5,0 = 24365 \text{ кДж / кг}$$

Масса условного топлива, соответствующая  $50 \cdot 10^3$  кг донецкого угля марки Т, по формуле (1.22);

$$B_{\text{y1}} = B_1 \mathcal{E} = B_1 Q_{\text{н1}}^p / 29300 = 50 \cdot 10^3 \cdot 24365 / 29300 = 41,6 \cdot 10^3 \text{ кг}$$

Определяем время работы топок на донецком угле марки Т:

$$\tau_1 = B_{\text{y1}} / (2 \cdot 10^3) = 41,6 \cdot 10^3 / (2 \cdot 10^3) = 20,8 \text{ ч}$$

Низшая теплота сгорания рабочей массы донецкого угля марки А, по формуле (1.12):

$$Q_{\text{н}}^p = 338C^p + 1025H^p - 108,5 (O^p - S_{\text{л}}^p) - 25W^p = 338 \cdot 63,8 +$$

$$+ 1025 \cdot 1,2 - 108,5 (1,3 - 1,7) - 25 \cdot 8,5 = 22625 \text{ кДж / кг}$$

Масса условного топлива, соответствующая  $60 \cdot 10^3$  кг донецкого угля марки А, по формуле (1.22),

$$B_{\text{y2}} = B_2 Q_{\text{н2}}^p / 29300 = 60 \cdot 10^3 \cdot 22625 / 29300 = 46,3 \cdot 10^3 \text{ кг}$$

Находим время работы топок на донецком угле марки А:

$$\tau_2 = B_{\text{y2}} / (2,3 \cdot 10^3) = 46,3 \cdot 10^3 / (2,3 \cdot 10^3) = 20,1 \text{ ч}$$

**Задача 1.25.** Две котельные установки одинаковой производительности работают на различных видах топлива. Первая из

них сжигает  $10 \cdot 10^3$  кг/ч кузнецкого угля марки Т состава:  $C^p = 68,6\%$ ;  $H^p = 3,1\%$ ;  $S_n^p = 0,4\%$ ;  $N^p = 1,5\%$ ;  $O^p = 3,1\%$ ;  $A^p = 16,8\%$ ;  $W^p = 6,5\%$ . Вторая расходует  $6 \cdot 10^3$  кг/ч кузнецкого угля марки Д состава:  $C^p = 58,7\%$ ;  $H^p = 4,2\%$ ;  $S_n^p = 0,3\%$ ;  $N^p = 1,9\%$ ;  $O^p = 9,7\%$ ;  $A^p = 13,2\%$ ;  $W^p = 12,0\%$ . Определить, какому количеству условного топлива эквивалентен часовой расход топлива в установках.

*Ответ:*  $B_{y1} = 9000$  кг/ч;  $B_{y2} = 4674$  кг/ч.

**Задача 1.26.** В котельной за 10 ч сжигается  $10^6$  кг донецкого угля марки Г состава:  $C^p = 55,2\%$ ;  $H^p = 3,8\%$ ;  $S_n^p = 3,2\%$ ;  $N^p = 1,0\%$ ;  $O^p = 5,8\%$ ;  $A^p = 23,0\%$ ;  $W^p = 8,0\%$ . Определить часовую потребность котельной в условном топливе.

*Ответ:*  $B_y = 75\,170$  кг/ч.

### 1.3. Объем воздуха. Объем и масса Продуктов сгорания

Объем воздуха, объем, и масса продуктов сгорания определяются на 1 кг твердого, жидкого или на  $1 \text{ м}^3$  сухого газообразного топлива при нормальных условиях.

#### Объем воздуха, необходимый для сгорания топлива.

Теоретический (при коэффициенте избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1$ ) объем сухого воздуха ( $\text{м}^3/\text{кг}$ ), необходимый для полного сгорания 1 кг твердого или жидкого топлива, определяется по формуле:

$$V^0 = 0,089C^p + 0,226H^p + 0,033(S_n^p - O^p), \quad (1.27)$$

Теоретический объем воздуха ( $\text{м}^3/\text{м}^3$ ), необходимый для полного сгорания  $1 \text{ м}^3$  сухого газообразного топлива, определяется по формуле

$$V^0 = 0,0478[0,5(CO + H_2) + 1,5H_2S + 2CH_4 + \Sigma(m + n/4)C_mH_n - O_2] \quad , \quad (1.28)$$

В формуле (27) содержание элементов топлива выражается в процентах на 1 кг массы топлива, а в формуле (28) содержание горючих газов CO, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub> и т. д. — в процентах по объему.

Для сгорания смеси двух твердых, жидких или газообразных топлив теоретический объем сухого воздуха определяется по формуле:

$$V_{см}^0 = b_1 V_1^0 + (1 - b_1) V_2^0, \quad (1.29)$$

где  $b_1$  — массовая доля одного из топлив в смеси.

Действительный объем воздуха (м<sup>3</sup>/кг, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>), поступивший в топку, определяется по формуле:

$$V_D = \alpha_T V^0, \quad (1.30)$$

где  $\alpha_T$  — коэффициент избытка воздуха в топке.

**Состав и объем продуктов сгорания топлива.** При полном сгорании топлива продукты сгорания содержат газы: CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> и пары воды H<sub>2</sub>O, т. е.:

$$CO_2 + SO_2 + N_2 + O_2 + H_2O = 100\%$$

Полный объем продуктов сгорания  $V_2$  (м<sup>3</sup>/кг) представляет собой сумму объемов сухих газов  $V_{сг}$  и водяных паров  $V_{H_2O}$ :

$$V_2 = V_{сг} + V_{H_2O},$$

при этом:

$$V_{с.г} = V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{O_2}$$

Где:  $V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2}$  — объем трехатомных газов, м<sup>3</sup>/кг;

$V_{N_2} + V_{O_2}$  — объем двухатомных газов, м<sup>3</sup>/кг.

Для твердых (кроме сланцев) и жидких топлив теоретические объемы (м /кг) продуктов полного сгорания при 1 определяются по формулам:

объем двухатомных газов

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + 0,8N^p / 100, \quad (1.32)$$

объем трехатомных газов

$$V_{RO_2} = 0,0187(C^p + 0,375S_n^p), \quad (1.33)$$

объем сухих газов

$$V_{CF}^0 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 = 0,0187(C^p + 0,375S_l^p) + 0,79V^0 + 0,8N^p / 100, \quad (1.34)$$

объем водяных паров

$$V_{H_2O}^0 = 0,0124(9H^p + W^p) + 0,0161V^0, \quad (1.35)$$

полный объем продуктов сгорания

$$V_G^0 = V_{CF}^0 + V_{H_2O}^0 = 0,0187(C^p + 0,375S_l^p) + 0,79V^0 + 0,8N^p / 100 + \\ + 0,0124(9H^p + W^p) + 0,0161V^0 \quad (1.36)$$

Для сланцев объем трехатомных газов определяется по формуле

$$V_{RO_{2k}} = V_{RO_2} + [0,509(CO_2)_k^p / 100]K = \\ = 0,0187(C^p + 0,375S_l^p) + [0,509(CO_2)_k^p / 100]K \quad (1.37)$$

где  $K$ -коэффициент разложения карбонатов: при слоевом сжигании  $K=0,7$ , при камерном  $K=1,0$ .

Для газообразного топлива теоретические объемы продуктов сгорания ( $m^3/m^3$ ) при  $\alpha_T = 1$  определяются по формулам:

объем двухатомных газов

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + N_2 / 100, \quad (1.38)$$

объем трехатомных газов

$$V_{RO_2} = 0,01[CO_2 + CO + H_2S + \sum_m C_m H_n], \quad (1.39)$$

объем сухих газов

$$V_{CF}^0 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0, \quad (1.40)$$

объем водяных паров

$$V_{H_2O}^0 = 0,01[H_2S + H_2 + \sum(n/2)C_m H_n + 0,124d_T] + 0,0161V^0 \quad (1.41)$$

где  $d_T$  – влагосодержание газообразного топлива, отнесенное к  $1 m^3$  сухого газа,  $г/м^3$ ;

полный объем продуктов сгорания

$$V_{\Gamma}^0 = V_{C\Gamma}^0 + V_{H_2O}^0, \quad (1.42)$$

Для твердых (кроме сланцев), жидких и газообразных топлив объемы продуктов полного сгорания ( $\text{м}^3/\text{кг}$ ) при  $\alpha_T > 1$  определяются по формулам:

объем сухих газов

$$V_{C\Gamma} = V_{C\Gamma}^0 + (\alpha - 1)V^0 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + (\alpha - 1)V^0, \quad (1.43)$$

объем водяных паров

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha - 1)V^0, \quad (1.44)$$

полный объем продуктов сгорания определяется по формуле (31).

Для сланцев полный объем продуктов сгорания ( $\text{м}^3/\text{кг}$ ) при  $\alpha_T > 1$ :

$$V_{\Gamma.K} = V_{RO_2K} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O} = V_{RO_2K} + V_{N_2}^0 + 0,0124(9H^p + W^p) + 0,0161_{\alpha_T} V^0, \quad (1.45)$$

Содержание (%)  $CO_2$ ,  $SO_2$  и  $RO_2$  в сухих газах при полном сгорании топлива определяется по формулам:

$$CO_2 = (V_{CO_2} / V_{C\Gamma}) 100, \quad (1.46)$$

$$SO_2 = (V_{SO_2} / V_{C\Gamma}) 100, \quad (1.47)$$

$$RO_2 = (V_{RO_2} / V_{C\Gamma}) 100 \quad (1.48)$$

Максимальное содержание (%) трехатомных газов  $RO_2^{max}$  в сухих газах при полном сгорании топлива:

$$RO_2^{max} = 21 / (1 + \beta), \quad (1.49)$$

где  $\beta$  — характеристика топлива: для твердого и жидкого

$$\beta = 2,35 (H^p - 0,126O^p + 0,04N^p) / (C^p + 0,375S_{II}^p); \quad (1.50)$$

для газообразного

$$\beta = 0,21 \frac{0,01N_2 + 0,79V^0}{V_{RO_2}} - 0,79, \quad (1.51)$$

Содержание (%) азота  $N_2$  и кислорода  $O_2$  в сухих газах при полном сгорании топлива

$$N_2 = 100 - RO_2 - O_2, \quad (1.52)$$

$$O_2 = 21 - \beta RO_2 - RO_2, \quad (1.53)$$

**Масса продуктов сгорания:**

для твердого (кроме сланцев) и жидкого топлива (кг/кг)

$$M_z = 0,01A^p + 1,306 \alpha_T V^0, \quad (1.54)$$

для газообразного топлива (кг/м<sup>3</sup>)

$$M_{Г.T} = p_{Г.T}^c + 0,001d_{Г.T} + 1,306\alpha_T V^0, \quad (1.55)$$

где  $p_{Г.T}^c$  — плотность сухого газа, кг/м<sup>3</sup>;  $d_{Г.T}$  — содержание влаги в топливе, кг/м<sup>3</sup>;

для сланцев (кг/кг):

$$M_{Г.К} = 1 - 0,01A_k^p + 1,306\alpha_T V^0 + 0,01(CO_2)_k^p K, \quad (1.56)$$

где  $A_k^p$  — расчетное содержание золы в топливе с учетом неразложившихся карбонатов, %;

$K$  — коэффициент разложения карбонатов: при слоевом сжигании  $K=0,7$ , при камерном —  $1,0$ .

Расчетное содержание (%) золы в топливе с учетом неразложившихся карбонатов

$$A_k^p = A^p + (1 - K)(CO_2)_k^p, \quad (1.57)$$

Для твердых топлив концентрация золы в продуктах сгорания определяется по формуле

$$\mu_{зл} = A^p a_{ун} / (100M_{Г.T}), \quad (1.58)$$

Где  $a_{ун}$  — доля золы топлива, уносимой продуктами сгорания.

**Коэффициент избытка воздуха в топке.** При полном сгорании топлива коэффициент избытка воздуха в топке определяется по формуле

$$\alpha_T = 21 / (21 - 79 \frac{O_2}{N_2}), \quad (1.59)$$

где  $O_2$  и  $N_2$  — содержание кислорода и азота в газах, %.

**Задача 1.27.** Определить объем продуктов полного сгорания на выходе из топки, а также теоретический и действительный объемы воздуха, необходимые для сгорания 1 м<sup>3</sup> природного газа Ставропольского месторождения состава:  $CO_2 = 0,2\%$ ;

$\text{CH}_4 = 98,2\%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6 = 0,4\%$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8 = 0,1\%$ ;  $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,1\%$ ;  $\text{N}_2 = 1,0\%$ .

Коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,2$ .

**Решение:** Теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания 1 м<sup>3</sup> топлива, определяем по формуле (1.28):

$$V^0 = 0,0478[0,5(\text{CO} + \text{H}_2) + 1,5\text{H}_2\text{S} + \\ + 2\text{CH}_4 + \Sigma(m + n/4)C_m\text{H}_n - \text{O}_2] = \\ = 0,0478(2*98,2 + 3,5*0,4 + 5*0,1 + 6,5*0,1) = 9,51\text{м}^3 / \text{м}^3$$

Действительный объем воздуха по формуле (1.30):

$$V_D = \alpha_T V^0 = 1,2*9,51 = 11,41\text{м}^3 / \text{м}^3$$

Объем сухих газов при  $\alpha_T = 1,2$ , по формуле (1.43):

$$V_{\text{с.г}} = V^0_{\text{с.г}} + (\alpha - 1)V^0 = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 + (\alpha - 1)V^0 = \\ 0,01(0,2 + 98,2 + 2*0,4 + 3*0,1 + 4*0,1) + 0,79*9,51 + \\ + 1,0/100 + (1,2-1)9,51 = 10,42\text{м}^3 / \text{м}^3$$

Объем водяных паров при  $V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 1,2$ , по формуле (1.44):

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + 0,0161(\alpha - 1)V^0 = 0,01(2*98,2 + 3*0,4 + \\ + 4*0,1 + 5*0,1) + 0,0161*1,2*9,51 = 2,17\text{м}^3 / \text{м}^3$$

**Задача 1.28.** Определить на выходе из топки объем продуктов полного сгорания 1 кг карагандинского угля марки К состава:  $\text{C}^P = 54,7\%$ ;  $\text{H}^P = 3,3\%$ ;  $\text{s}_{\text{H}}^P = 0,8\%$ ;  $\text{N}^P = 0,8\%$ ;  $\text{O}^P = 4,8\%$ ;  $\text{A}^P = 27,6\%$ ;  $\text{W}^P = 8,0\%$ . Коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,3$ .

**Решение:** Теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания 1 кг топлива, определяем по формуле (1.27):

$$V^0 = 0,089\text{C}^P + 0,226\text{H}^P + 0,033(\text{S}_{\text{H}}^P - \text{O}^P) = \\ = 0,089*54,7 + 0,266*3,3 + 0,033(0,8 - 4,8) = 5,61\text{м}^3 / \text{кг}$$

Объем сухих газов при  $\alpha_T = 1,3$ , по формуле (1.43),

$$V_{\text{с.г}} = V^0_{\text{с.г}} + (\alpha - 1)V^0 = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 + (\alpha - 1)V^0 = \\ = 0,0187(54,7 + 0,375*0,8) + 0,79*5,61 + 0,8*0,8/100(1,3-1)5,61 = 7,15\text{м}^3 / \text{кг}$$

Объем водяных паров при  $\alpha_T = 1,3$ , по формуле (1.44),

$$\begin{aligned} V_{H_2O} &= 0,0124(9H^p + W^p) + 0,0161\alpha_T V^0 = \\ &= 0,0124*(9*3,3 + 8) + 0,0161*1,3*5,61 = 0,58 \text{ м}^3 / \text{кг} \end{aligned}$$

Объем продуктов полного сгорания, по формуле (1.31),

$$V_c = V_{c_2} + V_{H_2O} = 7,15 + 0,58 = 7,73 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

**Задача 1.29.** Определить теоретический и действительный объемы воздуха, необходимые для слоевого сжигания 1000 кг донецкого угля марки Г состава:  $C^p = 55,2\%$ ;  $H^p = 3,8\%$ ;  $S_{\text{п}}^p = 3,2\%$ ;  $N^p = 1,0\%$ ;  $O^p = 5,8\%$ ;  $A^p = 23,0\%$ ;  $W^p = 8,0\%$ . Коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,3$ .

*Ответ:*  $V^0 = 5830 \text{ м}^3$ ;  $V_{\text{д}} = 7579 \text{ м}^3$ .

**Задача 1.30.** Определить объем воздуха, необходимый для сжигания 800 кг/ч ленгерского угля марки БЗ состава:  $C^p = 45,0\%$ ;  $H^p = 2,6\%$ ;  $S_{\text{п}}^p = 1,7\%$ ;  $N^p = 0,4\%$ ;  $O^p = 9,9\%$ ;  $A^p = 11,4\%$ ;  $W^p = 29,0\%$ , и 500 кг/ч Экибастузского угля марки СС состава:  $C^p = 43,4\%$ ;  $H^p = 2,9\%$ ;  $S_{\text{п}}^p = 0,8\%$ ;  $N^p = 0,8\%$ ;  $O^p = 7,0\%$ ;  $A^p = 38,1\%$ ;  $W^p = 7,0\%$ , при коэффициентах избытка воздуха в топочной камере соответственно  $\alpha_T = 1,4$  и  $1,3$ .

*Ответ:*  $V_{\text{д}} = 7823 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

**Задача 1.31.** Определить теоретический и действительный объемы воздуха, необходимые для сжигания 2000 м<sup>3</sup>/ч природного газа Ставропольского месторождения состава:  $\text{CO}_2 = 0,5\%$ ;  $\text{CH}_4 = 92,8\%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6 = 2,8\%$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8 = 0,9\%$ ;  $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,4\%$ ;  $\text{C}_5\text{H}_{12} = 0,1\%$ ;  $\text{N}_2 = 2,5\%$ ; и 1000 м<sup>3</sup>/ч природного газа Ленинградского месторождения состава:  $\text{CO}_2 = 0,1\%$ ;  $\text{CH}_4 = 89,7\%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6 = 5,2\%$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8 = 1,7\%$ ;  $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,5\%$ ;  $\text{C}_5\text{H}_{12} = 0,1\%$ ;  $\text{N}_2 = 2,7\%$ , при коэффициентах избытка воздуха в топочной камере соответственно  $\alpha_T = 1,15$  и  $1,1$ .

*Ответ:*  $V^0 = 29\,360 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $V_{\text{д}} = 33\,264 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

**Задача 1.32.** Определить теоретический и действительный объемы воздуха, необходимые для слоевого сжигания 2000 кг



кузнецкого угля марки Д, если известен состав его горючей массы:  $C^r = 78,5\%$ ;  $H^r = 5,6\%$ ;  $S_{п}^r = 0,4\%$ ;  $N^r = 2,5\%$ ;  $O^r = 13,0\%$ , зольность сухой массы  $A^c = 15,0\%$  и влажность рабочая

$W^p = 12,0\%$ . Коэффициент избытка воздуха в топочной камере  $\alpha_T = 1,3$ .

*Ответ:*  $V^0 = 12\,040\text{ м}^3$ ;  $V_{д} = 15\,652\text{ м}^3$ .

**Задача 1.33.** Определить теоретический объем воздуха, необходимый для слоевого сжигания 1500 кг ленинградских сланцев, если известен состав их горючей массы:  $C^r = 74,0\%$ ;  $H^r = 9,5\%$ ;  $S_{п}^r = 6,1\%$ ;  $N^r = 0,4\%$ ;  $O^r = 10,0\%$ ;  $A^p = 46,0\%$ ;  $W^p = 11,5\%$  и  $(CO_2)_k^p = 16,4\%$ .

*Ответ:*  $V^0 = 3765\text{ м}^3$ .

**Задача 1.34.** В топке котла сжигается смесь, состоящая из  $2 \cdot 10^3$  кг кузнецкого угля марки Д состава:  $C^{p_1} = 58,7\%$ ;  $H^{p_1} = 4,2\%$ ;  $(S_{п}^p)_1 = 0,3\%$ ;  $N^{p_1} = 1,9\%$ ;  $O^{p_1} = 9,7\%$ ;  $A_1^p = 13,2\%$ ;  $W_1^p = 12,0\%$ , и  $3 \cdot 10^3$  кг кузнецкого угля марки Г состава:  $C^{p_2} = 66,0\%$ ;  $H^{p_2} = 4,7\%$ ;  $(S_{п}^p)_2 = 0,5\%$ ;  $N^{p_2} = 1,8\%$ ;  $O^{p_2} = 7,5\%$ ;  $A_2^p = 11,0\%$ ;  $W_2^p = 8,5\%$ . Определить теоретический объем сухого воздуха, необходимый для сгорания смеси.

*Ответ:*  $V_{см}^0 = 32\,700\text{ м}^3$ .

**Задача 1.35.** В топке котла сжигается воркутинский уголь марки Ж состава:  $C^p = 59,6\%$ ;  $H^p = 3,8\%$ ;  $s_p = 0,8\%$ ;  $N^p = 1,3\%$ ;  $O^p = 5,4\%$ ;  $A^p = 23,6\%$ ;  $W^p = 5,5\%$ . Определить объем сухих газов при полном сгорании топлива. Коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,3$ .

*Ответ:*  $V_{с.г} = 7,84\text{ м}^3/\text{кг}$ .

**Задача 1.36.** Определить объем водяных паров при полном сгорании в слое 10 кг/ч фрезерного торфа состава:  $C^p = 24,7\%$ ;  $H^p = 2,6\%$ ;  $S_{п}^p = 0,1\%$ ;  $N^p = 1,1\%$ ;  $O^p = 15,2\%$ ;  $A^p = 6,3\%$ ;  $W^p = 50,0\%$  при коэффициентах избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,35$  и  $1,4$ .

Ответ:  $V_{H_2O} = 963 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $V_{H_2O} = 965 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

**Задача 1.37.** В топке котла сжигается  $600 \text{ м}^3$  природного газа Угерского месторождения состава:  $\text{CO}_2 = 0,2\%$ ;  $\text{CH}_4 = 98,5\%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6 = 0,2\%$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8 = 0,1\%$ ;  $\text{N}_2 = 1,0\%$ . Определить объем продуктов сгорания при коэффициенте избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,15$ .

Ответ:  $V_T = 7210 \text{ м}^3$

**Задача 1.38.** Определить объем сухих газов, получаемых при полном сгорании в слое  $800 \text{ кг}$  кузнецкого угля марки Д, если известен состав его горючей массы:  $\text{C}^\Gamma = 78,5\%$ ;  $\text{H}^\Gamma = 5,6\%$ ;  $\text{S}^\Gamma = 0,4\%$ ;  $\text{N}^\Gamma = 2,5\%$ ;  $\text{O}^\Gamma = 13,0\%$ ; зольность сухой массы  $A^C = 15,0\%$  и влажность рабочая  $W^p = 12,0\%$ . Коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,3$ .

Ответ:  $V_{C.\Gamma} = 6141 \text{ м}^3$ .

**Задача 1.39.** Определить объем двух- и трехатомных газов и содержание  $\text{CO}_2$  и  $\text{SO}_2$  в сухих газах, получаемых при полном сгорании  $1 \text{ кг}$  донецкого угля марки Т состава:  $\text{C}^p = 62,7\%$ ;  $\text{H}^p = 3,1\%$ ;  $\text{S}_l^p = 2,8\%$ ;  $\text{N}^p = 0,9\%$ ;  $\text{O}^p = 1,7\%$ ;  $A^p = 23,8\%$ ;  $W^p = 5,0\%$ , если известно, что дымовые газы при полном сгорании содержат  $RO_2^{\text{max}} = 18,8\%$ .

**Решение:** Объем трехатомных газов определяем по формуле (1.33):

$$V_{RO_2} = 0,0187(C^p + 0,375S_l^p) = 0,0187*(62,7 + 0,375*2,8) = 1,19 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

Объем сухих газов находим по формуле (1.48):

$$V_{C.\Gamma} = (V_{RO_2} / RO_2^{\text{max}})100 = \frac{1,19}{18,8}100 = 6,33 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

Объем двухатомных газов:

$$V_{R_2} = V_{C.\Gamma} - V_{RO_2} = 6,33 - 1,19 = 5,14 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

Содержание  $\text{CO}_2$  в сухих газах определяем по формуле (1.46):

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_{с.г}} 100 = \frac{0,0187C^p}{V_{с.г}} 100 =$$

$$= \frac{0,0187 * 62,7}{6,33} 100 = 18,5\%$$

Содержание SO<sub>2</sub> в сухих газах определяем по формуле (1.47):

$$SO_2 = \frac{V_{SO_2}}{V_{с.г}} 100 = \frac{0,0187 * 0,375S_l^p}{V_{с.г}} 100 =$$

$$= \frac{0,0187 * 0,375 * 2,8}{6,33} 100 = 0,31\%$$

**Задача 1.40.** Определить объем трехатомных газов и содержание в них CO<sub>2</sub> и SO<sub>2</sub>, получаемых при полном сгорании 1 кг ткибульского угля марки Г состава: C<sup>p</sup> = 45,4%; H<sup>p</sup> = 3,5%; S<sub>л</sub><sup>p</sup> = 1,3%; N<sup>p</sup> = 0,9%; O<sup>p</sup> = 8,9%; A<sup>p</sup> = 27,0%; W<sup>p</sup> = 13,0%, если известно, что дымовые газы содержат RO<sub>2</sub><sup>max</sup> = 18,7%.

*Ответ:* V<sub>RO2</sub> = 0,86 м<sup>3</sup>/кг; CO<sub>2</sub> = 18,5%; SO<sub>2</sub> = 0,2%.

**Задача 1.41.** Определить объем сухих дымовых газов, получаемых при сжигании 1000 кг фрезерного торфа состава: C<sup>p</sup> = 24,7%; H<sup>p</sup> = 2,6%; S<sub>л</sub><sup>p</sup> = 0,1%; N<sup>p</sup> = 1,1%; O<sup>p</sup> = 15,2%; A<sup>p</sup> = 6,3%; W<sup>p</sup> = 50,0%, если известно, что дымовые газы при полном сгорании топлива содержат RO<sub>2</sub> = 15,0%. Коэффициент избытка воздуха в топке α<sub>T</sub> = 1,3.

*Ответ:* V<sub>с.г</sub> = 3066 м<sup>3</sup>.

**Задача 1.42.** В топке котла сжигается 5 \* 10<sup>3</sup> кг/ч донецкого угля марки Г состава: C<sup>p</sup> = 55,2%; H<sup>p</sup> = 3,8%; S<sub>л</sub><sup>p</sup> = 3,2%; N<sup>p</sup> = 1,0%; O<sup>p</sup> = 5,8%; A<sup>p</sup> = 23,0%; W<sup>p</sup> = 8,0%. Определить, на сколько был увеличен объем подаваемого в топку воздуха, если известно, что при полном сгорании топлива содержание RO<sub>2</sub> в дымовых газах снизилось с 16 до 14%.

*Ответ:* V<sub>B</sub> = 5949 м<sup>3</sup>/ч.

**Задача 1.43.** В топке котла сжигается  $2 \cdot 10^3$  кг/ч мало-сернистого мазута состава:  $C^p = 84,65\%$ ;  $H^p = 11,7\%$ ;  $S_{\text{л}}^p = 0,3\%$ ;  $O^p = 0,3\%$ ;  $A^p = 0,05\%$ ;  $W^p = 3,0\%$ . Определить, на сколько был увеличен объем подаваемого в топку воздуха, если известно, что при полном сгорании топлива содержание  $RO_2$  в дымовых газах снизилось с 15 до 12%.

*Ответ:*  $V_B = 6666 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

**Задача 1.44.** В топке котла во время испытаний сожжено  $3 \cdot 10^3$  кг/ч кузнецкого угля марки Д состава:  $C^p = 58,7\%$ ;  $H^p = 4,2\%$ ;  $S_{\text{л}}^p = 0,3\%$ ;  $N^p = 1,9\%$ ;  $O^p = 9,7\%$ ;  $A^p = 13,2\%$ ;  $W^p = 12,0\%$ . В течение первой половины испытаний в продуктах полного сгорания топлива получено  $RO_2 = 18\%$ , а в течение второй половины испытаний  $RO_2$  уменьшилось до 15%. Определить, какой объем воздуха добавлен в топку между первой и второй половинами испытаний.

*Ответ:*  $V_B = 4650 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

**Задача 1.45.** Определить объем продуктов сгорания, получаемых при полном сгорании 1 кг ленинградских сланцев состава:  $C^p = 20,6\%$ ;  $H^p = 2,7\%$ ;  $S_{\text{л}}^p = 1,7\%$ ;  $N^p = 0,1\%$ ;  $O^p = 2,8\%$ ;  $A^p = 46,0\%$ ;  $W^p = 11,5\%$ ;  $(CO_2)_k^p = 16,4\%$ . Коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,3$ .

*Ответ:*  $V_r = 2,96 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

**Задача 1.46.** Определить объем продуктов сгорания, получаемых при полном сгорании  $2 \cdot 10^3$  кг/ч карагандинского угля марки К состава:  $C^p = 54,7\%$ ;  $H^p = 3,3\%$ ;  $S_{\text{л}}^p = 0,8\%$ ;  $N^p = 0,8\%$ ;  $O^p = 4,8\%$ ;  $A^p = 27,6\%$ ;  $W^p = 8,0\%$ , если известно, что дымовые газы содержат  $RO_2 = 18\%$ .

*Ответ:*  $V_r = 12\,560 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

**Задача 1.47.** Определить максимальное содержание трехатомных газов в продуктах полного сгорания 1 кг донецкого угля марки А состава:  $C^p = 63,8\%$ ;  $H^p = 1,2\%$ ;  $S_{\text{л}}^p = 1,7\%$ ;  $N^p = 0,6\%$ ;  $O^p = 1,3\%$ ;  $A^p = 22,9\%$ ;  $W^p = 8,5\%$ .

*Ответ:*  $RO_2^{\text{max}} = 20,2\%$ .

**Задача 1.48.** В топке котла сжигается смесь из  $2 \cdot 10^3$  кг/ч донецкого угля марки Д состава:  $C^P_1 = 49,3\%$ ;  $H^P_1 = 3,6\%$ ;  $(S^P_n)_1 = 3,0\%$ ;  $N^P_1 = 1,0\%$ ;  $O^P_1 = 8,3\%$ ;  $A^P_1 = 21,8\%$ ;  $W^P_1 = 13,0\%$ , и  $3 \cdot 10^3$  кг/ч донецкого угля марки Г состава:  $C^P_2 = 55,2\%$ ;  $H^P_2 = 3,8\%$ ;  $(S^P_n)_2 = 3,2\%$ ;  $N^P_2 = 1,0\%$ ;  $O^P_2 = 5,8\%$ ;  $A^P_2 = 23\%$ ;  $W^P_2 = 8\%$ . Определить объем газов, получаемых при полном сгорании смеси, если коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,3$ .

*Ответ:*  $V_T = 31\,480$  м<sup>3</sup>/ч.

**Задача 1.49.** Определить объем газов, получаемых при полном сгорании  $1000$  м<sup>3</sup>/ч природного газа Радченковского месторождения состава:  $CO_2 = 0,1\%$ ;  $CH_4 = 85,8\%$ ;  $C_2H_6 = 0,2\%$ ;  $C_3H_8 = 0,1\%$ ;  $C_4H_{10} = 0,1\%$ ;  $N_2 = 13,7\%$ . Коэффициент избытка воздуха в топочной камере  $\alpha_T = 1,1$ .

*Ответ:*  $V_T = 10\,230$  м<sup>3</sup>/ч.

**Задача 1.50.** В топке котла сжигается  $1$  кг артемовского угля марки БЗ состава:  $C^P = 35,7\%$ ;  $H^P = 2,9\%$ ;  $S^P_n = 0,3\%$ ;  $N^P = 0,7\%$ ;  $O^P = 12,1\%$ ;  $A^P = 24,3\%$ ;  $W^P = 24,0\%$ . Определить объем продуктов сгорания и содержание в них кислорода  $O_2$ , если  $RO_2 = 18\%$ .

*Ответ:*  $V_T = 4,16$  м<sup>3</sup>/кг;  $O_2 = 1,3\%$ .

**Задача 1.51.** В топке котла сжигается  $1$  кг анадырского угля марки БЗ состава:  $C^P = 50,1\%$ ;  $H^P = 4,0\%$ ;  $S^P_n = 0,1\%$ ;  $N^P = 0,7\%$ ;  $O^P = 12,2\%$ ;  $A^P = 11,9\%$ ;  $W^P = 21,0\%$ . Определить коэффициент избытка воздуха при полном сгорании топлива, если  $RO_2 = 16\%$ .

*Ответ:*  $\alpha_T = 1,2$ .

**Задача 1.52.** В топке котла сжигается донецкий уголь марки Т состава:  $C^P = 62,7\%$ ;  $H^P = 3,4\%$ ;  $S^P_n = 2,8\%$ ;  $N^P = 0,9\%$ ;  $O^P = 1,7\%$ ;  $A^P = 23,8\%$ ;  $W^P = 5,0\%$ . Определить содержание азота  $N_2$  в продуктах сгорания и коэффициент избытка воздуха при полном сгорании топлива, если  $RO_2 = 15,0\%$ .

*Ответ:*  $V_{N_2} = 5,09$  м<sup>3</sup>/кг;  $\alpha_T = 1,26$ .

**Задача 1.53.** Определить объем сухих газов и коэффициент избытка воздуха при полном сгорании природного газа Саратовского месторождения состава:  $CO_2 = 1,2\%$ ;  $CH_4 = 91,9\%$ ;  $C_2H_6$

= 2,1%; C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> = 1,3%; C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> = 0,4%; C<sub>5</sub>H<sub>12</sub> = 0,1%; N<sub>2</sub> = 3,0%, если известно, что продукты сгорания содержат RO<sub>2</sub>=16,0% и O<sub>2</sub>=4,0%.

*Ответ:*  $V_{C.G} = 6,44 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ;  $\alpha_T = 1,23$ .

**Задача 1.54.** В топке котла сжигается 1 кг райчихинского угля марки Б1 состава: C<sup>P</sup> = 30,4%; H<sup>P</sup> = 1,7%; S<sub>л</sub><sup>P</sup> = 0,3%; N<sup>P</sup> = 0,5%; O<sup>P</sup> = 12,2%; A<sup>P</sup> = 1,9%; W<sup>P</sup> = 47,0%. Определить содержание кислорода O<sub>2</sub> в продуктах сгорания и коэффициент избытка воздуха при полном сгорании топлива, если RO<sub>2</sub>=16,0%.

*Ответ:* O<sub>2</sub> = 4,8%;  $\alpha_T = 1,3$ .

**Задача 1.55.** Определить массу продуктов сгорания и концентрацию золы в продуктах сгорания, получаемых при полном сгорании 1 кг ленинградских сланцев состава: C<sup>P</sup> = 20,6%; H<sup>P</sup> = 2,7%; S<sub>л</sub><sup>P</sup> = 1,7%; N<sup>P</sup> = 0,1%; O<sup>P</sup> = 2,8%; A<sup>P</sup> = 46,0%; W<sup>P</sup> = 11,5%; (CO<sub>2</sub>)<sub>к</sub><sup>P</sup> = 16,4%, если известно, что доля золы топлива, уносимой продуктами сгорания,  $\alpha_{ун} = 0,95$ . Коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,3$ .

**Решение:** Расчетное содержание золы в топливе с учетом неразложившихся карбонатов определяем по формуле (1.57):

$$A_k^P = A^P + (1 - K)(CO_2)_k^P = 46,0 + (1 - 0,7)16,4 = 50,9\%$$

Теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания 1 кг топлива, находим по формуле (1.27):

$$\begin{aligned} V^0 &= 0,089C^P + 0,226H^P + 0,033(S_{л}^P - O^P) = \\ &= 0,089 * 20,6 + 0,226 * 2,7 + 0,033(1,7 - 2,8) = 2,52 \text{ м}^3 / \text{кг} \end{aligned}$$

Масса продуктов сгорания, по формуле (1.56),

$$\begin{aligned} M_{Г.К} &= 1 - 0,01A_k^P + 1,306\alpha_T V^0 + 0,01(CO_2)_k^P K = 1 - \\ &- 0,01 * 50,9 + 1,306 * 1,3 * 2,52 + 0,01 * 16,4 * 0,7 = 4,9 \text{ м}^3 / \text{м}^3 \end{aligned}$$

Концентрация золы в продуктах сгорания, по формуле (1.58),

$$\mu_{зл} = A^P a_{ун} / (100M_{Г}) = \frac{46 * 0,95}{4,9 * 100} = 0,0892$$

**Задача 1.56.** Определить массу продуктов сгорания и концентрацию золы в продуктах сгорания, получаемых при полном сгорании 1 кг карагандинского угля марки К состава:  $C^p = 54,7\%$ ;  $H^p = 3,3\%$ ;  $S_l^p = 0,8\%$ ;  $N^p = 0,8\%$ ;  $O^p = 4,8\%$ ;  $A^p = 27,6\%$ ;  $W^p = 8,0\%$ , если известно, что доля золы топлива, уносимой продуктами сгорания,  $a_{yn} = 0,85$ . Коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,3$ .

*Ответ:*  $M_\Gamma = 9,25$  кг/кг;  $\mu_{zl} = 0,0253$ .

**Задача 1.57.** Определить массу продуктов сгорания, получаемых при полном сгорании 1 м<sup>3</sup> природного газа Ставропольского месторождения состава:  $CO_2 = 0,2\%$ ;  $CH_4 = 98,2\%$ ;  $C_2H_6 = 0,4\%$ ;  $C_3H_8 = 0,1\%$ ;  $C_4H_{10} = 0,1\%$ ;  $N_2 = 1,0\%$ , если известно, что плотность сухого газа  $\rho_{\Gamma T}^c = 0,728$  кг/м<sup>3</sup>. Коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,15$ .

*Ответ:*  $M_\Gamma = 15$  кг/м<sup>3</sup>.

#### 1.4. Энтальпия продуктов сгорания и воздуха

**Энтальпия продуктов сгорания** (кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>) 1 кг твердого, жидкого или 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива определяется как сумма энтальпий продуктов сгорания при  $I_\Gamma^0$   $\alpha_T = 1$ , избыточного воздуха  $I_\epsilon^0 (\alpha_T - 1)$  и золы  $I_z$  (если  $A_{np,yn} > 1,43$  кг\*%/МДж), т.е.:

$$I_\Gamma = I_\Gamma^0 + (\alpha_T - 1)I_\epsilon^0 + I_z, \quad (1.60)$$

Энтальпия продуктов сгорания (кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>) при  $\alpha_T = 1$  и температуре газов  $\theta$  °С определяется по формуле:

$$I_\Gamma^0 = V_{RO_2} (c\theta)_{CO_2} + V_{N_2}^0 (c\theta)_{N_2} + V_{H_2O} (c\theta)_{H_2O}, \quad (1.61)$$

где  $V_{RO_2}$ ,  $V_{N_2}^0$ ,  $V_{H_2O}$  – теоретические объемы продуктов сгорания топлива, м<sup>3</sup>/кг (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>);

$(c\theta)_{CO_2}, (c\theta)_{N_2}, (c\theta)_{H_2O}$  – энтальпия углекислоты, азота и водяных паров соответственно, кДж/м<sup>3</sup>.

Энтальпия воздуха (кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>) при  $\alpha_T = 1$  и температуре  $\theta$ , °С определяется по формуле:

$$I_{\text{в}}^0 = V^0 (c\theta)_{\text{в}}, \quad (1.62)$$

где  $V^0$  – теоретический объем воздуха, м<sup>3</sup>/кг(м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>);

$(c\theta)_{\text{в}}$  – энтальпия воздуха, кДж/м<sup>3</sup>.

Энтальпия золы (кДж/кг):

$$I_{\text{з}} = \frac{A^P a_{\text{ун}}}{100} (c\theta)_{\text{з}}, \quad (1.63)$$

где  $a_{\text{ун}}$  – доля золы топлива, уносимой продуктами сгорания;  $(c\theta)_{\text{з}}$  – энтальпия золы, кДж/кг.

Значения энтальпий продуктов полного сгорания топлива, воздуха и золы приведены в табл. 1 (см. Приложение).

**$I\theta$ -диаграмма для продуктов сгорания.**  $I\theta$ -диаграмму строят следующим образом: задают несколько значений температуры горения топлива  $\theta$  и вычисляют для них энтальпии продуктов сгорания. Затем, выбрав масштабы температур и энтальпий в прямоугольной системе координат, по точкам проводят прямую  $I = \int (c\theta)$  (рис. 1.1). По  $I\theta$ -диаграмме находят теоретическую температуру горения топлива в топке котла.

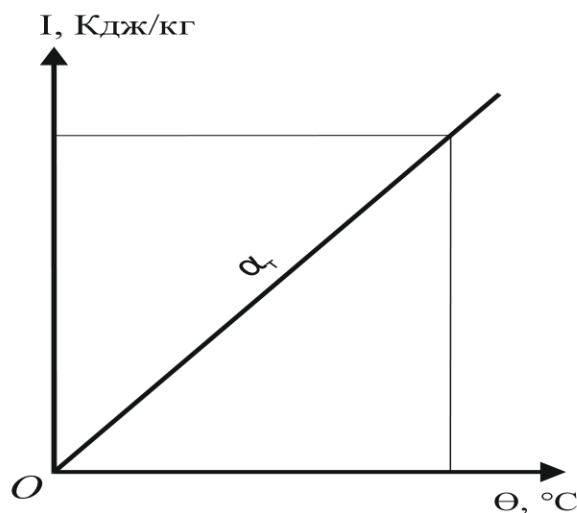


Рис.1.1



**Задача 1.58.** Определить энтальпию продуктов сгорания на выходе из топки, получаемых при полном сгорании 1 кг карагандинского угля марки К состава:  $C^P = 54,7\%$ ;  $H^P = 3,3\%$ ;  $S_l^P = 0,8\%$ ;  $N^P = 0,8\%$ ;  $O^P = 4,8\%$ ;  $A^P = 27,6\%$ ;  $W^P = 8,0\%$ ; если известно, что температура газов на выходе из топки равна  $\theta_r = 1000^\circ\text{C}$ , доля золы топлива, уносимой продуктами сгорания,  $a_{yh} = 0,85$  и приведенная величина уноса золы сжигаемого топлива  $A_{пр.ун} = 4,6 \text{ кг \% / МДж}$ . Коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,3$ .

**Решение:** Теоретически необходимый объем воздуха определяем по формуле (1.27):

$$V^0 = 0,089C^P + 0,266H^P + 0,033(S^P - O^P) = 0,089 \cdot 54,7 + 0,266 \cdot 3,3 + 0,033(0,8 - 4,8) = 5,61 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем трехатомных газов, по формуле (1.33):

$$V_{RO_2} = 0,0187(C^P + 0,375 S_l^P) = 0,0187(54,7 + 0,375 \cdot 0,8) = 1,03 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретический объем азота, по формуле (1.32),

$$V_{N_2} = 0,79V^0 + 0,8N^P/100 = 0,79 \cdot 5,61 + 0,8 \cdot 0,8/100 = 4,43 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретический объем водяных паров, по формуле (1.35),

$$\begin{aligned} V_{H_2O}^0 &= 0,0124(9H^P + W^P) + 0,0161V^0 = \\ &= 0,0124(9 \cdot 3,3 + 8,0) + 0,0161 \cdot 5,61 = 0,56 \text{ м}^3 / \text{м}^3 \end{aligned}$$

Энтальпию продуктов сгорания при  $\alpha_T = 1$  и температуре газов  $\theta_r = 1000^\circ\text{C}$  определяем по формуле (1.61):

$$\begin{aligned} I_r^0 &= V_{RO_2}(c\theta)_{CO_2} + V_{N_2}^0(c\theta)_{N_2} + V_{H_2O}(c\theta)_{H_2O} = \\ &= 1,03 \cdot 2202 + 4,43 \cdot 1394 + 0,56 \cdot 1725 = 9409 \text{ кДж/кг} \end{aligned}$$

Значения  $(c\theta)_{CO_2}$ ,  $(c\theta)_{N_2}$ ,  $(c\theta)_{H_2O}$  при температуре газов

$\theta_r = 1000^\circ\text{C}$  взяты из табл. 1 (см. Приложение).

Энтальпию золы 1 кг угля при  $\theta_r = 1000^\circ\text{C}$  определяем по формуле (1.63):

$$I_3 = \frac{A^P a_{yh}}{100} (c\theta)_3 = \frac{27,6 \cdot 0,85}{100} 984 = 231 \text{ кДж/кг}$$

Значение  $(c\theta)_3$  при температуре газов  $\theta_{\Gamma} = 100^{\circ}\text{C}$  взято из табл. 1 (см. Приложение).

Энтальпию воздуха при  $\alpha_T = 1$  и температуре газов  $\theta_{\Gamma} = 1000^{\circ}\text{C}$  находим по формуле (1.62):

$$I_{\epsilon}^0 = V^0 (c\theta)_{\epsilon} = 5,61 * 1436 = 8056 \text{ кДж/кг}$$

Значение  $(c\theta)_{\epsilon}$  при температуре газов  $\theta_{\Gamma} = 1000^{\circ}\text{C}$  взято из табл. 1 (см. Приложение).

Энтальпию продуктов полного сгорания 1 кг угля при  $\theta_{\Gamma} = 1000^{\circ}\text{C}$  определяем по формуле (1.60):

$$I_{\Gamma} = I_{\Gamma}^0 + (\alpha_T - 1)I_{\epsilon}^0 + I_3 = 9409 + (1,3-1)*8056+231=12057 \text{ кДж/кг}$$

**Задача 1.59.** Определить энтальпию продуктов сгорания на выходе из топки, получаемых при полном сгорании 1 кг донецкого угля марки Т состава:  $C^p = 62,7\%$ ;  $H^p = 3,1\%$ ;  $S_{\text{л}}^p = 2,8\%$ ;  $N^p = 0,9\%$ ;  $O^p = 1,7\%$ ;  $A^p = 23,8\%$ ;  $W^p = 5,0\%$ , если известно, что температура газов на выходе из топки  $\theta_{\Gamma} = 1100^{\circ}\text{C}$ .

*Ответ:*  $I_{\Gamma}^0 = 11\,774 \text{ кДж/кг}$ .

**Задача 1.60.** В топке котла сжигается 1 кг донецкого угля марки А состава:  $C^p = 63,8\%$ ;  $H^p = 1,2\%$ ;  $S_{\text{л}}^p = 1,7\%$ ;  $N^p = 0,6\%$ ;  $O^p = 1,3\%$ ;  $A^p = 22,9\%$ ;  $W^p = 8,5\%$ . Определить энтальпию избыточного воздуха на выходе из топки при полном сгорании угля, если известно, что температура газов на выходе из топки  $\theta_{\Gamma} = 1000^{\circ}\text{C}$ . Коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,3$ .

*Ответ:*  $I_{\epsilon} = 2604 \text{ кДж/кг}$ .

**Задача 1.61.** Определить энтальпию продуктов сгорания на выходе из топки, получаемых при полном сгорании 1 м природного газа Газлинского месторождения состава:  $\text{CO}_2 = 0,4\%$ ;  $\text{CH}_4 = 94,0\%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6 = 2,8\%$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8 = 0,4\%$ ;  $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,3\%$ ;  $\text{C}_5\text{H}_{12} = 0,1\%$ ;  $\text{N}_2 = 2,0\%$ , если известно, что температура газов на выходе из топки  $\theta_{\Gamma} = 1000^{\circ}\text{C}$ . Коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,1$ .

*Ответ:*  $I_{\Gamma} = 18\,034 \text{ кДж/м}^3$ .

**Задача 1.62.** Определить энтальпию избыточного воздуха на выходе из топки при полном сгорании  $1 \text{ м}^3$  природного газа Шебелинского месторождения состава:  $\text{CO}_2 = 0,1\%$ ;  $\text{CH}_4 = 92,8\%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6 = 3,9\%$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8 = 1,0\%$ ;  $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,4\%$ ;  $\text{C}_5\text{H}_{12} = 0,3\%$ ;  $\text{N}_2 = 1,5\%$ , если известно, что температура газов на выходе из топки  $\theta_{\Gamma} = 100^\circ\text{C}$ . Коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,1$ .

*Ответ.*  $I_{\epsilon} = 1431 \text{ кДж/м}^3$ .

**Задача 1.63.** Определить энтальпию продуктов сгорания на выходе из топки, получаемых при полном сгорании  $1 \text{ кг}$  высокосернистого мазута состава:  $\text{C}^p = 83,0\%$ ;  $\text{H}^p = 10,4\%$ ;  $\text{S}_l^p = 2,8\%$ ;  $\text{O}^p = 0,7\%$ ;  $\text{A}^p = 0,1\%$ ;  $\text{W}^p = 3,0\%$ , если известно, что температура газов на выходе из топки  $\theta_{\Gamma} = 1100^\circ\text{C}$ . Коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,15$ .

*Ответ:*  $I_{\Gamma} = 21\,377 \text{ кДж/кг}$ .

**Задача 1.64.** Определить энтальпию избыточного воздуха  $l$  золы на выходе из топки при полном сгорании  $1 \text{ кг}$  донецкого угля марки Г состава:  $\text{C}^p = 55,2\%$ ;  $\text{H}^p = 3,8\%$ ;  $\text{S}_l^p = 3,2\%$ ;  $\text{N}^p = 1,0\%$ ;  $\text{O}^p = 5,8\%$ ;  $\text{A}^p = 23,0\%$ ;  $\text{W}^p = 8,0\%$ , если известно, что температура газов на выходе из топки  $\theta_{\Gamma} = 1100^\circ\text{C}$ , доля золы топлива, уносимой продуктами сгорания,  $\alpha_{\text{ун}} = 0,85$  и приведенная величина уноса золы сжигаемого топлива  $A_{\text{пр.ун}} = 3,72 \text{ кг \% / МДж}$ . Коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,3$ .

*Ответ:*  $I_{\epsilon} = 2790 \text{ кДж/кг}$ ;  $I_3 = 214 \text{ кДж/кг}$ .

**Задача 1.65.** В топке котла сжигается  $1 \text{ кг}$  карагандинского угля марки К состава:  $\text{C}^p = 54,7\%$ ;  $\text{H}^p = 3,3\%$ ;  $\text{S}_l^p = 0,8\%$ ;  $\text{N}^p = 0,8\%$ ;  $\text{O}^p = 4,8\%$ ;  $\text{A}^p = 27,6\%$ ;  $\text{W}^p = 8,0\%$ . Построить  $I\theta$ -диаграмму для продуктов сгорания в интервале температур горения топлива  $600 \dots 2000^\circ\text{C}$ . Коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,3$ .

**Решение:** Теоретически необходимый объем воздуха определяем по формуле (1.27):

$$V^0 = 0,089C^P + 0,266H^P + 0,033 (S_n^P - O^P) = 0,089*54,7 + 0,266*3,3 + 0,033(0,8 - 4,8) = 5,61 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем трехатомных газов находим по формуле (1.33):

$$V_{RO_2} = 0,0187(C^P + 0,375 S_n^P) = 0,0187(54,7 + 0,375*0,8) = 1,03 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретический объем азота определяем по формуле (1.32):

$$V_{N_2}^0 = 0,79 V^0 + 0,8N^P/100 = 0,79*5,61 + 0,8 \cdot 0,8/100 = 4,43 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретический объем водяных паров находим по формуле (1.35):

$$V_{H_2O}^0 = 0,0124(9H^P + W^P) + 0,0161*V^0 = 0,0124(9*3,3 + 8) + 0,0161*5,61 = 0,56 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Энтальпию продуктов сгорания 1 кг угля при  $\theta_{\Gamma} = 600^{\circ}\text{C}$  определяем по формуле (1.60):

$$I_{\Gamma} = I_{\Gamma}^0 + (\alpha_T - 1)I_{\text{в}}^0 V_{RO_2} (c\theta)_{CO_2} + V_{N_2}^0 (c\theta)_{N_2} + V_{H_2O} (c\theta)_{H_2O} + (\alpha_T - 1)V^0 (c\theta)_{\text{в}} = 1,03*1222 + 4,43*804 + 0,56*967 + (1,3 - 1)*5,61*830 = 6759 \text{ кДж/кг}$$

Значения  $(c\theta)_{CO_2}$ ,  $(c\theta)_{N_2}$ ,  $(c\theta)_{H_2O}$  и  $(c\theta)_{\text{в}}$  при температуре  $\theta_{\Gamma} = 600^{\circ}\text{C}$  взяты из табл. 1 (см. Приложение).

При  $\theta_{\Gamma} = 1000^{\circ}\text{C}$

$$I_{\Gamma} = I_{\Gamma}^0 + (\alpha_T - 1)I_{\text{в}}^0 = V_{RO_2} (c\theta)_{CO_2} + V_{N_2}^0 (c\theta)_{N_2} + V_{H_2O} (c\theta)_{H_2O} + (\alpha_T - 1)V^0 (c\theta)_{\text{в}} = 1,03*2202 + 4,43*1394 + 0,56*1725 + (1,3 - 1)*5,61*1436 = 11826 \text{ кДж/кг}$$

Значения  $(c\theta)_{CO_2}$ ,  $(c\theta)_{N_2}$ ,  $(c\theta)_{H_2O}$  и  $(c\theta)_{\text{в}}$  при температуре  $\theta_{\Gamma} = 1000^{\circ}\text{C}$  взяты из табл. 1 (см. Приложение).

При  $\theta_{\Gamma} = 2000^{\circ}\text{C}$

$$I_{\Gamma} = I_{\Gamma}^0 + (\alpha_T - 1)I_{\text{в}}^0 = V_{RO_2} (c\theta)_{CO_2} + V_{N_2}^0 (c\theta)_{N_2} + V_{H_2O} (c\theta)_{H_2O} + (\alpha_T - 1)V^0 (c\theta)_{\text{в}} = 1,03*4843 + 4,43*2964 + 0,56*3926 + (1,3 - 1)*5,61*3064 = 25474 \text{ кДж/кг}$$

По найденным значениям энтальпий продуктов сгорания строим  $i\theta$ -диаграмму (рис. 1.2).

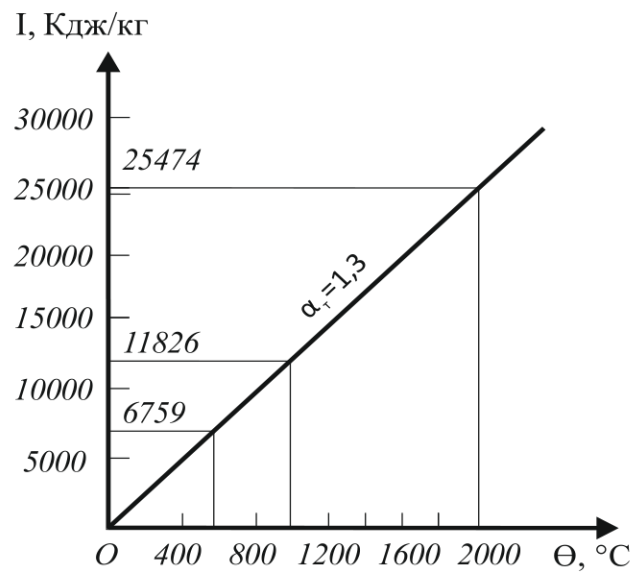


Рис. 1.2.

## Глава 2. КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

### 2.1. Тепловой баланс, коэффициент полезного действия и расход топлива котельного агрегата.

**Тепловой баланс котельного агрегата.** Тепловым балансом называют распределение теплоты, вносимой в котлоагрегат при сжигании топлива, на полезно использованную теплоту и тепловые потери. Тепловой баланс составляется на 1 кг твердого (жидкого) или на 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива применительно к установившемуся тепловому состоянию котельного агрегата.

Уравнение теплового баланса (кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>) имеет вид:

$$Q_p^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \quad (2.1)$$

или в процентах от располагаемой теплоты топлива:

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = 100, \quad (2.2)$$

где:  $q_1 = (Q_1 / Q_p^p) 100$ ;  $q_2 = (Q_2 / Q_p^p) 100$  и т. д.

В уравнениях (2.1) и (2.2):  $Q_p^p$  - располагаемая теплота;

$Q_1 (q_1)$  - теплота, полезно использованная в котлоагрегате на получение пара;

$Q_2 (q_2)$  - потери теплоты с уходящими газами;

$Q_3 (q_3)$  - потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива;

$Q_4 (q_4)$  - потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива;  $Q_5 (q_5)$  - потери теплоты в окружающую среду;

$Q_6 (q_6)$  - потеря теплоты с физической теплотой шлака.

**Располагаемая теплота** (кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>) на 1 кг твердого (жидкого) или на 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива определяется по формулам:

$$\begin{aligned} Q_p^p &= Q_n^p + Q_{мл} + Q_{в.вн} + Q_{ф} - Q_k \\ Q_p^p &= Q_n^c + Q_{мл} + Q_{в.вн} + Q_{ф} \end{aligned}, \quad (2.3)$$

где  $Q_p^p$  и  $Q_n^c$  -низшая теплота сгорания рабочей массы твердого и жидкого топлива и сухой массы газообразного топлива, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>);

$Q_{мл}$  - физическая теплота топлива, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>);

$Q_{в.вн}$  - теплота, вносимая в топку с воздухом, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>);

$Q_{ф}$  - теплота, вносимая в топку с паровым дутьем, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>);

$Q_k$  - теплота, затраченная на разложение карбонатов при сжигании сланцев, кДж/кг. Физическая теплота топлива:

$$Q_{ТЛ} = c_T^p t_T, \quad (2.4)$$

где  $c_T^p$  -теплоемкость рабочей массы топлива, кДж/(кг\*К);

$t_T$  - температура топлива на входе, в топку, °С.

Теплоемкость рабочей массы топлива

$$c_T^p = c_T^c \frac{100 - W^p}{100} + c_{H_2O} \frac{W^p}{100}, \quad (2.5)$$

где  $c_T^c$ ,  $c_{H_2O}$  – соответственно теплоемкость сухой массы твердого топлива и воды, кДж/(кг' К):

$c_T^c$  для антрацита равно 0,921, для каменных углей - 0,962, для бурых углей - 1,088, для фрезерного торфа - 1,297 и сланцев -1,046.

Теплоемкость мазута

$$c_T^p = 1,74 + 0,0025t_T, \quad (2.6)$$

Физическая теплота топлива учитывается в том случае, если оно предварительно подогрето вне котлоагрегата (подогрев мазута, сушка топлива в разомкнутой системе и т. д.). Теплота, вносимая в топку с воздухом:

$$Q_{в.вн} = \alpha_T V^0 c_{pv} \Delta t_v, \quad (2.7)$$

где  $\alpha_T$  – коэффициент избытка воздуха в топке;  $V^0$  – теоретический объем воздуха, необходимый для сгорания 1 кг

топлива, м<sup>3</sup>/кг;  $c_{pв}$  – средняя объемная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, кДж/(м<sup>3</sup>\*К): при температуре воздуха до 300°С  $c_{pв}=1,33$  кДж/(м<sup>3</sup>\*К),  $\Delta t_в$  – разность температур подогретого и холодного воздуха, °С.

Теплота, вносимая в топку с паровым дутьем;

$$Q_{в.вн} = W_{\phi} (i_{\phi} - 2510), \quad (2.8)$$

где  $W_{\phi}$  и  $i_{\phi}$  – соответственно расход и энтальпия пара, идущего на дутье или распыливание топлива, кг/кг и кДж/кг: для дутья  $W_{\phi}=0,7...0,8$  кг/кг; для распыливания паровыми форсунками  $W_{\phi}=0,35$  кг/кг, паромеханическими форсунками  $W_{\phi}=0,03...0,035$  кг/кг.

Теплота, затраченная на разложение карбонатов при сжигании сланцев,

$$Q_{к} = 40,6K(CO_2)_{к}^P$$

где  $K$ — коэффициент разложения карбонатов.

Теплота (кДж/кг), полезно использованная в котлоагрегате:

$$Q_1 = \frac{D_{не}}{B} \left[ (i_{н.н} - i_{н.в}) + \frac{P}{100} (i_{к.в} - i_{н.в}) \right] + D_{н.н} (i_{н.н} - i_{н.в}), \quad (2.9)$$

где  $D_{не}$ ,  $D_{н.н}$  - соответственно расход перегретого и насыщенного пара, кг/с;  $B$  - расход натурального топлива, кг/с;  $i_{н.н}$ ,  $i_{н.в}$ ,  $i_{к.в}$ ,  $i_{н.н}$  - соответственно энтальпия перегретого и насыщенного пара, питательной и котловой воды, кДж/кг;  $P$  - величина непрерывной продувки, %.

**Теплота (кДж/кг), полезно использованная в водогрейных котлах:**

$$Q_1 = \frac{M_{в}}{B} (i_2 - i_1), \quad (2.10)$$

где  $i_2 - i_1$  - соответственно энтальпии воды, поступающей в котел и выходящей из него, кДж/кг;  $M_{в}$  - расход воды, кг/с.

Теплота (%), полезно использованная в котлоагрегате:

$$q_1 = (Q_1 / Q_p^p) 100, \quad (2.11)$$



**Потери теплоты (кДж/кг) с уходящими газами:**

$$\begin{aligned} Q_2 &= (V_{yx} c_{p_{yx}} \theta_{yx} - \alpha_{yx} V^0 c_{p_6} t_6)(100 - q_4) / 100 = \\ &= (I_{yx} - \alpha_{yx} I_{x6}^0)(100 - q_4) / 100 \end{aligned} \quad , \quad (2.12)$$

где  $V_{yx}$  – объем уходящих (дымовых) газов на выходе из последнего газохода котлоагрегата, м<sup>3</sup>/кг;

$c_{p_{yx}}$  - средняя объемная теплоемкость газов при постоянном давлении, определяемая по  $\theta_{yx}$ , кДж/(м<sup>3</sup>·К);

$\theta$  - температура уходящих газов на выходе из последнего газохода, °С;

$\alpha_{yx}$  - коэффициент избытка воздуха за котлоагрегатом;

$V^0$  - теоретический объем воздуха, необходимый для сгорания 1 кг топлива, м<sup>3</sup>/кг;

$t_6$  - температура воздуха и котельной, °С;

$q_4$  - потеря теплоты от механической неполноты сгорания, %;

$I_{yx} I_{x6}^0$  - соответственно энтальпии продукты сгорания и холодного воздуха, кДж/кг.

Потери теплоты (%) с уходящими газами:

$$q_2 = (Q_2 / Q_p^p) 100 = (I_{yx} - \alpha_{yx} I_{x6}^0)(100 - q_4) / Q_p^p, \quad (2.13)$$

**Потери теплоты (кДж/кг) от химической неполноты сгорания топлива определяются содержанием в продуктах горения СО:**

$$Q_3 = 237(C^p + 0,375S_l^p)CO / (RO_2 + CO), \quad (2.14)$$

где  $C^p$  и  $S_l^p$  – содержание углерода и серы в топливе, %;  
 $CO$  — содержание оксида углерода в уходящих газах, %;  
 $RO_2 = CO_2 + SO_2$  – содержание  $CO_2$  и  $SO_2$  в уходящих газах, %.

Потери теплоты (%) от химической неполноты сгорания топлива

$$q_3 = (Q_3 / Q_p^p) / 100, \quad (2.15)$$

**Потери теплоты (кДж/кг) от механической неполноты сгорания** топлива складываются из трех составляющих: потерь теплоты топлива со шлаком  $Q_4^{шл}$  (кДж/кг), потерь теплоты с провалом топлива под колосниковую решетку  $Q_4^{пр}$  (кДж/кг) и потерь теплоты с частичками топлива, уносимыми уходящими газами  $Q_4^{yh}$  (кДж/кг), т. е.

$$Q_4 = Q_4^{шл} + Q_4^{пр} + Q_4^{yh}, \quad (2.16)$$

**Потери теплоты (%) от механической неполноты сгорания топлива:**

$$q_4 = \frac{Q_4}{Q_p^p} 100 = \frac{327 A^p}{Q_p^p} \left( a^{шл} + np \frac{C_{шл} + np}{100 - C_{шл} + np} + a_{yh} \frac{C_{yh}}{100 - C_{yh}} \right), \quad (2.17)$$

где  $A^p$  - содержание золы в топливе, %;

$a_{шл} + a_{np}, a_{yh}$  - доли золы в шлаке, провале и уносе от общего количества золы, введенного в топку с топливом, %;

$C_{шл+np}, C_{yh}$  - содержание горючих в шлаке, провале и уносе, %.

**Потери теплоты (кДж/кг) в окружающую среду** зависят от размеров поверхности котлоагрегата, качества обмуровки и тепловой изоляции.

В расчетах потери теплоты в окружающую среду принимаются по нормативным данным, а при испытаниях котельных агрегатов определяются из уравнения теплового баланса

$$Q_5 = Q_p^p - (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6), \quad (2.18)$$

или в процентах

$$q_5 = 100 - (q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_6) \quad (2.19)$$

**Потери теплоты (кДж/кг) с физической теплотой шлака**

$$Q_6 = a_{шл} c_{шл} t_{шл} A^p / 100, \quad (2.20)$$

где  $a_{шл}$  - доля золы топлива в шлаке;

для камерных топок.  $a_{шл} = 1 - a_{ун}$

Для слоевых топок к  $a_{шл}$  следует прибавить долю золы топлива в провале  $a_{пр}$ .

$C_{шл}$  - теплоемкость шлака, кДж/(кг\*К);

$t_{шл}$  — температура шлака, °С;

$A^P$  - содержание золы в топливе, %.

Потери теплоты (%) с физической теплотой шлака

$$q_6 = (Q_0 / Q_p^p) / 100 = a_{шл} c_{шл} t_{шл} A^p / Q_p^p, \quad (2.21)$$

**Коэффициенты полезного действия котельного агрегата (брутто) и установки (нетто).** Кпд котельного агрегата (брутто) характеризует степень экономичности его работы и представляет собой отношение использованной в котлоагрегате теплоты к располагаемой теплоте топлива, т. е.

$$\eta_{ка}^{бр} = (Q_1 / Q_p^p) / 100, \quad (2.22)$$

или

$$\eta_{ка}^{бр} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6), \quad (2.23)$$

Кпд котельной установки (нетто) равен кпд котлоагрегата за вычетом расхода теплоты на собственные нужды (освещение, привод насосов, вентиляторов и т. д.), т. е.

$$\eta_{е.о}^{i.о} = \eta_{е.а}^{а.о} - \frac{Q_{с.н}}{\hat{A} Q_p^p} 100, \quad (2.24)$$

где  $Q_{с.н}$  – расход теплоты на собственные нужды, кДж/с.

**Расход топлива.** При тепловых расчетах котельных агрегатов различают натуральный расход топлива  $B$  и расчетный  $B_p$ .

Натуральный расход (кг/с) топлива определяется по формуле

$$B = \frac{D_{не} [(i_{н.н} - i_{н.в}) + (p/100)(i_{к.в} - i_{н.в})] + D_{н.н} (i_{н.н} - i_{н.в})}{Q_p^p \eta_{ка}^{бр}} \quad (2.25)$$

где  $\eta_{ка}^{бр}$  – кпд котлоагрегата (брутто), %.

Расчетный расход (кг/с) топлива определяется с учетом механической неполноты сгорания

$$B_p = B(1 - q_4 / 100), \quad (2.26)$$

где  $q_4$  – потери теплоты от механической неполноты сгорания, %.

**Задача 2.1.** В топке котельного агрегата паропроизводительностью  $D=13,4$  кг/с сжигается подмосковный уголь марки Б2 состава:  $C^p = 28,7\%$ ;  $H^p = 2,2\%$ ;  $S_l^p = 2,7\%$ ;  $N^p = 0,6\%$ ;  $O^p = 8,6\%$ ;  $A^p = 25,2\%$ ;  $W^p = 32,0\%$ . Составить тепловой баланс котельного агрегата, если известны температура топлива при входе в топку  $t_T = 20^\circ\text{C}$ , натуральный расход топлива  $B=4$  кг/с, давление перегретого пара  $p_{n.n} = 4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{\text{пп}} = 450^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{\text{пв}} = 150^\circ\text{C}$ , величина непрерывной продувки  $P=4\%$ ; теоретический объем воздуха, необходимый для сгорания 1 кг топлива  $V^\circ = 2,94$  м<sup>3</sup>/кг, объем уходящих газов на выходе из последнего газохода  $V_{\text{yx}} = 4,86$  м<sup>3</sup>/кг, температура уходящих газов на выходе из последнего газохода  $\theta_{\text{yx}} = 160^\circ\text{C}$ , средняя объемная теплоемкость газов при постоянном давлении  $c_{p_{\text{yx}}} = 1,415$  кДж/(м<sup>3</sup> К), коэффициент избытка воздуха за последним газоходом  $\alpha_{\text{yx}} = 1,48$ , температура воздуха в котельной  $t_B = 30^\circ\text{C}$ , средняя объемная теплоемкость воздуха при постоянном давлении  $c_{p_B} = 1,297$  кДж/(м<sup>3</sup>\*К), содержание в уходящих газах оксида углерода CO = 0,2% и трехатомных газов RO<sub>2</sub>=16,6% и потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4 = 4\%$ . Потерями теплоты с физической теплотой шлака пренебречь.

**Решение:** Низшую теплоту сгорания рабочей массы топлива определяем по формуле (1.12):

$$Q_n^p = 338C^p + 1025H^p - 108,5 (O^p - S_l^p) - 25W^p = \\ = 338*28,7 + 1025*2,2 - 108,5(8,6 - 2,7) - 25*32 = 10\,516 \text{ кДж/кг}$$

Теплоемкость рабочей массы топлива, по формуле (2.5):

$$c_T^p = c_T^c \frac{100 - W^p}{100} + c_{H_2O} \frac{W^p}{100} =$$

$$= 1,088(100-32)/100 + 4,19 \cdot 32/100 = 2,08 \text{ кДж/(кг*К)}$$

Физическая теплота топлива по формуле (2.4):

$$Q_{ТЛ} = c_T^p t_T = 2,08 \cdot 20 = 41,6 \text{ кДж/кг}$$

Располагаемая теплота, по формуле (2.3):

$$Q_p^p = Q_p^p + Q_{ТЛ} = 10516 + 41,6 = 10557,6 \text{ кДж/кг}$$

Теплота, полезно использованная в котлоагрегате, по формуле (2.9):

$$Q_1 = \frac{D_{ne}}{B} \left[ (i_{n,n} - i_{n,в}) + \frac{P}{100} (i_{к,в} - i_{n,в}) \right] + D_{n,n} (i_{n,n} - i_{n,в}) =$$

$$= (13,4/4) [(3330 - 632) + (4/100)(1087,5 - 632)] = 9099 \text{ кДж/кг}$$

$D_{ne} = D$ , так как отсутствует отбор насыщенного пара.

Энтальпию пара  $t_{n,n}$  находим по  $i$ -диаграмме:  $i_{nn} = 3330$  кДж/кг; энтальпию питательной и котловой воды находим по табл. 2, 3 (см. Приложение):  $i_{ув} = i' = 632$  кДж/кг;  $i_{кв} = i' = 1087,5$  кДж/кг.

Потери теплоты с уходящими газами находим по (2.12):

$$Q_2 = (V_{yx} c_{pyx} \theta_{yx} - \alpha_{yx} V^0 c_{p6} t_6) (100 - q_4) / 100 =$$

$$= (I_{yx} - \alpha_{yx} I_{x6}^0) (100 - q_4) / 100 =$$

$$= (4,86 \cdot 1,415 \cdot 160 - 1,48 \cdot 2,94 \cdot 1,297 \cdot 30) (100 - 4) / 100 = 898 \text{ кДж/кг}$$

Потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива, по формуле (2.14):

$$Q_3 = 237(C^p + 0,375S_n^p)CO / (RO_2 + CO) =$$

$$= 237(28,7 + 0,375 \cdot 2,7)0,2 / (16,6 + 0,2) = 83 \text{ кДж/кг}$$

Потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива, по формуле (2.17),

$$Q_4 = \frac{Q_4}{Q_p^p} 100 = 4 \cdot 10557,6 / 100 = 422,3 \text{ кДж/кг}$$

Потери теплоты в окружающую среду, по формуле (2.18):

$$\begin{aligned} Q_5 &= Q_p^p - (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6) = \\ &= 10557,6 - (9099 + 891 + 83 + 422,3) = 62,3 \text{ кДж/кг} \end{aligned}$$

Составляющие теплового баланса:

$$q_1 = (Q_1 / Q_p^p) 100 = (9099 / 10557,6) 100 = 86,2\%$$

$$q_2 = (Q_2 / Q_p^p) 100 = (891 / 10557,6) 100 = 8,4\%$$

$$q_3 = (Q_3 / Q_p^p) 100 = (83 / 10557,6) 100 = 0,8\%$$

$$q_5 = (Q_5 / Q_p^p) 100 = (62,3 / 10557,6) 100 = 0,6\%$$

Тепловой баланс котельного агрегата согласно уравнению (2.1):

$$\begin{aligned} Q_p^p &= Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 = \\ &= 9099 + 891 + 83 + 422,3 + 62,3 = 10557,6 \text{ кДж/кг} \end{aligned}$$

или в процентах от располагаемой теплоты топлива согласно уравнению (2.2):

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 = 86,2 + 8,4 + 0,8 + 0,4 + 0,6 = 100\%.$$

**Задача 2.2.** В топке котла сжигается малосернистый мазут состава:  $C^p = 84,65\%$ ;  $H^p = 11,7\%$ ;  $S_l^p = 0,3\%$ ;  $O^p = 0,3\%$ ;  $A^p = 0,05\%$ ;  $W^p = 3,0\%$ . Определить располагаемую теплоту, если температура подогрева мазута  $t_r = 93^\circ\text{C}$  и энтальпия пара, идущего на распыливание топлива паровыми форсунками,  $i_{\text{ф}} = 3280$  кДж/кг.

*Ответ:*  $Q_p^p = 40982$  кДж/кг.

**Задача 2.3.** В топке котла сжигается челябинский уголь марки БЗ состава:  $C^p = 37,3\%$ ,  $H^p = 2,8\%$ ;  $S_l^p = 1,0\%$ ;  $N^p = 0,9\%$ ;  $O^p = 10,5\%$ ;  $A^p = 29,5\%$ ;  $W^p = 18\%$ . Определить располагаемую теплоту, если температура топлива на входе в топку  $t_T = 20^\circ\text{C}$ .

*Ответ:*  $Q_p^p = 14030$  кДж/кг.

**Задача 2.4.** Определить теплоту, полезно использованную в водогрейном котле, если известны натуральный расход топлива

$B=1,2$  кг/с, расход воды  $M_в = 70$  кг/с, температура воды, поступающей в котел,  $t_1 = 70^\circ\text{C}$  и температура воды, выходящей из него,  $t_2 = 150^\circ\text{C}$ .

*Ответ:*  $Q_1 = 19\,553$  кДж/кг.

**Задача 2.5.** Определить теплоту, полезно использованную в котельном агрегате паропроизводительностью  $D=5,45$  кг/с; если натуральный расход топлива  $B=0,64$  кг/с, давление перегретого пара  $p_{п.п} = 1,3$  МПа, температура перегретого пара  $t_{п.п} = 275^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{п.в} = 100^\circ\text{C}$  и величина непрерывной продувки  $P = 3\%$ .

*Ответ:*  $Q_1 = 21\,996$  кДж/кг.

**Задача 2.6.** В топке котельного агрегата паропроизводительностью  $D = 5,6$  кг/с сжигается абанский уголь марки Б2 состава:  $C^p = 41,5\%$ ;  $H^p = 2,9\%$ ;  $S_{л}^p = 0,4\%$ ;  $N^p = 0,6\%$ ;  $O^p = 13,1\%$ ;  $A^p = 8,0\%$ ;  $W^p = 33,5\%$ . Определить в процентах теплоту, полезно использованную в котлоагрегате, если известны натуральный расход топлива  $B=1,12$  кг/с, давление перегретого пара  $p_{пл} = 4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{п.п} = 400^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{п.в} = 130^\circ\text{C}$ , величина непрерывной продувки  $P = 3\%$  и температура топлива на входе в топку  $t_T = 20^\circ\text{C}$ .

*Ответ:*  $q_1 = 91\%$ .

**Задача 2.7.** В топке котельного агрегата паропроизводительностью  $D=7,22$  кг/с сжигается высокосернистый мазут состава:  $C^p = 83,0\%$ ;  $H^p = 10,4\%$ ;  $S_{л}^p = 2,8\%$ ;  $O^p = 0,7\%$ ;  $A^p = 0,1\%$ ;  $W^p = 3,0\%$ . Определить располагаемую теплоту в кДж/кг и теплоту, полезно использованную в котлоагрегате в процентах, если известны температура подогрева мазута  $t_T = 90^\circ\text{C}$ , натуральный расход топлива  $B=0,527$  кг/с, давление перегретого пара  $p_{п.п} = 1,3$  МПа, температура перегретого пара  $t_{п.п} = 250^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{п.в} = 100^\circ\text{C}$  и величина непрерывной продувки  $P = 4\%$ .

*Ответ:*  $Q_p^p = 39\,044$  кДж/кг;  $q_1 = 89,5\%$ .

**Задача 2.8.** В топке котельного агрегата паропроизводительностью  $D = 4,2$  кг/с сжигается природный газ Дашавского

месторождения с низшей теплотой сгорания  $Q_I = 35\,700$  кДж/м<sup>3</sup>. Определить в кДж/м<sup>3</sup> и процентах теплоту, полезно использованную в котлоагрегате, если известны натуральный расход топлива  $V = 0,32$  м<sup>3</sup>/с, теоретический объем воздуха, необходимого для сгорания 1 м<sup>3</sup> топлива,  $V^\circ = 9,5$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, давление перепетого пара  $p_{пп} = 4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{пп} = 400^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{пв} = 130^\circ\text{C}$ , температура воздуха в котельной  $t_b = 30^\circ\text{C}$ , температура поступающего в топку воздуха  $t'_b = 230^\circ\text{C}$  и коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,1$ .

*Ответ:*  $Q_I = 35\,568$  кДж/м<sup>3</sup>;  $q_I = 92,4\%$ .

**Задача 2.9.** В топке котла сжигается малосернистый мазут состава:  $C^p = 84,65\%$ ;  $H^p = 11,7\%$ ;  $S_n^p = 0,3\%$ ;  $O^p = 0,3\%$ ;  $A^p = 0,05\%$ ;  $W^p = 3,0\%$ . Определить в кДж/кг и процентах потери теплоты с уходящими газами из котлоагрегата, если известны коэффициент избытка воздуха за котлоагрегатом  $a_{yx} = 1,35$ , температура уходящих газов на выходе из последнего газохода  $\theta_{yx} = 160^\circ\text{C}$ , температура воздуха в котельной  $t_b = 30^\circ\text{C}$ , средняя объемная теплоемкость воздуха при постоянном давлении  $c_{рв} = 1,297$  кДж/(м<sup>3</sup> К) и температура подогрева мазута  $t_T = 90^\circ\text{C}$ .

**Решение:** Низшую теплоту сгорания рабочей массы топлива определяем по формуле (1.12):

$$Q_n^p = 338C^p + 1025H^p - 108,5(O^p - S_n^p) - 25W^p = \\ = 338 \cdot 84,65 + 1025 \cdot 11,7 - 108,5(0,3 - 0,3) - 25 \cdot 3,0 = 40\,529 \text{ кДж/кг}$$

Теплоемкость мазута, по формуле (2.6):

$$c_T^p = 1,74 + 0,0025t_T = 1,74 + 0,0025 \cdot 90 = 1,97 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$$

Физическая теплота топлива, по формуле (2.4):

$$Q_{ТЛ} = c_T^p t_T = 1,97 \cdot 90 = 177 \text{ кДж/кг}$$

Располагаемая теплота, по формуле (2.3):



$$\begin{aligned}
 B &= \frac{D_{\text{пе}} \left[ (i_{\text{пп}} - i_{\text{пв}}) + \left( \frac{P}{100} \right) (i_{\text{кв}} - i_{\text{пв}}) \right]}{Q_p^p \eta_{\text{ка}}^{\text{бп}}} 100 = \\
 &= \frac{13,9 \left[ (3330 - 628) + 0,04(1087,5 - 628) \right]}{10558 * 86,8} 100 = \\
 &= 4,12 \text{ кг} / \text{с}
 \end{aligned}$$

Теоретический объем воздуха, необходимый для сгорания 1 кг топлива, определяем по формуле (1.27):

$$\begin{aligned}
 V^0 &= 0,089C^p + 0,226H^p + 0,033(S_{\text{л}}^p - O^p) = \\
 &= 0,089*84,65 + 0,266*11,7 + 0,033(0,3 - 0,3) = 10,62 \text{ м}^3 / \text{кг}
 \end{aligned}$$

Объем трехатомных газов, по формуле (1.33),

$$\begin{aligned}
 V_{RO_2} &= 0,0187(C^p + 0,375S_{\text{л}}^p) = \\
 &= 0,0187(84,65 + 0,375*0,3) = 1,58 \text{ м}^3 / \text{кг}
 \end{aligned}$$

Теоретический объем азота, по формуле (1.32):

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + 0,8N^p / 100 = 0,79*10,62 = 8,39 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

Теоретический объем водяных паров, по формуле (1.35):

$$\begin{aligned}
 V_{H_2O}^0 &= 0,0124(9H^p + W^p) + 0,0161V^0 = \\
 &= 0,0124*(9*11,7 + 3,0) + 0,0161*10,62 = 1,51 \text{ м}^3 / \text{кг}
 \end{aligned}$$

Энтальпия продуктов сгорания при  $\alpha_T = 1$  и  $\theta_{\text{yx}} = 160^\circ\text{C}$ , по формуле (1.61):

$$\begin{aligned}
 I_{\Gamma}^0 &= V_{RO_2} (c\theta)_{CO_2} + V_{N_2}^0 (c\theta)_{N_2} + V_{H_2O} (c\theta)_{H_2O} = \\
 &= 1,58*280 + 8,39*208 + 1,51*242 = 2553 \text{ кДж/кг}
 \end{aligned}$$

Значения  $(c\theta)_{CO_2}$ ,  $(c\theta)_{N_2}$ ,  $(c\theta)_{H_2O}$  находим по табл. 1 (см. Приложение).

Энтальпия воздуха при  $\alpha_T = 1$  и  $\theta_{\text{yx}} = 160^\circ\text{C}$ , по формуле (1.62):

$$I_{\text{в}}^0 = V^0 (c\theta)_{\text{в}} = 10,62*212 = 2251 \text{ кДж/кг}$$

Значение  $(c\theta)_{\text{в}}$  находим по табл. 1 (см. Приложение).

Энтальпия продуктов сгорания при  $\theta_{yx} = 160^\circ\text{C}$ , по формуле (1.60):

$$I_{\Gamma} = I_{\Gamma}^0 + (\alpha_{\Gamma} - 1)I_{\text{г}}^0 + I_3 = 2553 + (1,35 - 1)2251 = 3341 \text{ кДж/кг}$$

Энтальпия холодного воздуха:

$$I_{xв}^0 = V_{\text{пв}}^0 c_{\text{пв}} t_{\text{в}} = 10,62 * 1,297 * 30 = 413 \text{ кДж/кг}$$

Потери теплоты с уходящими газами находим по формуле (2.12):

$$\begin{aligned} Q_2 &= (V_{yx} c_{\text{пyx}} \theta_{yx} - \alpha_{yx} V_{\text{пв}}^0 c_{\text{пв}} t_{\text{в}})(100 - q_4) / 100 = \\ &= (I_{yx} - \alpha_{yx} I_{xв}^0)(100 - q_4) / 100 = \\ &= 3341 - (1,35 * 413)100 - 0 / 100 = 2783 \text{ кДж/кг} \end{aligned}$$

или в процентах – по формуле (2.13):

$$\begin{aligned} q_2 &= (Q_2 / Q_p^p) 100 = (I_{yx} - \alpha_{yx} I_{xв}^0)(100 - q_4) / Q_p^p = \\ &= (2783 / 40706) 100 = 6,8\% \end{aligned}$$

**Задача 2.10.** В топке котельного агрегата сжигается карандинский уголь марки К состава:  $C^p = 54,7\%$ ;  $H^p = 3,3\%$ ;  $S_l^p = 0,8\%$ ;  $N^p = 0,8\%$ ;  $O^p = 4,8\%$ ;  $A^p = 27,6\%$ ;  $W^p = 8,0\%$ . Определить потери теплоты с уходящими газами из котлоагрегата, если известны коэффициент избытка воздуха за котлоагрегатом  $a_{yx} = 1,43$ , объем уходящих газов на выходе из последнего газохода  $V_{yx} = 8,62 \text{ м}^3/\text{кг}$ , температура уходящих газов на выходе из последнего газохода  $\theta_{yx} = 150^\circ\text{C}$ , средняя объемная теплоемкость газов при постоянном давлении  $c_{\text{пyx}} = 1,4 \text{ кДж}/(\text{м}^3 * \text{К})$ , температура воздуха в котельной  $t_{\text{в}} = 30^\circ\text{C}$ , средняя объемная теплоемкость воздуха при постоянном давлении  $c_{\text{пв}} = 1,297 \text{ кДж}/(\text{м}^3 * \text{К})$  и потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4 = 3\%$ .

*Ответ:*  $Q_2 = 1454 \text{ кДж/кг}$ .

**Задача 2.11.** В топке котельного агрегата сжигается каменный уголь с низшей теплотой сгорания  $Q_n^p = 27600 \text{ кДж/кг}$ . Определить потери теплоты в процентах с уходящими газами из котлоагрегата, если известны коэффициент избытка воздуха за

котлоагрегатом  $a_{yx}=1,4$ , объем уходящих газов на выходе из последнего газохода  $V_{yx}=10,5$  м<sup>3</sup>/кг, температура уходящих газов на выходе из последнего газохода  $\theta_{yx} = 160^{\circ}\text{C}$ , средняя объемная теплоемкость газов при  $p=\text{const}$   $c_{p_{yx}}=1,415$  кДж/(м<sup>3</sup>К), теоретический объем воздуха, необходимый для сгорания 1 кг топлива  $V^{\circ} = 7,2$  м<sup>3</sup>/кг, температура воздуха в котельной  $t_{\text{в}}=30^{\circ}\text{C}$ , температура воздуха, поступающего в топку,  $t_{\text{в}}'=180^{\circ}\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T=1,2$ , средняя объемная теплоемкость воздуха при постоянном давлении  $c'_{p_{\text{в}}}=1,297$  кДж/(м<sup>3</sup>К) и потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4 = 4\%$ .

*Ответ:*  $q_2 = 6,5\%$ .

**Задача 2.12.** Определить, на сколько процентов возрастут потери теплоты с уходящими газами из котельного агрегата при повышении температуры уходящих газов  $\theta_{yx}$  со 160 до 180<sup>o</sup>C, если известны коэффициент избытка воздуха за котлоагрегатом  $a_{yx}=1,48$ , объем уходящих газов на выходе из последнего газохода  $V_{p_{yx}} = 4,6$  м<sup>3</sup>/кг, средняя объемная теплоемкость газов при постоянном давлении  $c_{p_{yx}}= 1,415$  кДж/(м<sup>3</sup> К), теоретический объем воздуха, необходимый для сгорания 1 кг топлива  $V^{\circ} = 2,5$  м<sup>3</sup>/кг, температура воздуха в котельной  $t_{\text{в}} = 30^{\circ}\text{C}$ , средняя объемная теплоемкость воздуха при постоянном давлении  $c'_{p_{\text{в}}} = 1,297$  кДж/(м<sup>3</sup> К) и потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4 = 340$  кДж/кг. Котельный агрегат работает на фрезерном торфе с низшей теплотой сгорания  $Q_n^p = 8500$  кДж/кг.

*Ответ:*  $\Delta q_2 = 1,5\%$ .

**Задача 2.13.** Определить в процентах потери теплоты с уходящими газами из котельного агрегата, если известны коэффициент избытка воздуха за котлоагрегатом  $\alpha_{yx}=1,5$ , температура уходящих газов на выходе из последнего газохода  $\theta_{yx} = 150^{\circ}\text{C}$ , температура воздуха в котельной  $t_{\text{в}}=30^{\circ}\text{C}$ , средняя объемная теплоемкость воздуха при постоянном давлении  $c_{p_{\text{в}}}= 1,297$  кДж/(м К), температура топлива при входе в топку  $t_{\text{т}}= 20^{\circ}\text{C}$

и потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4=3,5\%$ . Котельный агрегат работает на абанском угле марки Б2 состава:  $C^p = 41,5\%$ ;  $H^p = 2,9\%$ ;  $S_l^p = 0,4\%$ ;  $N^p = 0,6\%$ ;  $O^p = 13,1\%$ ;  $A^p = 8,0\%$ ;  $W^p = 33,5\%$ .

*Ответ:*  $q_2 = 8,0\%$ .

**Задача 2.14.** Определить, на сколько процентов уменьшатся потери теплоты с уходящими газами из котельного агрегата при снижении температуры уходящих газов  $\theta_{yx}$  со 145 до 130°C, если известны коэффициент избытка воздуха за котлоагрегатом  $\alpha_{yx}=1,43$ , объем уходящих газов на выходе из последнего газохода  $V_{yx} = 8,62 \text{ м}^3/\text{кг}$ , средняя объемная теплоемкость газов при постоянном давлении  $c_{p_{yx}} = 1,415 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \text{ К})$ , теоретический объем воздуха, необходимый для сгорания 1 кг топлива,  $V^o = 5,815 \text{ м}^3/\text{кг}$ , температура воздуха в котельной  $t_b=30^\circ\text{C}$ , средняя объемная теплоемкость воздуха при постоянном давлении  $c_{pв} = 1,297 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$  и потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4 = 3\%$ . Котельный агрегат работает на каменном угле с низшей теплотой сгорания  $Q_n^p = 22\,290 \text{ кДж}/\text{кг}$ .

*Ответ:*  $\Delta q = 0,8\%$ .

**Задача 2.15.** В топке котельного агрегата сжигается челябинский уголь марки Б3 состава:  $C^p=37,3\%$ ;  $H^p=2,8\%$ ;  $S_l^p = 1,0\%$ ;  $N^p=0,9\%$ ;  $O^p=10,5\%$ ;  $A^p=29,5\%$ ;  $W^p=18,0\%$ . Определить в кДж/кг и процентах потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива, если известны содержание в уходящих газах оксида углерода  $CO = 0,25\%$  и трехатомных газов  $RO_2 = 17,5\%$  и температура топлива на входе в топку  $t_T = 20^\circ\text{C}$ .

**Решение:** Низшую теплоту сгорания рабочей массы топлива определяем по формуле (1.12):

$$\begin{aligned} Q_n^p &= 338C^p + 1025H^p - 108,5(O^p - S_l^p) - 25W^p = \\ &= 338 \cdot 37,3 + 1025 \cdot 2,8 - 108,5 \cdot (10,5 - 1,0) - 25 \cdot 18,0 = \\ &= 13997 \text{ кДж}/\text{кг} \end{aligned}$$

Теплоемкость рабочей массы топлива, по формуле (2.5):

$$c_T^p = c_T^c \frac{100 - W^p}{100} + c_{H_2O} \frac{W^p}{100} = 1,088 \frac{100 - 18}{100} + 4,19 \frac{18}{100} = 1,65 \text{ кДж} / (\text{кг} * \text{K})$$

Физическая теплота топлива, по формуле (2.4):

$$Q_{ТЛ} = c_T^p t_T = 1,65 * 20 = 33 \text{ кДж} / \text{кг}$$

Располагаемая теплота, по формуле (2.3):

$$Q_p^p = Q_n^p + Q_{мл} = 997 + 33 = 14030 \text{ кДж} / \text{кг}$$

Потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива определяем по формуле (2.14):

$$Q_3 = 237(C^p + 0,375S_l^p)CO / (RO_2 + CO) = 237(37,3 + 0,375 - 1,0)0,25 / (17,5 + 0,25) = 125,6 \text{ кДж} / \text{кг}$$

или в процентах — по формуле (2.15):

$$q_3 = (Q_3 / Q_p^p) / 100 = 125,6 / 14030 * 100 = 0,9\%$$

**Задача 2.16.** Определить в кДж/кг и процентах потери теплоты химической неполноты сгорания топлива, если известны из данных анализа содержание оксида углерода в уходящих газах  $CO_2 = 0,28\%$  и содержание трехатомных газов  $RO_2 = 19\%$ . Котельный агрегат работает на каменном угле с низшей теплотой сгорания  $Q_n^p = 22825$  кДж/кг, содержание в топливе углерода  $C^p = 58,7\%$  и серы  $S_l^p = 0,3\%$ .

*Ответ:*  $Q_3 = 202$  кДж/кг;  $q_3 = 0,89\%$ .

**Задача 2.17.** В топке котельного агрегата сжигается кузнецкий уголь марки Д состава:  $C^p = 58,7\%$ ;  $H^p = 4,2\%$ ;  $S_l^p = 0,3\%$ ;  $N^p = 1,9\%$ ;  $O^p = 9,7\%$ ;  $A^p = 13,2\%$ ;  $W^p = 12,0\%$ . Определить в процентах и кДж/кг потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива, если известны температура топлива на входе в топку  $t_T = 20^\circ\text{C}$ , доля золы в шлаке и провале от содержания ее и топливе  $a_{шл+пр} = 80\%$ , доля золы в уносе от содержания ее и топливе  $a_{ун} = 20\%$ , содержание горючих в шлаке и провале  $C_{шл+пр} = 25\%$  и содержание горючих в уносе  $C_{ун} = 30\%$ .

**Решение:** Низшую теплоту сгорания рабочей массы топлива определяем по формуле (1.12):

$$\begin{aligned} Q_n^p &= 338C^p + 1025H^p - 108,5 (O^p - S_n^p) - 25W^p = \\ &= 338 * 58,7 + 1025 * 4,2 - 108,5 (9,7 - 0,3) - \\ &- 25 * 12,0 = 22825 \text{ кДж / кг} \end{aligned}$$

Теплоемкость рабочей массы топлива, по формуле (2.5):

$$\begin{aligned} c_T^p &= c_T^c \frac{100 - W^p}{100} + c_{H_2O} \frac{W^p}{100} = \\ &= 0,962 \frac{100 - 12}{100} + 4,19 \frac{12,0}{100} = 1,49 \text{ кДж / (кг * К)} \end{aligned}$$

Физическая теплота топлива, по формуле (2.4):

$$Q_{ТЛ} = c_T^p t_T = 1,349 * 20 = 27 \text{ кДж / кг}$$

Располагаемая теплота, по формуле (2.3):

$$Q_p^p = Q_n^p + Q_{ТЛ} = 22825 + 27 = 22852 \text{ кДж / кг}$$

Потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива в процентах определяем по формуле (2.17):

$$\begin{aligned} q_4 &= \frac{Q_4}{Q_p^p} 100 = \frac{327 A^p}{Q_p^p} \left( a_{шл} + np \frac{C_{шл} + np}{100 - C_{шл} + np} + a_{yh} \frac{C_{yh}}{100 - C_{yh}} \right) = \\ &= \frac{327 * 13,2}{22852} \left( 80 \frac{28}{100 - 25} + 20 \frac{30}{100 - 30} \right) = 6,7\% \end{aligned}$$

Потери теплоты от механической неполноты сгорания в кДж/кг:

$$Q_4 = q_4 Q_p^p / 100 = 6,7 - 22852 / 100 = 1531 \text{ кДж / кг.}$$

**Задача 2.18.** Определить в кДж/кг и процентах потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива, если известны из данных испытаний потери теплоты топлива со шлаком  $Q_4^{шл} = 600$  кДж/кг, потери теплоты с провалом топлива  $Q_4^{пр} = 100$  кДж/кг и потери теплоты с частичками топлива, уносимыми уходящими газами  $Q_4^{yh} = 760$  кДж/кг. Котельный агрегат

работает на донецком угле марки Т состава:  $C^p = 62,7\%$ ;  $H^p = 3,1\%$ ;  $S_l^p = 2,8\%$ ;  $N^p = 0,9\%$ ;  $O^p = 1,7\%$ ;  $A^p = 23,8\%$ ;  $W^p = 5,0\%$ .

*Ответ:*  $Q_4 = 1460$  кДж/кг;  $q_4 = 6\%$ .

**Задача 2.19.** Определить в процентах и кДж/кг потери теплоты в окружающую среду, если известны температура топлива на входе в топку  $t_T = 20^\circ\text{C}$ , теплота, полезно использованная в котлоагрегате,  $q_1 = 84\%$ ; потери теплоты с уходящими газами  $q_2 = 11\%$ , потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива  $q_3 = 0,5\%$ , потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4 = 4\%$ . Котельный агрегат работает на подмосковном угле марки Б2 с низшей теплотой сгорания  $Q_n^p = 10516$  кДж/кг, содержание в топливе влаги  $W^p = 32,0\%$ . Потерями теплоты с физической теплотой шлака пренебречь.

*Ответ:*  $q_5 = 0,5\%$ ;  $Q_5 = 52,8$  кДж/кг.

**Задача 2.20.** В топке котельного агрегата сжигается донецкий уголь марки А состава:  $C^p = 63,8\%$ ;  $H^p = 1,2\%$ ;  $S_l^p = 1,7\%$ ;  $N^p = 0,6\%$ ;  $O^p = 1,3\%$ ;  $A^p = 22,9\%$ ;  $W^p = 5,5\%$ . Определить в кДж/кг и процентах потери теплоты с физической теплотой шлака, если известны доля золы топлива в шлаке  $a_{\text{шл}} = 0,8$ ; теплоемкость шлака  $c_{\text{шл}} = 0,934$  кДж/(кг\*К) и температура шлака  $t_{\text{шл}} = 600^\circ\text{C}$ .

*Ответ:*  $Q_6 = 102,6$  кДж/кг;  $q_6 = 0,5\%$ .

**Задача 2.21.** Определить в процентах потери теплоты в окружающую среду, если известны теплота, полезно использованная в котлоагрегате,  $q_1 = 87\%$ , потери теплоты с уходящими газами  $q_2 = 8\%$ , потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива  $q_3 = 0,5\%$ , потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4 = 3,5\%$ ; доля золы топлива в шлаке  $a_{\text{шл}} = 0,8$ , теплоемкость шлака  $c_{\text{шл}} = 0,934$  кДж/(кг К), температура шлака  $t_{\text{шл}} = 600^\circ\text{C}$ , температура воздуха в котельной  $t_B = 30^\circ\text{C}$ , температура воздуха, поступающего в топку,  $t'_B = 169^\circ\text{C}$  и коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,4$ . Котельный агрегат работает на донецком угле марки Т состава:  $C^p = 62,7\%$ ;  $H^p = 3,1\%$ ;  $S_l^p = 2,8\%$ ;  $N^p = 0,9\%$ ;  $O^p = 1,7\%$ ;  $A^p = 23,8\%$ ;  $W^p = 5,0\%$ .

**Решение:** Низшую теплоту сгорания рабочей массы топлива определяем по формуле (1.12):

$$\begin{aligned} Q_n^p &= 338C^p + 1025H^p - 108,5(O^p - S_a^p) - 25W^p = \\ &= 338 \cdot 62,7 + 1025 \cdot 3,1 - 108,5(1,7 - 2,8) - \\ &- 25 \cdot 5,0 = 24\,365 \text{ кДж/кг} \end{aligned}$$

Теоретически необходимый объем воздуха, по формуле (1.27),

$$\begin{aligned} V^0 &= 0,089C^p + 0,226H^p + 0,033(S_a^p - O^p) = \\ &= 0,089 \cdot 62,7 + 0,226 \cdot 3,1 + 0,033(2,8 - 1,7) = 6,44 \text{ м}^3/\text{кг} \end{aligned}$$

Теплота, вносимая в топку с воздухом, по формуле (2.7):

$$Q_{в.вн} = \alpha_T V^0 c_{pв} \Delta t_в = 1,4 - 6,44 - 1,33 - 139 = 1668 \text{ кДж/кг}$$

Располагаемая теплота, по формуле (2.3):

$$Q_p^p = Q_n^p + Q_{в.вн} = 24365 + 1668 = 26033 \text{ кДж/кг}$$

Потери теплоты с физической теплотой шлака, по формуле (2.21):

$$\begin{aligned} q_6 &= \frac{a_{шл} c_{шл} t_{шл} A^p / Q_p^p}{Q_p^p} = \\ &= \frac{0,8 \cdot 0,934 \cdot 600 \cdot 23,8}{26033} = 0,4\% \end{aligned}$$

Потери теплоты в окружающую среду, по формуле (2.19):

$$q_5 = 100 - (q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) = 100 - (87 + 8 + 0,5 + 3,5 + 0,4) = 0,6\%$$

**Задача 2.22.** В пылеугольной топке котельного агрегата паропроизводительностью  $D=5,56$  кг/с сжигается бурый уголь с низшей теплотой сгорания  $Q_n^p=15\,000$  кДж/кг. Определить кпд котлоагрегата (брутто) и расход натурального и условного топлива, если известны давление перегретого пара  $p_{пп}=4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{п.п}=450^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{п.в}=150^\circ\text{C}$ , величина непрерывной продувки  $P=3\%$ , потери теплоты с уходящими газами  $q_2=7\%$ , потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива  $q_3=0,5$ , потери



теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4=1\%$ , потери теплоты в окружающую среду  $q_5=1,3\%$  и потери теплоты с физической теплотой шлака  $q_6=0,4\%$ .

**Решение:** Кпд котлоагрегата (брутто) находим по формуле (2.23):

$$\begin{aligned}\eta_{ка}^{бp} &= 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) = \\ &= 100 - (7 + 0,5 + 1 + 1,3 + 0,4) = 89,8\%\end{aligned}$$

Натуральный расход топлива, по формуле (2.25),

$$\begin{aligned}B &= \frac{D_{не}[(i_{н.п} - i_{н.в}) + (p/100)(i_{к.в} - i_{н.в})] + D_{н.п}(i_{н.п} - i_{н.в})}{Q_p^p \eta_{ка}^{бp}} = \\ &+ \frac{5,56\{(3330 - 632) + (3/100)(1087,5 - 632)\}}{15000 * 89,8} 100 = 1,12 \text{ кг/с}\end{aligned}$$

$D_{не} = D$ , так как отсутствует отбор насыщенного пара. Располагаемая теплота  $Q_p^p = Q_n^p = 15000$  кДж/кг. Энтальпию пара  $i_{п.п}$  находим по  $is$ -диаграмме  $i_{п.п} = 3330$  кДж/кг, энтальпию питательной и котловой воды определяем, пользуясь табл. 2.3 (см. Приложение):  $i_{п.в} = 632$  кДж/кг;  $i_{к.в} = 1087,5$  кДж/кг.

Расход условного топлива находим по формуле (1.22):

$$\begin{aligned}B_y &= BЭ = BQ_n^p / 29300 = \\ &= 1,12 * 15000 / 29300 = 0,57 \text{ кг/с}\end{aligned}$$

**Задача 2.23.** Определить кпд брутто и нетто котельной установки, работающей на кузнецком угле марки Д состава:  $C^p = 58,7\%$ ;  $H^p = 4,2\%$ ;  $S_l^p = 0,3\%$ ;  $N^p = 1,9\%$ ;  $O^p = 9,7\%$ ;  $A^p = 13,2\%$ ;  $W^p = 12,0\%$ , если известны натуральный расход топлива  $B = 0,24$  кг/с, паропроизводительность котельного агрегата  $p_{пп} = 1,8$  кг/с, давление перегретого пара  $p_{вп} = 4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{пп} = 450^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{пв} = 140^\circ\text{C}$ , величина непрерывной продувки  $P = 3\%$ ; расход пара на собственные нужды котельной  $D_{сн} = 0,01$  кг/с и давление пара, расходуемого на собственные нужды,  $p_{с.н.} = 0,5$  МПа.

**Решение:** Низшую теплоту сгорания рабочей массы топлива определяем по формуле (1.12)

$$\begin{aligned}
Q_n^p &= 338C^p + 1025H^p - 108,5 (O^p - S_n^p) - 25W^p = \\
&= 338 * 58,7 + 1025 * 4,2 - 108,5 (9,7 - 0,3) - 25 * 12,0 = \\
&= 22\,825 \text{ кДж / кг}
\end{aligned}$$

Теплоту, полезно использованную в котлоагрегате, находим по формуле (2.9):

$$\begin{aligned}
Q_1 &= \frac{D_{ne}}{B} \left[ (i_{n.n} - i_{n.в}) + \frac{P}{100} (i_{к.в} - i_{n.в}) \right] + D_{н.н} (i_{н.н} - i_{н.в}) = \\
\frac{1,8}{0,24} \left[ (3330 - 589) + \frac{3}{100} (1087,5 - 589) \right] &= 20670 \text{ кДж / кг}
\end{aligned}$$

$D_{пс} = D$ , так как отсутствует отбор насыщенного пара.

Кпд котлоагрегата (брутто), по формуле (2.22):

$$\eta_{ка}^{бp} = (Q_1 / Q_p^p) / 100 = (20670 / 22825) 100 = 90,6\%$$

Теплота, использованная на собственные нужды:

$$\begin{aligned}
Q_{с.н} &= \frac{D_{сн}}{B} (i_{с.н} - i_{н.в}) = \\
&= \frac{0,01}{0,24} (2748,8 - 589) = 90 \text{ кДж / кг}
\end{aligned}$$

Кпд установки (нетто), по формуле (2.24):

$$\begin{aligned}
\eta_{к.у}^{нт} &= \eta_{ка}^{бp} - \frac{Q_{с.н}}{BQ_p^p} 100 = \\
&= 90,6 - \frac{90}{22825 * 0,24} 100 = 89\%
\end{aligned}$$

**Задача 2.24.** В топке котельного агрегата сжигается каменный уголь, состав горючей массы которого:  $C^Г=88,5\%$ ;  $H^Г=4,5\%$ ;  $S^Г=0,5\%$ ;  $N^Г=1,8\%$ ;  $O^Г=4,7\%$ ; зольность сухой массы  $A^с=13,0\%$  и влажность рабочая  $W^p=12,0\%$ . Определить кпд котельного агрегата (брутто), если известны температура воздуха в котельной  $t_B=25^\circ\text{C}$ , температура воздуха, поступающего в топку,  $t'_B=175^\circ\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T=1,3$ , потери теплоты с уходящими газами  $Q_2 = 2360 \text{ кДж/кг}$ , потери

теплоты от химической неполноты сгорания  $Q_3=147,5$  кДж/кг, потери теплоты от механической неполноты сгорания  $Q_4=1180$  кДж/кг, потери теплоты в окружающую среду  $Q_5=147,5$  кДж/кг и потери теплоты с физической теплотой шлаков  $Q_6=88,5$  кДж/кг.

*Ответ:*  $\eta_{ка}^{бр} = 86,7\%$ .

**Задача 2.25.** Определить кпд котельной установки (нетто), если известны кпд котлоагрегата (брутто)  $\eta_{ка}^{бр} = 89,6\%$ , расход топлива  $B=0,334$  кг/с, расход пара на собственные нужды котельной  $D_{сн}=0,012$  кг/с, давление пара, расходуемого на собственные нужды,  $p_{сн}=0,5$  МПа и температура питательной воды  $t_{пв}=120^\circ\text{C}$ . Котельный агрегат работает на высокосернистом мазуте с низшей теплотой сгорания горючей массы  $Q_n^r = 40090$  кДж/кг, содержание в топливе золы  $A^p=0,1\%$  и влаги  $W^p=3,0\%$ . Температура подогрева мазута  $t_T=90^\circ\text{C}$ .

*Ответ:*  $\eta_{к.у}^{нт} = 89,0\%$ .

**Задача 2.26.** В топке водогрейного котла сжигается природный газ Саратовского месторождения с низшей теплотой сгорания  $Q_n^c = 35\,799$  кДж/м<sup>3</sup>. Определить расход натурального и условного топлива, если известны кпд котлоагрегата (брутто)  $\eta_{ка}^{бр} = 89\%$ , расход воды  $M_v=75$  кг/с, температура воды, поступающей в котел,  $t_1=70^\circ\text{C}$  и температура воды, выходящей из него,  $t_2=150^\circ\text{C}$ .

*Ответ:*  $B=0,79$  кг/с;  $B_y = 0,965$  кг/с.

**Задача 2.27.** В топке котельного агрегата паропроизводительностью  $D=5,6$  кг/с сжигается челябинский уголь марки БЗ с низшей теплотой сгорания  $Q_n^p = 13997$  кДж/кг. Определить экономию топлива в процентах, получаемую за счет предварительного подогрева конденсата, идущего на питание котлоагрегатов в регенеративных подогревателях, если известны температура топлива при входе в топку  $t_T=20^\circ\text{C}$ , теплоемкость рабочей массы топлива  $c^p=2,1$  кДж/(кг\*К), кпд котлоагрегата (брутто)  $\eta_{ка}^{бр}$

=91,5%, давление перегретого пара  $p_{nl}=4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{пп}=430^{\circ}\text{C}$ , температура конденсата  $t_k=32^{\circ}\text{C}$ , температура питательной воды после регенеративного подогревателя  $t_{пв}=130^{\circ}\text{C}$  и величина непрерывной продувки  $P=3\%$ .

**Решение:** Физическую теплоту топлива определяем по формуле (2.4):

$$Q_{ТЛ} = c^p t_T = 2.1 * 20 = 42 \text{ кДж/кг.}$$

Располагаемую теплоту находим по формуле (2.3):

$$Q_p^p = Q_n^p + Q_{ТЛ} = 13997 + 42 = 14039 \text{ кДж/кг}$$

Расход топлива без регенеративного подогрева определяем по формуле (2.25):

$$B_1 = \frac{D_{ne}[(i_{n.n} - i_{n.в}) + (p/100)(i_{к.в} - i_{n.в})] + D_{u.n}(i_{u.n} - i_{n.в})}{Q_p^p \eta_{ка}^{бp}} =$$

$$\frac{5,6[(3285 - 134) + (3/100)(1087,5 - 134)]}{14039 * 91,5} =$$

$$= 1,38 \text{ кг/с}$$

$D_{ne}=D$ , так как отсутствует отбор насыщенного пара.

Расход топлива с регенеративным подогревом:

$$B_1 = \frac{D_{ne}[(i_{n.n} - i_{n.в}) + (p/100)(i_{к.в} - i_{n.в})] + D_{u.n}(i_{u.n} - i_{n.в})}{Q_p^p \eta_{ка}^{бp}} =$$

$$\frac{5,6[(3285 - 546) + (3/100)(1087,5 - 546)]}{14039 * 91,5} =$$

$$= 1,19 \text{ кг/с}$$

**Задача 2.28.** В топке котельного агрегата паропроизводительностью  $D = 64$  кг/с сжигается бурый уголь с низшей теплотой поранил  $Q_n^p=15\ 300$  кДж/кг. Определить расчетный расход топлива, если известны КПД котлоагрегата (брутто)  $\eta_{ка}^{бp}=89,3\%$ ; давление перегретого пара  $p_{пп}=10$  МПа, температура перегретого пара  $t_{пп}=510^{\circ}\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{пв}=215^{\circ}\text{C}$ , потери теплоты топлива со шлаком  $Q_4^{шп}=172$  кДж/кг, потери теплоты с провалом топлива  $Q_4^{пв}=250$  кДж/кг и потери

теплоты с частицами топлива, уносимыми уходящими газами,  $Q_4^{yH}=190$  кДж/кг.

*Ответ:*  $B_v=11,4$  кг/с.

**Задача 2.29.** В топке котельного агрегата паропроизводительностью  $D = 3,9$  кг/с сжигается природный газ Ставропольского месторождения с низшей теплотой сгорания  $Q_n^c = 35\,675$  кДж/м<sup>3</sup>. Определить экономию условного топлива в процентах, получаемую за счет предварительного подогрева конденсата, идущего на питание котлоагрегатов в регенеративных подогревателях, если известны КПД котлоагрегата (брутто)  $\eta_{ка}^{бр} = 91\%$ ; давление перегретого пара  $p_{пп}=1,4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{пп}=280^\circ\text{C}$ , температура конденсата  $t_1=32^\circ\text{C}$ , температура питательной воды после регенеративного подогревателя  $t_{пв}=100^\circ\text{C}$  и величина непрерывной продувки  $P = 3\%$ .

*Ответ:*  $\Delta B_y = 10\%$

## 2.2. Характеристики топочных устройств

Для слоевых топок основными тепловыми характеристиками являются тепловое напряжение площади колосниковой решетки (зеркала горения), тепловое напряжение топочного объема и КПД топки, для камерных топок – тепловое напряжение топочного объема и КПД топки.

Тепловое напряжение (кВт/м<sup>2</sup>) площади колосниковой решетки

$$Q/R = BQ_n^p / R, \quad (2.27)$$

где  $B$  – натуральный расход топлива, кг/с;  $Q_n^p$  – низшая теплота сгорания, кДж/кг;  $R$  – площадь колосниковой решетки, м<sup>2</sup>. Тепловое напряжение (кВт/м<sup>3</sup>) топочного объема

$$Q/V_m = BQ_n^p / V_m, \quad (2.28)$$

где  $V_m$  – объем топочного пространства, м<sup>3</sup>.

Коэффициент полезного действия топки

$$\eta_m = 100 - q_3 - q_4, \quad (2.29)$$

где  $q_3$  – потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива, %;  $q_4$  – потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива, %.

**Задача 2.30.** Определить площадь колосниковой решетки, которую требуется установить под вертикально-водотрубным котлом паропроизводительностью  $D=6,1$  кг/с, работающим на подмосковном угле марки Б2 состава:  $C^p=28,7\%$ ;  $H^p=2,2\%$ ;  $S_{\text{л}}^p=2,7\%$ ;  $N^p=0,6\%$ ;  $O^p=8,6\%$ ;  $A^p=25,2\%$ ;  $W^p=32,0\%$ , если известны температура топлива при входе в топку  $t_{\text{т}}=20^\circ\text{C}$ , давление перегретого пара  $p_{\text{пп}}=4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{\text{пп}}=420^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{\text{пв}}=180^\circ\text{C}$ , кпд котлоагрегата (брутто)  $\eta_{\text{ка}}^{\text{бп}}=87\%$ , величина непрерывной продувки  $P=4\%$  и тепловое напряжение площади колосниковой решетки  $Q/R=1170$  кВт/м<sup>2</sup>.

*Ответ:*  $R=14,8$  м<sup>2</sup>.

**Задача 2.31.** Определить объем топочного пространства, предназначенного для вертикально-водотрубного котла паропроизводительностью  $D=13,8$  кг/с, при работе на малосернистом мазуте состава:  $C^p=84,65\%$ ;  $H^p=11,7\%$ ;  $S_{\text{л}}^p=0,3\%$ ;  $O^p=0,3\%$ ;  $A^p=0,05\%$ ;  $W^p=3,0\%$ , если известны температура подогрева мазута  $t_{\text{т}}=90^\circ\text{C}$ , давление перегретого пара  $p_{\text{пп}}=1,4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{\text{пп}}=250^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{\text{пв}}=100^\circ\text{C}$ , кпд котлоагрегата (брутто)  $\eta_{\text{ка}}^{\text{бп}}=88\%$ ; величина непрерывной продувки  $P=3\%$  и тепловое напряжение топочного объема  $Q/V_m=490$  кВт/м<sup>3</sup>.

*Ответ:*  $V_m=86$  м<sup>3</sup>.

**Задача 2.32.** Определить площадь колосниковой решетки, объем топочного пространства и кпд топки котельного агрегата паропроизводительностью  $D=5,45$  кг/с, если известны давление перегретого пара  $p_{\text{пп}}=1,4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{\text{пп}}=280^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{\text{пв}}=100^\circ\text{C}$ , кпд котлоагрегата (брутто)  $\eta_{\text{ка}}^{\text{бп}}=86\%$ , величина непрерывной продувки  $P=3\%$ , тепловое напряжение площади колосниковой решетки

$Q/R=1015$  кВт/м<sup>2</sup>; тепловое напряжение топочного объема  $Q/V_m=350$  кВт/м<sup>3</sup>, потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива  $q_3=0,5\%$  и потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4=5,5\%$ . Котельный агрегат работает на кузнецком угле марки Т с низшей теплотой сгорания горючей массы  $Q_n^r=34345$  кДж/кг, содержание в топливе золы  $A^p=16,8\%$  и влаги  $W^p=6,5\%$ .

**Решение:** Низшую теплоту сгорания рабочей массы топлива определяем по формуле (1.14):

$$Q_n^p = Q_p^p = Q_n^r \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} - 25W^p = 34345 \frac{100 - (16,8 + 6,5)}{100} - 25 \cdot 6,5 = 26180 \text{ кДж/кг.}$$

Расход топлива находим по формуле (2.25):

$$B = \frac{D_{ne} \left[ (i_{mn} - i_{nv}) + \frac{p}{100} (i_{kv} - i_{nv}) \right]}{Q_p^p \eta_{ка}^{bp}} \cdot 100 = \frac{5,45 \left[ (3000 - 419) + \frac{3}{100} (830 - 419) \right]}{26180 \cdot 86} \cdot 100 = 0,62 \text{ кг/с.}$$

$D_{ne}=D$ , так как отсутствует отбор насыщенного пара. Площадь колосниковой решетки, по формуле (2.27),

$$R = \frac{BQ_n^p}{Q/R} = \frac{0,62 \cdot 26180}{1015} = 16 \text{ м}^2.$$

Объем топочного пространства, по формуле (2.28),

$$V_m = \frac{BQ_n^p}{Q/V_m} = \frac{0,62 \cdot 26180}{350} = 46,4 \text{ м}^3.$$

Кпд топки определяем по формуле (2.29):

$$\eta_m = 100 - q_3 - q_4 = 100 - 0,5 - 5,5 = 94\%.$$

**Задача 2.33.** В топке котельного агрегата паропроизводительностью  $D=7,05$  кг/с сжигается природный газ Саратовского месторождения состава:  $CO_2=0,8\%$ ;  $CH_4=84,5\%$ ;  $C_2H_6=3,8\%$ ;  $C_3H_8=1,9\%$ ;  $C_4H_{10}=0,9\%$ ;  $C_5H_{12}=0,3\%$ ;  $N_2=7,8\%$ . Определить объем топочного пространства и кпд топки, если известны

давление перегретого пара  $p_{\text{пп}}=1,4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{\text{пп}}=280^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{\text{пв}}=110^\circ\text{C}$ , кпд теплоагрегата (брутто)  $\eta_{\text{ка}}^{\text{бр}}=91\%$ , величина непрерывной продувки  $P=4\%$ , тепловое напряжение топочного объема  $Q/V_m=310$  кВт/м<sup>3</sup>, потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива  $q_3=1,2\%$  и потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4=1\%$ .

*Отчет:*  $V_m=63,6$  м<sup>3</sup>;  $\eta_{\text{T}}=97,8\%$ .

**Задача 2.34.** Определить площадь колосниковой решетки и кпд топки котельного агрегата паропроизводительностью  $D=5,9$  кг/с, если известны давление перегретого пара  $p_{\text{пп}}=1,4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{\text{пп}}=250^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{\text{пв}}=120^\circ\text{C}$ , кпд котлоагрегата (брутто)  $\eta_{\text{ка}}^{\text{бр}}=86,5\%$ , тепловое напряжение площади колосниковой решетки  $Q/R=1260$  кВт/м<sup>2</sup>, потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива  $Q_3=101,5$  кДж/кг и потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $Q_4=1290$  кДж/кг. Котельный агрегат работает на кизеловском угле марки Г с низшей теплотой сгорания горючей массы  $Q_{\text{н}}^{\text{п}}=31349$  кДж/кг, содержание в топливе золы  $A^{\text{п}}=31\%$  и влаги  $W^{\text{п}}=6\%$ .

*Ответ:*  $R=12,1$  м<sup>2</sup>;  $\eta_{\text{T}}=93\%$ .

**Задача 2.35.** Определить тепловое напряжение топочного объема камерной топки котельного агрегата паропроизводительностью  $D=2,5$  кг/с, если известны давление перегретого пара  $p_{\text{пп}}=1,4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{\text{пп}}=250^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{\text{пв}}=100^\circ\text{C}$ , кпд котлоагрегата (брутто)  $\eta_{\text{ка}}^{\text{бр}}=90\%$ , величина непрерывной продувки  $P=4\%$  и объем топочного пространства  $V_m=24$  м<sup>3</sup>. Котельный агрегат работает на высокосернистом мазуте с низшей теплотой сгорания горючей массы  $Q_{\text{н}}^{\text{п}}=40090$  кДж/кг, содержание в топливе золы  $A^{\text{п}}=0,1\%$  и влаги  $W^{\text{п}}=3\%$ . Температура подогрева мазута  $t_{\text{T}}=90^\circ\text{C}$ .

*Ответ:*  $Q/V_m=292$  кВт/м<sup>3</sup>.

**Задача 2.36.** В топке водогрейного котла сжигается челябинский уголь марки БЗ с низшей теплотой сгорания  $Q_{\text{н}}^{\text{п}}=13$



997 кДж/кг. Определить тепловое напряжен: площади колосниковой решетки, если известны КПД котлоагрегата (брутто)  $\eta_{ка}^{бр} = 85\%$ , расход воды  $M_6 = 65$  кг/с, температура воды, поступающей в котел,  $t_1 = 70^\circ\text{C}$ , температура воды, выходящей из него,  $t_2 = 150^\circ\text{C}$  и площадь колосников решетки  $R = 15$  м<sup>2</sup>.

*Ответ:*  $Q/R = 1596$  кВт/м<sup>2</sup>.

**Задача 2.37.** В шахтно-мельничной топке сжигается Донецкий уголь марки Г с низшей теплотой сгорания  $Q_{н}^p = 22024$  кДж/кг. Определить площадь колосниковой решетки, объем поточного пространства и КПД топки, если тепловое напряжение площади колосниковой решетки  $Q/R = 1270$  кВт/м<sup>2</sup>, тепловое напряжение поточного объема  $Q/V_m = 280$  кВт/м<sup>3</sup>, расход топлива  $B = 0,665$  кг/с, потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива  $q_3 = 0,6\%$  и потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4 = 4,4\%$ .

*Ответ:*  $R = 11,5$  м<sup>2</sup>;  $V_m = 52,3$  м<sup>3</sup>;  $\eta_T = 95\%$ .

### 2.3. Расчет теплообмена в топочных устройствах

**Теплота, переданная лучевоспринимающим поверхностям топки.**

Количество теплоты (кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>), переданной лучевоспринимающим поверхностям топки, определяется по формуле

$$Q_l = \varphi(Q_m - I_m''), \quad (2.30)$$

где  $Q_m$  – полезное тепловыделение в топке, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>);  
 $I_m''$  – энтальпия продуктов сгорания при температуре  $\theta''$  на выходе из топки, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>);

$\varphi$  – коэффициент сохранения теплоты.

**Полезное тепловыделение в топке** (кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>) при сгорании 1 кг твердого, жидкого или 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива

$$Q_m = Q_p^p \frac{100 - q_3 - q_4 - q_6}{100 - q_4} + Q_v' + Q_{rc} - Q_{вн}, \quad (2.31)$$

где  $Q_p^p$  – располагаемая теплота топлива, кДж/кг;

$Q_v$  – теплота, вносимая в топку с поступающим холодным или горячим воздухом, кДж/кг;

$Q_{rc}$  – теплота рециркулирующих газов, кДж/кг;

$Q_{вн}$  – теплота, вносимая в топку воздухом, подогретым вне котлоагрегата, кДж/кг;

$q_3$  – потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива, %;  $q_4$  – потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива, %;

$q_6$  – потери теплоты с физической теплотой шлака, %.

Теплота, вносимая в топку с поступающим холодным или горячим воздухом:

$$Q_v = (\alpha_T - \Delta\alpha_T - \Delta\alpha_{пл}) V^0 (c\theta)_{zv} + (\Delta\alpha_T + \Delta\alpha_{пл}) V^0 (c\theta)_{xv}, \quad (2.32)$$

где  $\alpha_T$  – коэффициент избытка воздуха в топке;

$\Delta\alpha_T$  – присос воздуха в топке;

$\Delta\alpha_{пл}$  – присос воздуха в пылеприготовительной установке;

$V^0$  – теоретически необходимый объем воздуха, м<sup>3</sup>/кг;

$(c\theta)_{zv}$  и  $(c\theta)_{xv}$  – энтальпии горячего и холодного воздуха, кДж/кг.

Теплота рециркулирующих газов

$$Q_{rc} = V_{rc} c_{rc} \theta_{rc}, \quad (2.33)$$

где  $V_{rc}$  – объем рециркулирующих газов, м<sup>3</sup>/кг;

$c_{rc}$  – средняя объемная теплоемкость рециркулирующих газов, кДж/(м<sup>3</sup>·К);

$\theta_{rc}$  – температура рециркулирующих газов в месте отбора, °С.

Теплота, вносимая в топку воздухом, подогретым вне котлоагрегата,  $Q_{вн}$  находится по формуле (2.7).

**Коэффициент сохранения теплоты**

$$\varphi = 1 - q_5/100, \quad (2.34)$$

где  $q_5$  – потери теплоты в окружающую среду, %.

**Теоретическая температура горения топлива в топке** ( $\theta_m$ ) представляет собой температуру, до которой нагрелись бы продукты сгорания, если бы на их нагрев пошла вся теплота, введенная в топку, за вычетом потерь теплоты от химической неполноты сгорания топлива и физической теплоты шлака.

Зная полезное тепловыделение  $Q_m$  в топке, теоретическую температуру горения ( $^{\circ}\text{C}$ ) определяют по формуле

$$\theta_m = \frac{Q_m}{V_{RO_2} c'_{CO_2} + V_{N_2}^0 c'_{N_2} + V_{H_2O}^0 c'_{H_2O} + (\alpha_T - 1) V^0 c'_{pв}}, \quad (2.35)$$

где  $V_{RO_2}$ ,  $V_{N_2}^0$ ,  $V_{H_2O}^0$  – теоретические объемы продуктов сгорания топлива,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ;

$c'_{CO_2}$ ,  $c'_{N_2}$ ,  $c'_{H_2O}$ ,  $c'_{pв}$  – средние объемные теплоемкости углекислоты, азота, водяных паров и воздуха,  $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K})$ .

В формуле (2.35) неизвестны значения  $\theta_m$ ,  $c'_{CO_2}$ ,  $c'_{N_2}$ ,  $c'_{H_2O}$ ,  $c'_{pв}$ . Поэтому  $\theta_m$  определяют с помощью  $I\theta$ -диаграммы для продуктов сгорания (см. рис. 1.1): находят температуру  $\theta_m$ , при которой энтальпия продуктов сгорания  $I_m$  будет равна полезному тепловыделению  $Q_m$ .

### **Температура газов ( $^{\circ}\text{C}$ ) на выходе из топки**

$$\theta_m'' = \frac{T_m}{M \left( \frac{5,7 \cdot 10^{-11} \zeta H_d \alpha_T T_m^3}{\varphi B_p V c_p} \right)^{0,6} + 1} - 273, \quad (2.36)$$

где  $T_m$  – абсолютная теоретическая температура горения топлива в топке,  $\text{K}$ ;  $M$  – расчетный коэффициент, зависящий от относительного местоположения максимума температуры в топке: при слоевом сжигании твердых топлив  $M=0,3 \dots 0,5$ , при факельном сжигании жидких и газообразных топлив  $M=0,05$ ;

$\zeta$  – условный коэффициент загрязнения лучевоспринимающих поверхностей (для гладкотрубных экранов он принимается:  $0,6$  – при сжигании твердых топлив;

$0,55$  – при сжигании мазута;

0,65 – при сжигании газообразных топлив);

$a_T = 0,2 \dots 0,9$  – степень черноты топки;

$H_L$  – лучевоспринимающая поверхность нагрева,  $m^2$ ;

$\varphi$  – коэффициент сохранения теплоты;

$B_p$  – расчетный расход топлива,  $kg/s$ ;

$V_{cp}$  – средняя суммарная теплоемкость продуктов сгорания

1  $kg$  ( $1 m^3$ ) топлива в интервале температур  $\theta_m - \theta_m''$ ,  $kJ/(kg \cdot K)$ .

**Лучевоспринимающая поверхность ( $m^2$ ) нагрева топки**

$$H_L = \frac{B_p Q_L}{5,7 \cdot 10^{-11} M \zeta \alpha_T T_m'' T_m^3} \sqrt[3]{\frac{1}{M^2} \left( \frac{T_m''}{T_m} - 1 \right)^2}, \quad (2.37)$$

где  $T_m''$  – абсолютная температура газов на выходе из топки,  $K$ .

**Задача 2.38.** Определить полезное тепловыделение в топке котельного агрегата, работающего на подмосковном угле марки Б2 состава:  $C^p = 28,7\%$ ;  $H^p = 2,2\%$ ;  $S_L^p = 2,7\%$ ;  $N^p = 0,6\%$ ;  $O^p = 8,6\%$ ;  $A^p = 25,2\%$ ;  $W^p = 32,0\%$ , если известны температура топлива на входе в топку  $t_m = 20^\circ C$ , температура воздуха в котельной  $t_B = 30^\circ C$ , температура горячего воздуха  $t_{ГВ} = 300^\circ C$ , коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,3$ , присос воздуха в топочной камере  $\Delta\alpha_T = 0,05$ , потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива  $q_3 = 0,5\%$ , потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4 = 3\%$ , объем рециркулирующих газов  $V_{rc} = 1,1 m^3/kg$ , температура рециркулирующих газов  $\theta_{rc} = 1000^\circ C$  и средняя объемная теплоемкость рециркулирующих газов  $c'_{rc} = 1,415 kJ/(m^3 K)$ .

*Ответ:*  $Q_m = 13551 kJ/kg$ .

**Задача 2.39.** Определить, на сколько изменится полезное тепловыделение в топке котельного агрегата за счет подачи к горелкам предварительно подогретого воздуха, если известны температура воздуха в котельной  $t_B = 30^\circ C$ , температура горячего воздуха  $t_{ГВ} = 250^\circ C$ , коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,15$ , присос воздуха в топочной камере  $\Delta\alpha_T = 0,05$  и потери

теплоты от химической неполноты сгорания топлива  $q_3=1\%$ . Котельный агрегат работает на природном газе Саратовского месторождения состава:  $\text{CO}_2=0,8\%$ ;  $\text{CH}_4=84,5\%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6=3,8\%$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8=1,9\%$ ;  $\text{C}_4\text{H}_{10}=0,9\%$ ;  $\text{C}_5\text{H}_{12}=0,3\%$ ;  $\text{N}_2=7,8\%$ .

*Ответ:*  $\Delta Q_m=3027$  кДж/м<sup>3</sup>.

**Задача 2.40.** Определить теоретическую температуру горения топлива в топке котельного агрегата, работающего на донецком угле марки Д состава:  $\text{C}^p=49,3\%$ ;  $\text{H}^p=3,6\%$ ;  $\text{S}_l^p=3,0\%$ ;  $\text{N}^p=1,0\%$ ;  $\text{O}^p=8,3\%$ ;  $\text{A}^p=21,8\%$ ;  $\text{W}^p=13,0\%$ , если известны температура воздуха в котельной  $t_b=30^\circ\text{C}$ , температура горячего воздуха  $t_{\text{ГВ}}=295^\circ\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_{\text{T}}=1,3$ , присос воздуха в топочной камере  $\Delta\alpha_{\text{T}}=0,05$ , потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива  $q_3=0,5\%$ , потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4=3\%$  и потери теплоты с физической теплотой шлака  $q_6=0,5\%$ .

**Решение:** Низшую теплоту сгорания рабочей массы топлива определяем по формуле (1.12):

$$Q_n^p = 338\text{C}^p + 1025\text{H}^p - 108,5(\text{O}^p - \text{S}_l^p) - 25\text{W}^p = 338 \cdot 49,3 + 1025 \cdot 3,6 - 108,5(8,3 - 3,0) - 25 \cdot 13,0 = 19453 \text{ кДж/кг.}$$

Теоретически необходимый объем воздуха, по (1.27),

$$V^0 = 0,089\text{C}^p + 0,226\text{H}^p + 0,033(\text{S}_l^p - \text{O}^p) = 0,089 \cdot 49,3 + 0,266 \cdot 3,6 + 0,033(3,0 - 8,3) = 5,17 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Теплоту, вносимую в топку воздухом, подогретым вне котлоагрегата, определяем по формуле (2.7):

$$Q_{\text{в.вн}} = \alpha_{\text{T}} V^0 c_{\text{pv}} \Delta t_{\text{в}} = 1,2 \cdot 5,17 \cdot 1,33 \cdot 265 = 2187 \text{ кДж/кг.}$$

Располагаемую теплоту находим по формуле (2.3):

$$Q_p^p = Q_n^p + Q_{\text{в.вн}} = 19453 + 2187 = 21640 \text{ кДж/кг.}$$

Теплоту, вносимую в топку с воздухом, определяем по (2.32)

$$Q_{\text{в}} = (\alpha_{\text{T}} - \Delta\alpha_{\text{T}}) V^0 (c\theta)_{\text{зв}} + \Delta\alpha_{\text{T}} V^0 (c\theta)_{\text{хв}} = (1,2 - 0,05) 5,17 \cdot 396 + 0,05 \cdot 5,17 \cdot 40 = 2364 \text{ кДж/кг.}$$

Значения энтальпий  $(c\theta)_{\text{зв}}$  и  $(c\theta)_{\text{хв}}$  находим по табл. 1 (см. Приложение).

Полезное тепловыделение в топке, по формуле (2.31),

$$\begin{aligned} Q_m &= Q_p^p \left( \frac{100 - q_3 - q_4 - q_6}{100 - q_4} \right) + Q'_B - Q_{B.BH} = \\ &= 21640 \left( \frac{100 - 0,5 - 3 - 0,5}{100 - 3} \right) + 2364 - 2187 = \\ &= 21601 \text{ кДж / кг} \end{aligned}$$

Зная полезное тепловыделение в топке, определяем теоретическую температуру горения с помощью  $I\theta$ -диаграммы. Для этого задаем два значения температуры газов (1400 и 2000°C) и вычисляем для них энтальпии продуктов сгорания.

Объем трехатомных газов, по формуле (1.33),

$$V_{RO_2} = 0,0187(C^P + 0,375S_{л}^P) = 0,0187(49,3 + 0,375 \cdot 3,0) = 0,94 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретический объем азота, по формуле (1.32),

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + \frac{0,8N^P}{100} = 0,79 \cdot 5,17 + \frac{0,8 \cdot 1,0}{100} = 4,09 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретический объем водяных паров, по формуле (1.35),

$$\begin{aligned} V_{H_2O}^0 &= 0,0124(9H^P + W^P) + 0,0161V^0 = \\ &= 0,0124(9 \cdot 3,6 + 13,0) + 0,0161 \cdot 5,17 = 0,64 \text{ м}^3/\text{кг}. \end{aligned}$$

Энтальпия продуктов сгорания при  $\alpha_T = 1$  и  $\theta_2 = 1400^\circ\text{C}$ , по формуле (1.61),

$$\begin{aligned} I_z^0 &= V_{RO_2}(c\theta)_{CO_2} + V_{N_2}^0(c\theta)_{N_2} + V_{H_2O}^0(c\theta)_{H_2O} \\ &= 0,94 \cdot 3240 + 4,09 \cdot 2009 + 0,64 \cdot 2558 = \\ &= 2900 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

Значения энтальпий  $(c\theta)_{CO_2}$ ,  $(c\theta)_{N_2}$  и  $(c\theta)_{H_2O}$  находим по табл. 1 (см. Приложение).

Энтальпия воздуха при  $\alpha_T = 1$  и  $\theta_2 = 1400^\circ\text{C}$ , по (1.62),

$$\text{электростанции } I_{\epsilon}^0 = V^0(c\theta)_{\epsilon} = 5,17 \cdot 2076 = 10733 \text{ кДж/кг}.$$

Энтальпию  $(c\theta)_{\epsilon}$  находим по табл. 1 (см. Приложение).

Энтальпия продуктов сгорания, по формуле (1.60), при  $\theta_2 = 1400^\circ\text{C}$

$$I_m = I_z^0 + (\alpha_T - 1)I_{\epsilon}^0 = 2900 + (1,3 - 1)10733 = 16120 \text{ кДж/кг};$$

при  $\theta_2=2000^\circ\text{C}$

$$I_m = I_z^0 + (\alpha_T - 1)I_g^0 = V_{RO_2}(c\theta)_{CO_2} + V_{N_2}^0(c\theta)_{N_2} + V_{H_2O}^0(c\theta)_{H_2O} + (\alpha_T - 1)V^0(c\theta)_g = 0,94 \cdot 4843 + 4,09 \cdot 2964 + 0,64 \cdot 3926 + (1,3 - 1)5,17 \cdot 3064 = 23\,940 \text{ кДж/кг.}$$

По найденным значениям энтальпий продуктов сгорания строим  $I\theta$ -диаграмму (рис. 2.1). С помощью диаграммы по полезному тепловыделению в топке  $Q_m = I_m = 21601$  кДж/кг находим теоретическую температуру горения  $\theta_m = 1820^\circ\text{C}$ .

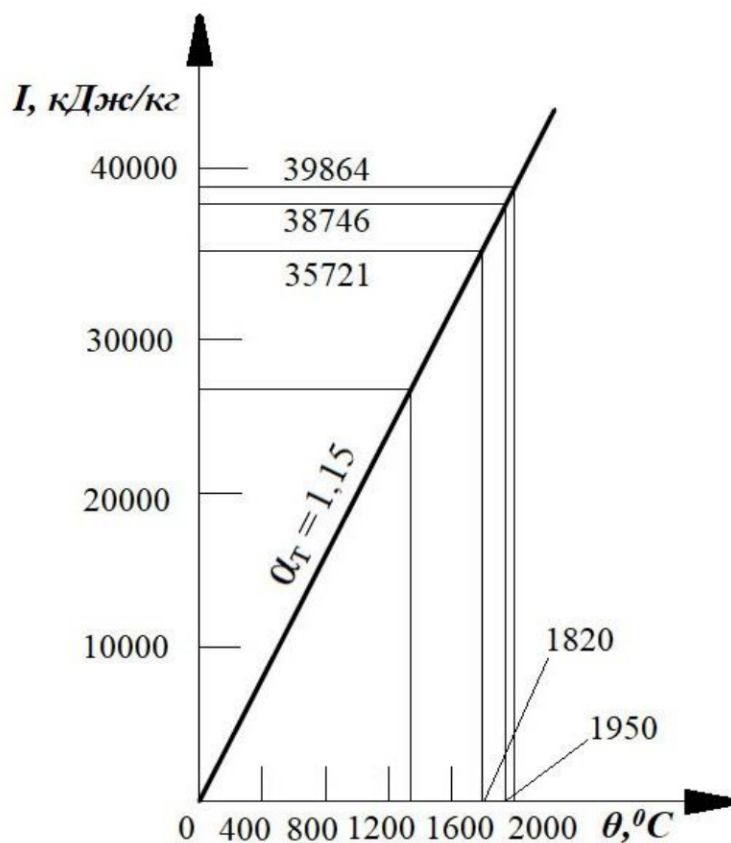


Рис.2.1.

**Задача 2.41.** Определить теоретическую температуру горения и топке котельного агрегата, работающего на природном газе состава:  $\text{CH}_4=92,2\%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6=0,8\%$ ;  $\text{C}_4\text{H}_{10}=0,1\%$ ;  $\text{N}_2=6,9\%$ , если известны температура воздуха в котельной  $t_{\text{в}}=30^\circ\text{C}$ , температура горячего воздуха  $t_{\text{т.в}}=250^\circ\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T=1,1$ , присос воздуха в топочной камере  $\Delta\alpha_T=0,04$  и потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива  $q_3=1\%$ .

Ответ:  $\theta_m=2020^\circ\text{C}$ .

**Задача 2.42.** Определить, на сколько изменится теоретическая температура горения в топке котельного агрегата за счет подачи к горелкам предварительно подогретого воздуха, если известны температура воздуха в котельной  $t_{\text{в}}=30^\circ\text{C}$ , температура горячего воздуха  $t_{\text{т.в}}=250^\circ\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_{\text{т}}=1,15$ , присос воздуха в топочной камере  $\Delta\alpha_{\text{т}}=0,05$  и потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива  $q_3=1,0\%$ . Котельный агрегат работает на природном газе Ставропольского месторождения состава:  $\text{CO}_2=0,2\%$ ;  $\text{CH}_4=98,2\%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6=0,4\%$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8=0,1\%$ ;  $\text{C}_4\text{H}_{10}=0,1\%$ ;  $\text{N}_2=1,0\%$ .

**Решение:** Низшую теплоту сгорания рабочей массы определяем по формуле (1.13):

$$Q_n^p = 358\text{CH}_4 + 638\text{C}_2\text{H}_6 + 913\text{C}_3\text{H}_8 + 1187\text{C}_4\text{H}_{10} = \\ = 358 \cdot 98,2 + 638 \cdot 0,4 + 913 \cdot 0,1 + 1187 \cdot 0,1 = 35621 \text{ кДж/м}^3.$$

Теоретически необходимый объем воздуха, по (1.28),  
 $V^0 = 0,0478[0,5(\text{CO} + \text{H}_2) + 1,5\text{H}_2\text{S} + 2\text{CH}_4 + \Sigma(m+n/4)\text{C}_m\text{H}_n - \text{O}_2] = \\ = 0,0478(2 \cdot 98,2 + 3,5 \cdot 0,4 + 5 \cdot 0,1 + 6,5 \cdot 0,1) = 9,51 \text{ м}^3/\text{м}^3.$

Теплоту, вносимую в топку воздухом, подогретым вне котлоагрегата, определяем по формуле (2.7):

$$Q_{\text{в.вн}} = \alpha_{\text{т}} V^0 c'_{\text{pv}} \Delta t_{\text{в}} = 1,15 \cdot 9,51 \cdot 1,33 \cdot 220 = 3200 \text{ кДж/м}^3.$$

Располагаемую теплоту находим по формуле (2.3):

$$Q_p^p = Q_n^p + Q_{\text{в.вн}} = 35621 + 3200 = 38821 \text{ кДж/м}^3.$$

Теплота, вносимая в топку с воздухом, по формуле (2.32),

$$Q_{\text{в}} = (\alpha_{\text{т}} - \Delta\alpha_{\text{т}}) V^0 (c\theta)_{\text{зв}} + \Delta\alpha_{\text{т}} V^0 (c\theta)_{\text{хв}} = (1,15 - \\ 0,05) 9,51 \cdot 334 + 0,05 \cdot 9,51 \cdot 40 = 3513 \text{ кДж/м}^3.$$

Значения энтальпий  $(c\theta)_{\text{зв}}$  и  $(c\theta)_{\text{хв}}$  находим по табл. 1 (см. Приложение).

Полезное тепловыделение в топке при подаче к горелкам подогретого воздуха находим по формуле (2.31):

$$Q_{\text{мл}} = Q_p^p \frac{100 - q_3}{100} + Q_{\text{в}}' - Q_{\text{вн}} = 38821 \frac{100 - 1}{100} + 3513 - 3200 = \\ = 38746 \text{ кДж/м}^3.$$



Полезное тепловыделение в топке при подаче к горелкам воздуха без предварительного подогрева определяем, пользуясь формулой (2.31):

$$Q_{m2} = Q_n^c \frac{100 - q_3}{100} + \alpha_T V^0 (c\theta)_{x_6} + \Delta \alpha_T V^0 (c\theta)_{x_6} =$$

$$= 35621 \frac{100 - 1}{100} + 1,15 \cdot 9,51 \cdot 40 + 0,05 \cdot 9,51 \cdot 40 = 35\,721 \text{ кДж/м}^3.$$

Зная полезные тепловыделения в топке, находим теоретические температуры горения с помощью  $I\theta$ -диаграммы. Для этого задаем два значения температуры газов (1400 и 2000°C) и вычисляем для них энтальпии продуктов сгорания.

Объем трехатомных газов, по формуле (1.39),

$$V_{RO_2} = 0,01 [CO_2 + CO + H_2S + \sum m C_m H_n] =$$

$$= 0,01 (0,2 + 98,2 + 2 \cdot 0,4 + 3 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,1) = 1,0 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Теоретический объем азота, по формуле (1.38),

$$V_{N_2}^0 = 0,79 V^0 + \frac{N_2}{100} = 0,79 \cdot 9,51 + \frac{1}{100} = 7,52 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Теоретический объем водяных паров, по формуле (1.41),

$$V_{H_2O}^0 = 0,01 [H_2S + H_2 + \sum (n/2) C_m H_n + 0,124 d_2] + 0,0161 V^0 =$$

$$= 0,01 (298,2 + 30,4 + 40,1 + 50,1) + 0,0161 \cdot 9,51 = 2,13 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Энтальпия продуктов сгорания при  $\alpha_T = 1$  и  $\theta_2 = 1400^\circ\text{C}$ , по формуле (1.61),

$$I_z^0 = V_{RO_2} (c\theta)_{CO_2} + V_{N_2}^0 (c\theta)_{N_2} + V_{H_2O}^0 (c\theta)_{H_2O} =$$

$$= 1,0 \cdot 3240 + 7,52 \cdot 2009 + 2,13 \cdot 2558 = 23786 \text{ кДж/м}^3.$$

Энтальпия воздуха при  $\alpha_T = 1$  и  $\theta_2 = 1400^\circ\text{C}$ , по (1.62),

$$I_\epsilon^0 = V^0 (c\theta)_\epsilon = 9,51 \cdot 2076 = 19\,743 \text{ кДж/м}^3.$$

Энтальпия продуктов сгорания, по формуле (1.60), при  $\theta_2 = 1400^\circ\text{C}$

$$I_m = I_z^0 + (\alpha_T - 1) I_\epsilon^0 = 23786 + (1,15 - 1) 19743 = 26747 \text{ кДж/м}^3;$$

при  $\theta_2 = 2000^\circ\text{C}$

$$I_m = I_z^0 + (\alpha_T - 1) I_\epsilon^0 =$$

$$= V_{RO_2} (c\theta)_{CO_2} + V_{N_2}^0 (c\theta)_{N_2} + V_{H_2O}^0 (c\theta)_{H_2O} + (\alpha_T - 1) V^0 (c\theta)_\epsilon =$$

$$=1,0 \cdot 4843 + 7,52 \cdot 2964 + 2,13 \cdot 3926 + (1,15 - 1) 9,51 \cdot 3064 = 39864 \text{ кДж/м}^3.$$

По найденным значениям энтальпий продуктов сгорания строим  $I\theta$ -диаграмму (рис. 2.2). С помощью диаграммы по полезным тепловыделениям в топке  $Q_{m1} = I_{m1} = 38746 \text{ кДж/м}^3$  и  $Q_{m2} = I_{m2} = 35721 \text{ кДж/м}^3$  находим теоретические температуры горения:  $\theta_{m1} = 1950^\circ\text{C}$ ;  $\theta_{m2} = 1820^\circ\text{C}$ .

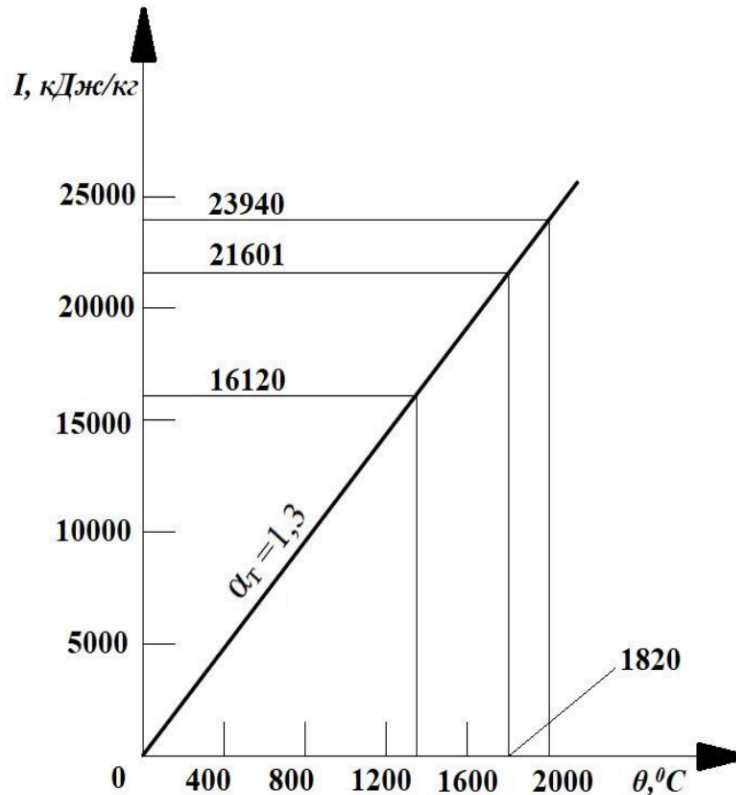


Рис.2.2.

Теоретическая температура горения в топке котлоагрегата за счет подачи к горелкам подогретого воздуха изменится на

$$\Delta\theta_m = \theta_{m1} - \theta_{m2} = 1950 - 1820 = 130^\circ\text{C}.$$

**Задача 2.43.** Определить температуру газов на выходе из топки котельного агрегата паропроизводительностью  $D = 13,9 \text{ кг/с}$ , работающего на подмосковном угле марки Б2 состава:  $C^p = 28,7\%$ ;  $H^p = 2,2\%$ ;  $S_n^p = 2,7\%$ ;  $N^p = 0,6\%$ ;  $O^p = 8,6\%$ ;  $A^p = 25,2\%$ ;  $W^p = 32,0\%$ , если известны температура топлива на входе в топку  $t_T = 20^\circ\text{C}$ , давление перегретого пара  $p_{пп} = 4 \text{ МПа}$ , температура перегретого пара  $t_{пп} = 450^\circ\text{C}$ , температура питательной воды

$t_{пв}=150^{\circ}\text{C}$ , величина непрерывной продувки  $P=4\%$ , теплоемкость рабочей массы топлива  $c_m^p=2,1$  кДж/(кг·К), КПД котлоагрегата (брутто)  $\eta_{ка}^{бр}=86,8\%$ , теоретическая температура зрания топлива в топке  $\theta_m=1631^{\circ}\text{C}$ , условный коэффициент загрязнения  $\zeta=0,6$ , степень черноты топки  $a_T=0,708$ , лучевоспринимающая поверхность нагрева  $H_L=239$  м<sup>2</sup>, средняя суммарная теплоемкость продуктов сгорания  $V_{c_p}=8,26$  кДж/(кг·К) в интервале температур  $\theta_m - \theta_m''$ , расчетный коэффициент, зависящий от относительного местоположения максимума температуры в топке,  $M=0,45$ , потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4=2\%$  и потери теплоты в окружающую среду  $q_5=0,9\%$ .

**Решение:** Низшую теплоту сгорания рабочей массы топлива определяем по формуле (1.12):

$$Q_n^p = 338C^p + 1025H^p - 108,5(O^p - S_n^p) - 25W^p = 338 \cdot 28,7 + 1025 \cdot 2,2 - 108,5(8,6 - 2,7) - 25 \cdot 32,0 = 10516 \text{ кДж/кг.}$$

Физическую теплоту топлива находим по формуле (2.4):

$$Q_{мл} = c_m^p t_T = 2,1 \cdot 20 = 42 \text{ кДж/кг.}$$

Располагаемую теплоту определяем по формуле (2.3):

$$Q_p^p = Q_n^p + Q_{мл} = 10516 + 42 = 10558 \text{ кДж/кг.}$$

Натуральный расход топлива, по формуле (2.25),

$$B = \frac{D_{пс} \left[ (i_{пп} - i_{пв}) + \left( \frac{P}{100} \right) (i_{кв} - i_{пв}) \right]}{Q_p^p \eta_{ка}^{бр}} 100 =$$

$$= \frac{13,9 \left[ (3330 - 628) + 0,04(1087,5 - 628) \right]}{10558 \cdot 86,8} 100 =$$

$$= 4,12 \text{ кг/с}$$

$D_{не} = D$ , так как отсутствует отбор насыщенного пара.

Расчетный расход топлива, по формуле (2.26),

$$B_p = B(1 - q_4/100) = 4,12(1 - 2/100) = 4,04 \text{ кг/с.}$$

Коэффициент сохранения теплоты, по формуле (2.34),

$$\varphi=1-q_5/100=1-0,9/100=0,991.$$

Температура газов на выходе из топки, по формуле (2.36),

$$\begin{aligned} \theta_m'' &= \frac{T_m}{M \left( \frac{5,7 \cdot 10^{-11} \zeta H_{\text{л}} \alpha_T T_m^3}{\varphi B_p V c_p} \right)^{0,6} + 1} - 273 = \\ &= \frac{1904}{0,45 \left( \frac{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot 0,6 \cdot 239 \cdot 0,708 \cdot 1904^3}{0,991 \cdot 4,04 \cdot 8,26} \right)^{0,6} + 1} - 273 = 997^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

**Задача 2.44.** Определить температуру газов на выходе из топки котельного агрегата паропроизводительностью  $D=13,5$  кг/с, работающего на донецком угле марки ПА с низшей теплотой сгорания  $Q_n^p=25\,265$  кДж/кг, если известны давление перегретого пара  $p_{\text{пп}}=4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{\text{пп}}=450^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{\text{пв}}=100^\circ\text{C}$ , величина непрерывной продувки  $P=3\%$ , КПД котлоагрегата (брутто)  $\eta_{\text{ка}}^{\text{бр}}=86,7\%$ , теоретическая температура горения топлива в топке  $\theta_m=2035^\circ\text{C}$ , условный коэффициент загрязнения  $\zeta=0,6$ , степень черноты топки  $a_T=0,546$ , лучевоспринимающая поверхность нагрева  $H_{\text{л}}=230$  м<sup>2</sup>, средняя суммарная теплоемкость продуктов сгорания топлива  $Vc_p=15,4$  кДж/(кг·К) в интервале температур  $\theta_m - \theta_m$ , расчетный коэффициент, зависящий от относительного положения максимума температуры в топке,  $M=0,45$ , потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4=4\%$  и потери теплоты в окружающую среду  $q_5=0,9\%$ .

*Ответ:*  $\theta_m''=1082^\circ\text{C}$ .

**Задача 2.45.** Определить температуру газов на выходе из топки котельного агрегата паропроизводительностью  $D=12,6$  кг/с, работающего на фрезерном торфе с низшей теплотой сгорания  $Q_n^p=1125$  кДж/кг, если известны температура топлива на входе в топку  $t_T=20^\circ\text{C}$ , давление перегретого пара  $p_{\text{пп}}=4$  МПа,

температура перегретого пара  $t_{\text{пп}}=450^{\circ}\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{\text{пв}}=150^{\circ}\text{C}$ , теплоемкость рабочей массы топлива  $c_m^p=2,64$  кДж/(кг·К), КПД котлоагрегата (брутто)  $\eta_{\text{ка}}^{6p}=85\%$ , теоретическая температура горения топлива в топке  $\theta_m=1487^{\circ}\text{C}$ , условный коэффициент загрязнения  $\zeta=0,6$ , степень черноты топки  $a_T=0,729$ , лучевоспринимающая поверхность нагрева  $H_L=240$  м<sup>2</sup>, в интервале температур  $\theta_m - \theta_m''$ , средняя суммарная теплоемкость продуктов сгорания топлива  $V_{c_p}=7,37$  кДж/(кг·К), расчетный коэффициент, зависящий от относительного местоположения максимума температуры в топке,  $M=0,45$ , потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4=2\%$  и потери теплоты в окружающую среду  $q_5=0,9\%$ .

*Ответ:*  $\theta_m''=974^{\circ}\text{C}$ .

**Задача 2.46.** Определить количество теплоты, переданное лучевоспринимающим поверхностям топки котельного агрегата, работающего на донецком каменном угле марки Т состава:  $C^p=62,7\%$ ;  $H^p=3,1\%$ ;  $S_l^p=2,8\%$ ;  $N^p=0,9\%$ ;  $O^p=1,7\%$ ;  $A^p=23,8\%$ ;  $W^p=5,0\%$ , если известны температура воздуха в котельной  $t_b=30^{\circ}\text{C}$ , температура горячего воздуха  $t_{\text{гв}}=300^{\circ}\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T=1,25$ , присос воздуха в топочной камере  $\Delta\alpha_T=0,05$ , температура газов на выходе из топки  $\theta_m''=1100^{\circ}\text{C}$ , потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива  $q_3=0,6\%$ , потери теплоты от механической неполноты сгорания  $q_4=3\%$ , потери теплоты в окружающую среду  $q_5=0,5\%$  и потери теплоты с физической теплотой шлака  $q_6=0,4\%$ .

**Решение:** Низшую теплоту сгорания рабочей массы топлива определяем по формуле (1.12):

$$Q_n^p = 338C^p + 1025H^p - 108,5(O^p - S_l^p) - 25W^p = \\ = 338 \cdot 62,7 + 1025 \cdot 3,1 - 108,5(1,7 - 2,8) - 25 \cdot 5,0 = 24365 \text{ кДж/кг.}$$

Теоретически необходимый объем воздуха находим по (1.27):

$$V^0 = 0,089C^p + 0,226H^p + 0,033(S_l^p - O^p) =$$

$$=0,089 \cdot 62,7 + 0,266 \cdot 3,1 + 0,033(2,8 - 1,7) = 6,44 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теплоту, вносимую в топку воздухом, подогретым вне котлоагрегата, определяем по формуле (2.7):

$$Q_{в.вн} = \alpha_T V^0 c_{pv} \Delta t_B = 1,25 \cdot 6,44 \cdot 1,33 \cdot 270 = 2889 \text{ кДж/кг}.$$

Располагаемую теплоту находим по формуле (2.3):

$$Q_p^p = Q_n^p + Q_{в.вн} = 24365 + 2889 = 27254 \text{ кДж/кг}.$$

Теплоту, вносимую в топку с воздухом, определяем по формуле (2.32):

$$Q_v = (\alpha_T - \Delta\alpha_T) V^0 (c\theta)_{zv} + \Delta\alpha_T V^0 (c\theta)_{xv} = \\ = (1,25 - 0,05) \cdot 6,44 \cdot 403 + 0,05 \cdot 6,44 \cdot 40 = 3127 \text{ кДж/кг}.$$

Значения энтальпий  $(c\theta)_{zv}$  и  $(c\theta)_{xv}$  находим по табл. 1 (см. Приложение).

Полезное тепловыделение в топке находим по формуле (2.31):

$$Q_m = Q_p^p \left( \frac{100 - q_3 - q_4 - q_6}{100 - q_4} \right) + Q_v - Q_{в.вн} = \\ = 27254 \left( \frac{100 - 0,6 - 3 - 0,4}{100 - 3} \right) + 3127 - 2889 = \\ = 27220 \text{ кДж / кг}$$

Объем трехатомных газов определяем по формуле (1.33):

$$V_{RO_2} = 0,0187(C^p + 0,375S_l^p) = 0,0187(62,7 + 0,375 \cdot 2,8) = 1,19 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретический объем азота находим по формуле (1.32):

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + \frac{0,8N^p}{100} = 0,79 \cdot 6,44 + \frac{0,8 \cdot 0,9}{100} = 5,09 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретический объем водяных паров определяем по формуле (1.35):

$$V_{H_2O}^0 = 0,0124(9H^p + W^p) + 0,0161V^0 = \\ = 0,0124(9 \cdot 3,1 + 5,0) + 0,0161 \cdot 6,44 = 0,51 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Энтальпию продуктов сгорания при  $\alpha_T = 1$  и температуре газов  $\theta_m'' = 1100^\circ\text{C}$  находим по формуле (1.61):

$$I_z^0 = V_{RO_2} (c\theta)_{CO_2} + V_{N_2}^0 (c\theta)_{N_2} + V_{H_2O}^0 (c\theta)_{H_2O} = \\ = 1,19 \cdot 2457 + 5,09 \cdot 1545 + 0,51 \cdot 1926 = 11774 \text{ кДж/кг.}$$

Значения энтальпий  $(c\theta)_{CO_2}$ ,  $(c\theta)_{N_2}$  и  $(c\theta)_{H_2O}$  находим по табл. 1 (см. Приложение).

Энтальпия воздуха при  $\alpha_T=1$  и температуре газов  $\theta_m''=1100^\circ\text{C}$ , по формуле (1.62),

$$I_g^0 = V^0(c\theta)_g = 6,44 \cdot 1595 = 10\,272 \text{ кДж/кг.}$$

Значение  $(c\theta)_g$  находим по табл. 1 (см; Приложение).

Энтальпия продуктов сгорания при  $\theta_m''=1100^\circ\text{C}$ , по формуле (1.60),

$$I_m^0 = I_z^0 + (\alpha_T - 1)I_g^0 = 1774 + (1,25 - 1)10272 = 14342 \text{ кДж/кг.}$$

Коэффициент сохранения теплоты, по формуле (2.34),

$$\varphi = 1 - q_5/100 = 1 - 0,5/100 = 0,995.$$

Количество теплоты, переданное лучевоспринимающим поверхностям топки, находим по формуле (2.30):

$$Q_l = \varphi(Q_m - I_m) = 0,995(27220 - 14342) = 12\,814 \text{ кДж/кг.}$$

**Задача 2.47.** Определить количество теплоты, переданное лучевоспринимающим поверхностям топки котельного агрегата, работающего на карагандинском угле марки К состава:  $C^p=54,7\%$ ;  $H^p=3,3\%$ ;  $S_l^p=0,8\%$ ;  $N^p=0,8\%$ ;  $O^p=4,8\%$ ;  $A^p=27,6\%$ ;  $W^p=8,0\%$ , если известны температура воздуха в котельной  $t_g=30^\circ\text{C}$ , температура горячего воздуха  $t_{ТВ}=350^\circ\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,3$ , присос воздуха в топочной камере  $\Delta\alpha_T = 0,05$ , температура газов на выходе из топки  $\theta_m''=1000^\circ\text{C}$ , потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива  $q_3=0,6\%$ , потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4=3,0\%$ , потери теплоты в окружающую среду  $q_5=0,5\%$  и потери теплоты с физической теплотой шлака  $q_6=0,4\%$ .

*Ответ:*  $Q_l=12467 \text{ кДж/кг.}$

**Задача 2.48.** Определить количество теплоты, переданное лучевоспринимающим поверхностям топки котельного агрегата, работающего на природном газе состава:  $\text{CO}_2=0,2\%$ ;  $\text{CH}_4=97,9\%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_4=0,1\%$ ;  $\text{N}_2=1,8\%$ , если известны температура воздуха в котельной  $t_{\text{в}}=30^\circ\text{C}$ , температура горячего воздуха  $t_{\text{ГВ}}=230^\circ\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_{\text{т}}=1,1$ , присос воздуха в топочной камере  $\Delta\alpha_{\text{т}}=0,05$ , температура газов на выходе из топки  $\theta_m''=1000^\circ\text{C}$ , потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива  $q_3=1\%$  и потери теплоты в окружающую среду  $q_5=1,0\%$ .

*Ответ:*  $Q_{\text{л}}=20\,673$  кДж/кг.

**Задача 2.49.** Определить количество теплоты, переданное лучевоспринимающим поверхностям топки котельного агрегата, работающего на высокосернистом мазуте состава:  $\text{C}^{\text{p}}=83,0\%$ ;  $\text{H}^{\text{p}}=10,4\%$ ;  $\text{S}_{\text{л}}^{\text{p}}=2,8\%$ ;  $\text{O}^{\text{p}}=0,7\%$ ;  $\text{A}^{\text{p}}=0,1\%$ ;  $\text{W}^{\text{p}}=3,0\%$ , если известны полезное тепловыделение в топке  $Q_m=39100$  кДж/кг, коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_{\text{т}}=1,15$ , температура газов на выходе из топки  $\theta_m''=1100^\circ\text{C}$  и потери теплоты в окружающую среду  $q_5=1,0\%$ .

*Ответ:*  $Q_{\text{л}}=17546$  кДж/кг.

**Задача 2.50.** Определить количество теплоты, переданное лучевоспринимающим поверхностям топки котельного агрегата, работающего на донецком угле марки Д с низшей теплотой сгорания  $Q_{\text{н}}^{\text{p}}=19453$  кДж/кг, если известны температура воздуха в котельной  $t_{\text{в}}=30^\circ\text{C}$ , температура горячего воздуха  $t_{\text{ГВ}}=295^\circ\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_{\text{т}}=1,3$ , присос воздуха в топочной камере  $\Delta\alpha_{\text{т}}=0,05$ , теоретически необходимый объем воздуха  $V^0=5,17$  м<sup>3</sup>/кг, энтальпия продуктов сгорания  $I_m''=12160$  кДж/кг, потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива  $q_3=0,7\%$ , потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4=3\%$ , потери теплоты в окружающую среду  $q_5=0,5\%$  и потери теплоты с физической теплотой шлака  $q_6=0,3\%$ .

*Ответ:*  $Q_{\text{л}}=9394$  кДж/кг.



**Задача 2.51.** Определить лучевоспринимающую поверхность нагрева топки котельного агрегата паропроизводительностью  $D=4,09$  кг/с, работающего на природном газе Ставропольского месторождения с низшей теплотой сгорания  $Q_n^p=35621$  кДж/м<sup>3</sup>, если известны давление перегретого пара  $p_{пп}=4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{пп}=425^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{пв}=130^\circ\text{C}$ , величина непрерывной продувки  $P=3\%$ , теоретически необходимый объем воздуха  $V^0=9,51$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, КПД котлоагрегата (брутто)  $\eta_{ка}^{бp}=90\%$ , температура воздуха в котельной  $t_{в}=30^\circ\text{C}$ , температура горячего воздуха  $t_{гв}=250^\circ\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T=1,15$ , присос воздуха в топочной камере  $\Delta\alpha_T=0,05$ , теоретическая температура горения топлива в топке  $\theta_m=2040^\circ\text{C}$ , температура газов на выходе из топки  $\theta_m''=1000^\circ\text{C}$ , энтальпия продуктов сгорания при  $\theta_m'' I_m''=17500$  кДж/м<sup>3</sup>, условный коэффициент загрязнения  $\zeta=0,65$ , степень черноты топки  $a_T=0,554$ , расчетный коэффициент, зависящий от относительного местоположения максимума температуры в топке,  $M=0,44$ , потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива  $q_3=1\%$  и потери теплоты в окружающую среду  $q_5=1,0\%$ .

**Решение:** Теплоту, вносимую в топку воздухом, подогретым вне котлоагрегата, определяем по формуле (2.7):

$$Q_{в.вн} = \alpha_T V^0 c_{pv} \Delta t_{в} = 1,15 \cdot 9,51 \cdot 1,33 \cdot 220 = 3200 \text{ кДж/м}^3.$$

Располагаемую теплоту находим по формуле (2.3):

$$Q_p^p = Q_n^p + Q_{в.вн} = 35621 + 3200 = 38821 \text{ кДж/м}^3.$$

Расчетный расход топлива, по формуле (2.25),

$$B = \frac{D_{ne} \left[ (i_{nn} - i_{ns}) + \frac{P}{100} (i_{кв} - i_{ns}) \right]}{Q_p^p \eta_{ка}^{6p}} 100 =$$

$$= \frac{4,09 \left[ (3280 - 544) + \frac{3}{100} (1087,5 - 544) \right]}{38821 \cdot 90} 100 =$$

$$= 0,32 \text{ м}^3/\text{с}$$

Теплоту, вносимую в топку с воздухом, находим по (2.32):

$$Q'_в = (\alpha_T - \Delta\alpha_T) V^0 (c\theta)_{зв} + \Delta\alpha_T V^0 (c\theta)_{хв} =$$

$$= (1,15 - 0,05) 9,51 \cdot 334 + 0,05 \cdot 9,51 \cdot 40 = 3513 \text{ кДж/м}^3,$$

Значения энтальпий  $(c\theta)_{зв}$  и  $(c\theta)_{хв}$  находим по табл. 1 (см. Приложение).

Полезное тепловыделение в топке, по формуле (2.31),

$$Q_m = Q_p^p \frac{100 - q_3 - q_4 - q_6}{100 - q_4} + Q'_в - Q_{вн} = 38821 \frac{100 - 1}{100} + 3513 - 3200 =$$

$$= 38746 \text{ кДж/м}^3.$$

Коэффициент сохранения теплоты, по формуле (2.34),

$$\varphi = 1 - q_5/100 = 1 - 1,0/100 = 0,99.$$

Количество теплоты, переданное лучевоспринимающим поверхностям топки, определяем по формуле (2.30):

$$Q_l = \varphi (Q_m - I_m) = 0,99 (38746 - 17500) = 21\,034 \text{ кДж/м}^3.$$

Лучевоспринимающую поверхность нагрева находим по (2.37):

$$H_l = \frac{B_p Q_l}{5,7 \cdot 10^{-11} M \zeta \alpha_T T_m'' T_m^3} \sqrt[3]{\frac{1}{M^2} \left( \frac{T_m}{T_m''} - 1 \right)^2} =$$

$$= \frac{0,32 \cdot 21034}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot 0,44 \cdot 0,65 \cdot 0,554 \cdot 1273 \cdot 2313^3} \sqrt[3]{\frac{1}{0,44^2} \left( \frac{2313}{1273} - 1 \right)^2} =$$

$$= 73,4 \text{ м}^2.$$

**Задача 2.52.** Определить лучевоспринимающую поверхность нагрева топки котельного агрегата паропроизводительностью  $D=13,9$  кг/с, работающего на каменном угле с низшей

теплотой сгорания  $Q_n^p = 25070$  кДж/кг, если известны давление перегретого пара  $p_{пп} = 4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{пп} = 450^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{пв} = 150^\circ\text{C}$ , величина непрерывной продувки  $P = 4\%$ , теоретически необходимый объем воздуха  $V^0 = 6,64$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, КПД котлоагрегата (брутто)  $\eta_{ка}^{бр} = 87\%$ , температура воздуха в котельной  $t_{в} = 30^\circ\text{C}$ , температура горячего воздуха  $t_{гв} = 390^\circ\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,25$ , присос воздуха в топочной камере  $\Delta\alpha_T = 0,05$ , теоретическая температура горения топлива в топке  $\theta_m = 2035^\circ\text{C}$ , температура газов на выходе из топки  $\theta_m = 1080^\circ\text{C}$ , условный коэффициент загрязнения  $\zeta = 0,6$ , степень черноты топки  $a_T = 0,546$ , расчетный коэффициент, зависящий от относительного местоположения максимума температуры в топке,  $M = 0,45$ , потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива  $q_3 = 1,0\%$ , потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4 = 3\%$  и потери теплоты в окружающую среду  $q_5 = 1\%$ .

*Ответ:*  $H_{л} = 200$  м<sup>2</sup>.

**Задача 2.53.** Определить лучевоспринимающую поверхность нагрева топки котельного агрегата паропроизводительностью  $D = 13,8$  кг/с, работающего на высокосернистом мазуте состава:  $C^p = 83,0\%$ ;  $H^p = 10,4\%$ ;  $S_l^p = 2,8\%$ ;  $O^p = 0,7\%$ ;  $A^p = 0,1\%$ ;  $W^p = 3\%$ , если известны температура подогрева мазута  $t_T = 90^\circ\text{C}$ , КПД котлоагрегата (брутто)  $\eta_{ка}^{бр} = 86,7\%$ , давление перегретого пара  $p_{пп} = 1,4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{пп} = 250^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{пв} = 100^\circ\text{C}$ , величина непрерывной продувки  $P = 3\%$ , количество теплоты, переданное лучевоспринимающим поверхностям  $Q_{л} = 17400$  кДж/кг, теоретическая температура горения топлива в топке  $\theta_m = 2100^\circ\text{C}$ , температура газов на выходе из топки  $\theta_m = 1100^\circ\text{C}$ , условный коэффициент загрязнения  $\zeta = 0,55$ , степень черноты топки

$a_T=0,529$  и расчетный коэффициент, зависящий от относительного местоположения максимума температуры в топке,  $M=0,44$ .

Ответ:  $H_{л}=187,5 \text{ м}^2$ .

## 2.4. Расчет конвективных поверхностей нагрева котельного агрегата

**Пароперегреватели.** Количество теплоты (кДж/кг), воспринятое паром в пароперегревателе, определяется по формуле

$$Q_{ne} = \varphi \left[ I'_{ne} - I''_{ne} + \Delta\alpha_{ne} V^0 (c\theta)_{xв} \right] = \frac{D_{ne}}{B_p} (i_{nn} - i_{nn}), \quad (2.38)$$

где  $\varphi$  — коэффициент сохранения теплоты;

$I'_{ne}$  и  $I''_{ne}$  — энтальпия продуктов сгорания на входе в пароперегреватель и выходе из него, кДж/кг;

$\Delta\alpha_{ne}$  — присос воздуха в газоходе пароперегревателя;

$V^0$  — теоретически необходимый объем воздуха, м<sup>3</sup>/кг;

$(c\theta)_{xв}$  — энтальпия холодного воздуха, кДж/кг;

$D_{ne}$  — расход пара через пароперегреватель, кг/с;

$B_p$  — расчетный расход топлива, кг/с;

$i_{nn}$  и  $i_{nn}$  — энтальпии перегретого пара на выходе из пароперегревателя и насыщенного пара на входе в пароперегреватель, кДж/кг.

Конвективная поверхность (м<sup>2</sup>) нагрева пароперегревателя

$$H_{ne} = \frac{Q_{ne} B_p}{K_{ne} \Delta t_{ne}}, \quad (2.39)$$

где  $K_{ne}$  — коэффициент теплопередачи для пароперегревателя, кВт/(м<sup>2</sup>·К);

$\Delta t_{ne}$  — температурный напор в пароперегревателе, °С

Температурный напор как для прямотока, так и для противотока определяется как средне логарифмическая разность температур:

$$\Delta t_{ne} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{m}}{2,31 \lg \left( \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{m}} \right)} \quad (2.40)$$

где  $\Delta t_{\delta}$  – разность температур между продуктами сгорания и паром на том конце поверхности нагрева, где она наибольшая, °С;

$\Delta t_{m}$  – разность температур между продуктами сгорания и паром на том конце поверхности нагрева, где она наименьшая, °С.

Если  $\Delta t_{\delta}/\Delta t_{m} < 1,7$ , температурный напор определяется по формуле

$$\Delta t_{ne} = (\Delta t_{\delta} + \Delta t_{m})/2. \quad (2.41)$$

**Экономайзеры.** Количество теплоты (кДж/кг), воспринятое водой в экономайзере, определяется по формуле

$$Q_{\varepsilon} = \varphi [I'_{\varepsilon} - I''_{\varepsilon} + \Delta \alpha_{\varepsilon} V^0 (c\theta)_{x\varepsilon}] = \frac{D_{\varepsilon}}{B_p} (i''_{nv} - i'_{nv}) \quad (2.42)$$

где  $I'_{\varepsilon}$  и  $I''_{\varepsilon}$  – энтальпии продуктов сгорания на входе в экономайзер и выходе из него, кДж/кг;

$\Delta \alpha_{\varepsilon}$  – присос воздуха в газоходе экономайзера;

$D_{\varepsilon}$  – расход воды через экономайзер, кг/с;

$i''_{nv}$  и  $i'_{nv}$  – энтальпии воды (или пароводяной смеси) на выходе из экономайзера и на входе в экономайзер, кДж/кг.

Расход воды через экономайзер

$$D_{\varepsilon} = D(1 + P/100), \quad (2.43)$$

где  $P$  – величина непрерывной продувки, %.

Энтальпия воды на выходе из экономайзера

$$i''_{nv} = i'_{nv} + \frac{B_p Q_{\varepsilon}}{D_{\varepsilon}}. \quad (2.44)$$

Конвективная поверхность ( $m^2$ ) нагрева экономайзера

$$H_3 = \frac{Q_3 B_p}{\kappa_3 \Delta t_3}, \quad (2.45)$$

где  $\kappa_3$  – коэффициент теплопередачи для экономайзера, кВт/(м<sup>2</sup>·К);

$\Delta t_3$  – температурный напор в экономайзере, °С, определяется по формулам (2.40) и (2.41).

**Воздухоподогреватели.** Количество теплоты (кДж/кг), воспринятое воздухом в воздухоподогревателе, определяется по формуле

$$Q_{вп} = \varphi [I'_{вп} - I''_{вп} + \Delta\alpha_{вп} V^0 (c\theta)_{срв}] = (\beta_{вп} + \beta_{рц} + \Delta\alpha_{вп} / 2) (I''_в - I'_в), \quad (2.46)$$

где  $I'_{вп}$  и  $I''_{вп}$  – энтальпии продуктов сгорания на входе в воздухоподогреватель и выходе из него, кДж/кг;

$\Delta\alpha_{вп}$  — присос воздуха в воздухоподогревателе;

$(c\theta)_{срв}$  – энтальпия воздуха при средней температуре воздуха ( $t_{срв}$ ), кДж/кг;

$\beta_{вп}$  – отношение объема воздуха на выходе из воздухоподогревателя к теоретически необходимому;

$\beta_{рц}$  – доля рециркулирующего воздуха;

$I'_в$  и  $I''_в$  – энтальпии теоретически необходимого объема воздуха на выходе из воздухоподогревателя и входе в него, кДж/кг.

Средняя температура воздуха

$$t_{ср.в} = (t'_в + t''_в) / 2, \quad (2.47)$$

где  $t'_в$  и  $t''_в$  – температура воздуха на входе в воздухоподогреватель и выходе из него, °С.

Отношение объема воздуха на выходе из воздухоподогревателя к теоретически необходимому

$$\beta_{рц} = \alpha_T - \Delta\alpha_T - \Delta\alpha_{пл}, \quad (2.48)$$

где  $\alpha_T$  – коэффициент избытка воздуха в топке;

$\Delta\alpha_T$  – присос воздуха в топке;

$\Delta\alpha_{nl}$  – присос воздуха в пылеприготовительной установке.  
Доля рециркулирующего воздуха

$$\beta_{pc} = (\alpha_T - \Delta\alpha_T + \Delta\alpha_{en}) \frac{t'_{en} - t'_{xb}}{t'_{z8} - t'_{en}}$$

где  $t'_{en}$ ,  $t'_{xb}$ ,  $t'_{z8}$  – соответственно температура воздуха после смешения холодного воздуха с рециркулирующим, температура холодного воздуха и температура горячего воздуха, идущего на рециркуляцию, °С.

Конвективная поверхность ( $m^2$ ) нагрева воздухоподогревателя

$$H_{en} = \frac{Q_{en} B_p}{K_{en} \Delta t_{en}}, \quad (2.49)$$

$K_{en}$  – коэффициент теплопередачи для воздухоподогревателя, кВт/( $m^2 \cdot K$ );

$\Delta t_{en}$  – температурный напор в воздухоподогревателе, °С, находится по формулам (2.40) и (2.41).

**Задача 2.54.** Определить количество теплоты, воспринятое паром в пароперегревателе котельного агрегата паропроизводительностью  $D=13,5$  кг/с, работающего на подмосковном угле марки Б2 с низшей теплотой сгорания  $Q_n^p=10516$  кДж/кг, если известны температура топлива на входе в топку  $t_T=20^\circ C$ , теплоемкость рабочей массы топлива  $c_m^p=2,1$  кДж/(кг·К), давление насыщенного пара  $p_{пп}=4,5$  МПа, давление перегретого пара  $p_{пп}=4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{пп}=450^\circ C$ , температура питательной воды  $t_{пв}=150^\circ C$ , величина непрерывной продувки  $P=3\%$ , кпд котлоагрегата (брутто)  $\eta_{ка}^{br}=88\%$  и потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4=4\%$ .

*Ответ:*  $Q_{ne}=1906$  кДж/кг.

**Задача 2.55.** Определить количество теплоты, воспринятое паром в пароперегревателе котельного агрегата, работающего на донецком угле марки Д состава:  $C^p=49,3\%$ ;  $H^p=3,6\%$ ;  $S_l^p=3,0\%$ ;

$N^p=1,0\%$ ;  $O^p=8,3\%$ ;  $A^p=21,8\%$ ;  $W^p=13,0\%$ , если известны энтальпия продуктов сгорания на входе в пароперегреватель  $I'_{ne}=9318$  кДж/кг, температура газов на выходе из пароперегревателя  $\theta''_{ne}=600^\circ\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха за пароперегревателем  $\alpha_{ne}=1,3$ , присос воздуха в газоходе пароперегревателя  $\Delta\alpha_{ne}=0,05$ , температура воздуха в котельной  $t_b=30^\circ\text{C}$  и потери теплоты в окружающую среду  $q_5=0,5\%$ .

*Ответ:*  $Q_{ne}=2855$  кДж/кг.

**Задача 2.56.** Определить количество теплоты, воспринятое паром в пароперегревателе котельного агрегата паропроизводительностью  $D=9,73$  кг/с, если известны давление насыщенного пара  $p_{\text{нп}}=1,4$  МПа, давление перегретого пара  $p_{\text{пп}}=1,3$  МПа, температура перегретого пара  $t_{\text{пп}}=250^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{\text{пв}}=100^\circ\text{C}$ , величина непрерывной продувки  $P=4\%$ , КПД котлоагрегата (брутто)  $\eta_{\text{ка}}^{\text{бр}}=90\%$  и потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4=3,5\%$ . Котельный агрегат работает на кузнецком угле марки Т с низшей теплотой сгорания горючей массы  $Q_n^p=34\,345$  кДж/кг, содержание в топливе золы  $A^p=16,8\%$  и влаги  $W^p=6,5\%$ .

*Ответ:*  $Q_{\text{пс}}=1474$  кДж/кг.

**Задача 2.57.** Определить энтальпию продуктов сгорания на выходе из пароперегревателя котельного агрегата паропроизводительностью  $D=3,89$  кг/с, работающего на природном газе Саратовского месторождения с низшей теплотой сгорания  $Q_n^p=35\,799$  кДж/м<sup>3</sup>, если известны давление насыщенного пара  $p_{\text{нп}}=1,5$  МПа, давление перегретого пара  $p_{\text{пп}}=1,4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{\text{пп}}=350^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{\text{пв}}=100^\circ\text{C}$ , величина непрерывной продувки  $P=4\%$ , КПД котлоагрегата (брутто)  $\eta_{\text{ка}}^{\text{бр}}=92,0\%$ , энтальпия продуктов сгорания на входе в пароперегреватель  $I'_{ne}=17220$  кДж/м<sup>3</sup>, теоретический объем воздуха, необходимый для сгорания топлива,  $V^0=9,52$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, присос воздуха в газоходе пароперегревателя



$\Delta\alpha_{ne}=0,05$ , температура воздуха в котельной  $t_b=30^\circ\text{C}$  и потери теплоты в окружающую среду  $q_5=11\%$ .

**Решение:** Расчетный расход топлива определяем по формуле (2.25):

$$B_p = B = \frac{D_{ne} \left[ (i_{nn} - i_{ns}) + \frac{P}{100} (i_{кв} - i_{ns}) \right]}{Q_p^p \eta_{ка}^{op}} 100 =$$

$$= \frac{3,89 \left[ (3160 - 419) + \frac{4}{100} (830 - 419) \right]}{35799 \cdot 92} 100 =$$

$$= 0,326 \text{ кг/с}$$

Количество теплоты, воспринятое паром в пароперегревателе, находим по формуле (2.38):

$$Q_{ne} = \frac{D_{ne}}{B_p} (i_{nn} - i_{nn}') = \frac{3,89}{0,326} (3160 - 2791,8) = 4388 \text{ кДж/м}^3.$$

Энтальпию насыщенного пара при давлении  $p_{nn}=1,5$  МПа находим по табл. 2 (см. Приложение):  $i_{nn}=i''=2791,8$  кДж/кг. Расход пара через пароперегреватель  $D_{ne}$  равен паропроизводительности котлоагрегата  $D$ , так как отсутствует отбор насыщенного пара.

Коэффициент сохранения теплоты, по формуле (2.34),

$$\varphi = 1 - q_5/100 = 1 - 11/100 = 0,99.$$

Энтальпия продуктов сгорания на выходе из пароперегревателя, по формуле (2.38),

$$I_{ne}'' = I_{ne}' - \frac{Q_{ne}}{\varphi} + \Delta\alpha_{ne} V^0 (c\theta)_{хв} = 17220 - \frac{4388}{0,99} + 0,05 \cdot 9,52 \cdot 40 =$$

$$= 12769 \text{ кДж/м}^3.$$

**Задача 2.58.** Определить энтальпию продуктов сгорания на выходе из пароперегревателя котельного агрегата паропроизводительностью  $D=5,6$  кг/с, работающего на челябинском угле марки БЗ с низшей теплотой сгорания  $Q_n^p=13\,997$  кДж/кг, если известны давление насыщенного пара  $p_{нп}=4,3$  МПа, давление перегретого пара  $p_{пп}=4$  МПа, температура перегретого пара

$t_{\text{шт}}=430^{\circ}\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{\text{нс}}=130^{\circ}\text{C}$ , КПД котлоагрегата (брутто)  $\eta_{\text{ка}}^{\text{бр}}=89\%$ , энтальпия продуктов сгорания на входе в пароперегреватель  $I_{\text{не}}=7800$  кДж/кг, теоретический объем воздуха, необходимый для сгорания топлива  $V^0=3,74$  м<sup>3</sup>/кг, присос воздуха в газоходе пароперегревателя  $\Delta\alpha_{\text{пе}}=0,04$ , температура воздуха в котельной  $t_{\text{в}}=30^{\circ}\text{C}$ , потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4=3\%$  и потери теплоты в окружающую среду  $q_5=1\%$ .

*Ответ:*  $I_{\text{не}}=5487$  кДж/кг.

**Задача 2.59.** Определить энтальпию продуктов сгорания на выходе из пароперегревателя котельного агрегата, работающего на фрезерном торфе состава:  $\text{C}^{\text{p}}=24,7\%$ ;  $\text{H}^{\text{p}}=2,6\%$ ;  $\text{S}_{\text{л}}^{\text{p}}=0,1\%$ ;  $\text{N}^{\text{p}}=1,1\%$ ;  $\text{O}^{\text{p}}=15,2\%$ ;  $\text{A}^{\text{p}}=6,3\%$ ;  $\text{W}^{\text{p}}=50,0\%$ , если известны температура газов на входе в пароперегреватель  $\theta_{\text{не}}=900^{\circ}\text{C}$ , количество теплоты, воспринятое паром в пароперегревателе,  $Q_{\text{пе}}=1200$  кДж/кг, коэффициент избытка воздуха за пароперегревателем  $\alpha_{\text{пе}}=1,3$ , присос воздуха в газоходе пароперегревателя  $\Delta\alpha_{\text{пе}}=0,05$ , температура воздуха в котельной  $t_{\text{в}}=30^{\circ}\text{C}$  и потери теплоты в окружающую среду  $q_5=0,5\%$ .

*Ответ:*  $I_{\text{не}}=4404$  кДж/кг.

**Задача 2.60.** Определить количество теплоты, воспринятое паром и конвективную поверхность нагрева пароперегревателя котельного агрегата паропроизводительностью  $D=21$  кгс/с, работающего на донецком угле марки А с низшей теплотой сгорания  $Q_{\text{н}}^{\text{p}}=22825$  кДж/кг, если известны температура топлива при входе в топку  $t_{\text{т}}=20^{\circ}\text{C}$ , теплоемкость рабочей массы топлива  $c_{\text{м}}^{\text{p}}=2,1$  кДж/(кг·К), давление насыщенного пара  $p_{\text{шт}}=4$  МПа, давление перегретого пара  $p_{\text{шт}}=3,5$  МПа, температура перегретого пара  $t_{\text{шт}}=420^{\circ}\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{\text{нс}}=150^{\circ}\text{C}$ , величина непрерывной продувки  $P=4\%$ , КПД котлоагрегата (брутто)  $\eta_{\text{ка}}^{\text{бр}}=88\%$ , коэффициент теплопередачи в

пароперегревателе  $\kappa_{ne}=0,051$  кВт/(м<sup>2</sup>·К), температура газов на входе в пароперегреватель  $\theta'_{ne}=950^\circ\text{C}$ , температура газов на выходе из пароперегревателя  $\theta''_{ne}=605^\circ\text{C}$ , температура пара на входе в пароперегреватель  $t_{нп}=250^\circ\text{C}$  и потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4=4,0\%$ .

**Решение:** Физическую теплоту топлива определяем по формуле (2.4):

$$Q_{мл}=c_m^p t_m=2,1 \cdot 20=42 \text{ кДж/кг.}$$

Располагаемую теплоту находим по формуле (2.3):

$$Q_p^p = Q_n^p + Q_{мл}=22825+42=22867 \text{ кДж/кг.}$$

Натуральный расход топлива определяем по формуле (2.25):

$$\begin{aligned} B &= \frac{D_{ne} \left[ (i_{нп} - i_{нв}) + \frac{P}{100} (i_{кв} - i_{нв}) \right]}{Q_p^p \eta_{ка}^{bp}} 100 = \\ &= \frac{21 \left[ (3268 - 628) + \frac{4}{100} (1049,8 - 628) \right]}{22867 * 88} 100 = \\ &= 2,77 \text{ кг/с} \end{aligned}$$

$D_{ne}=D$ , так как отсутствует отбор насыщенного пара.

Расчетный расход топлива находим по формуле (2.26):

$$B_p=B(1-q_4/100)=2,77(1-4/100)=2,66 \text{ кг/с.}$$

Количество теплоты, воспринятое паром в пароперегревателе, определяем по формуле (2.38):

$$Q_{ne} = \frac{D_{ne}}{B_p} (i_{нп} - i_{нв}) = \frac{21}{2,66} (3268 - 2800,6) = 3693 \text{ кДж/кг.}$$

Энтальпию насыщенного пара при давлении  $p_{нп}=4$  МПа находим по табл. 2 (см. Приложение):  $i_{нп}=i''=2800,6$  кДж/кг;  $D_{ne}=D$ , так как отсутствует отбор насыщенного пара.

Температурный напор в пароперегревателе находим по формуле (2.41):

$$\Delta t_{ne} = \frac{\Delta t_{\dot{o}} + \Delta t_{\dot{m}}}{2} = \frac{(950 - 420) + (605 - 250)}{2} = 442,5^{\circ}\text{C}.$$

Конвективная поверхность нагрева пароперегревателя, по формуле (2.39),

$$H_{ne} = \frac{Q_{ne} B_p}{\kappa_{ne} \Delta t_{ne}} = \frac{3693 \cdot 2,66}{0,051 \cdot 442,5} = 435 \text{ м}^2.$$

**Задача 2.61.** Определить конвективную поверхность нагрева пароперегревателя котельного агрегата паропроизводительностью  $D=13,6$  кг/с, работающего на карагандинском каменном угле, если известны давление насыщенного пара  $p_{\text{нп}}=4,5$  МПа, давление перегретого пара  $p_{\text{пг}}=4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{\text{пг}}=450^{\circ}\text{C}$ , коэффициент теплопередачи в пароперегревателе  $\kappa_{ne}=0,045$  кВт/(м<sup>2</sup>·К), температура газов на входе в пароперегреватель  $\theta'_{ne}=1052^{\circ}\text{C}$ , температура газов на выходе из пароперегревателя  $\theta''_{ne}=686^{\circ}\text{C}$  и температура пара на входе в пароперегреватель  $t_{\text{нп}}=256^{\circ}\text{C}$ .

*Ответ:*  $H_{ne}=312,1 \text{ м}^2$ .

**Задача 2.62.** Определить конвективную поверхность нагрева пароперегревателя котельного агрегата паропроизводительностью  $D=7,05$  кг/с, работающего на природном газе Саратовского месторождения состава:  $\text{CO}_2=0,8\%$ ;  $\text{CH}_4=84,5\%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6=3,8\%$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8=1,9\%$ ;  $\text{C}_4\text{H}_{10}=0,9\%$ ;  $\text{C}_5\text{H}_{12}=0,3\%$ ;  $\text{N}_2=7,8\%$ , если известны давление перегретого пара  $p_{\text{пг}}=1,4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{\text{пг}}=280^{\circ}\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{\text{пв}}=110^{\circ}\text{C}$ , величина непрерывной продувки  $P=4\%$ , КПД котлоагрегата (брутто)  $\eta_{\text{ка}}^{\text{бр}}=91\%$ , энтальпия продуктов сгорания на входе в пароперегреватель  $I'_{ne}=17320$  кДж/кг, энтальпия продуктов сгорания на выходе из пароперегревателя  $I''_{ne}=12\ 070$  кДж/кг, присос воздуха в газоходе пароперегревателя  $\Delta\alpha_{\text{пе}}=0,05$ , температура воздуха в котельной  $t_{\text{в}}=30^{\circ}\text{C}$ , потери теплоты в окружающую среду  $q_5=1\%$ , коэффициент теплопередачи в

пароперегревателе  $\kappa_{ne}=0,05$  кВт/(м<sup>2</sup>·К) и температурный напор в пароперегревателе  $\Delta t_{ne}=390^\circ\text{C}$ .

*Ответ:*  $H_{ne}=147$  м<sup>2</sup>.

**Задача 2.63.** Определить конвективную поверхность нагрева пароперегревателя котельного агрегата, работающего на донецком угле марки А состава:  $C^p=63,8\%$ ;  $H^p=1,2\%$ ;  $S_l^p=1,7\%$ ;  $N^p=0,6\%$ ;  $O^p=1,3\%$ ;  $A^p=22,9\%$ ;  $W^p=8,5\%$ , если известны расчетный расход топлива  $B_p=1,1$  кг/с, температура пара на входе в пароперегреватель  $t_{np}=316^\circ\text{C}$ , температура перегретого пара  $t_{np}=510^\circ\text{C}$ , температура газов на входе в пароперегреватель  $\theta'_{ne}=1000^\circ\text{C}$ , температура газов на выходе из пароперегревателя  $\theta''_{ne}=700^\circ\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха за пароперегревателем  $\alpha_{ne}=1,25$ , присос воздуха в газоходе пароперегревателя  $\Delta\alpha_{ne}=0,05$ , температура воздуха в котельной  $t_b=30^\circ\text{C}$ , коэффициент теплопередачи в пароперегревателе  $\kappa_{ne}=0,055$  кВт/(м<sup>2</sup>·К) и потери теплоты в окружающую среду  $q_5=1\%$ .

*Ответ:*  $H_{ne}=178$  м<sup>2</sup>.

**Задача 2.64.** Определить количество теплоты, воспринятое водой в экономайзере котельного агрегата, работающего на малосернистом мазуте состава:  $C^p=84,65\%$ ;  $H^p=11,7\%$ ;  $S_l^p=0,3\%$ ;  $O^p=0,3\%$ ;  $A^p=0,05\%$ ;  $W^p=3,0\%$ , если известны температура газов на входе в экономайзер  $\theta'_э=330^\circ\text{C}$ , температура газов на выходе из экономайзера  $\theta''_э=180^\circ\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха за экономайзером  $\alpha_э=1,3$ , присос воздуха в газоходе экономайзера  $\Delta\alpha_э=0,1$ , температура воздуха в котельной  $t_b=30^\circ\text{C}$  и потери теплоты в окружающую среду  $q_5=1\%$ .

**Решение:** Теоретически необходимый объем воздуха определяем по формуле (1.27):

$$V^0=0,089C^p+0,226H^p+0,033(S_l^p - O^p)=0,089\cdot 84,65+0,266\cdot 11,7+0,033(0,3-0,3)= 10,62 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем трехатомных газов находим по формуле (1.33):

$$V_{RO_2} = 0,0187(C^P + 0,375S_{II}^P) = 0,0187(84,65 + 0,375 \cdot 0,3) = 1,58 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретический объем азота, по формуле (1.32),

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + \frac{0,8N^P}{100} = 0,79 \cdot 10,62 = 8,39 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретический объем водяных паров, по формуле (1.35),

$$V_{H_2O}^0 = 0,0124(9H^P + W^P) + 0,0161V^0 = \\ = 0,0124(9 \cdot 11,7 + 3,0) + 0,0161 \cdot 10,62 = 1,51 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Энтальпия продуктов сгорания на входе в экономайзер, по формуле (1.60),

$$I_{\text{э}}' = I_{\text{г}}^0 + (\alpha_{\text{э}} - 1)I_{\text{в}}^0 = V_{RO_2} (c\theta_{\text{э}})_{CO_2} + V_{N_2}^0 (c\theta_{\text{э}})_{N_2} + \\ + V_{H_2O}^0 (c\theta_{\text{э}})_{H_2O} + (\alpha_{\text{г}} - 1)V^0 (c\theta_{\text{э}})_{\text{в}} = 1,58 \cdot 623 + 8,39 \cdot 432 + \\ + 1,51 \cdot 512 + (1,3 - 1)10,62 \cdot 445 = 6800 \text{ кДж/кг}.$$

Значения энтальпий  $(c\theta_{\text{э}})_{CO_2}$ ,  $(c\theta_{\text{э}})_{N_2}$ ,  $(c\theta_{\text{э}})_{H_2O}$  и  $(c\theta_{\text{э}})_{\text{в}}$  находим по табл. 1 (см. Приложение).

Энтальпия продуктов сгорания на выходе из экономайзера, по формуле (1.60),

$$I_{\text{э}}'' = I_{\text{г}}^0 + (\alpha_{\text{э}} - 1)I_{\text{в}}^0 = V_{RO_2} (c\theta_{\text{э}})_{CO_2} + V_{N_2}^0 (c\theta_{\text{э}})_{N_2} + \\ + V_{H_2O}^0 (c\theta_{\text{э}})_{H_2O} + (\alpha_{\text{г}} - 1)V^0 (c\theta_{\text{э}})_{\text{в}} = 1,58 \cdot 320 + 8,39 \cdot 234 + \\ + 1,51 \cdot 274 + (1,3 - 1)10,62 \cdot 239 = 3644 \text{ кДж/кг}.$$

Коэффициент сохранения теплоты, по формуле (2.34),

$$\varphi = 1 - q_5/100 = 1 - 1/100 = 0,99.$$

Количество теплоты, воспринятое водой в экономайзере, находим по формуле (2.42):

$$Q_3 = \varphi [I_{\text{э}}' - I_{\text{э}}'' + \Delta\alpha_{\text{э}} V^0 (c\theta)_{\text{в}}] Q_3 = \\ = 0,99 [6800 - 3644 + 0,1 \cdot 10,62 \cdot 40] = 3166 \text{ кДж/кг}.$$

**Задача 2.65.** Определить количество теплоты, воспринятое водой в экономайзере котельного агрегата паропроизводительностью  $D = 5,45$  кг/с, работающего на кузнецком угле

марки Т с низшей теплотой сгорания  $Q_n^p = 26180$  кДж/кг, если известны давление перегретого пара  $p_{\text{шт}} = 1,4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{\text{шт}} = 280^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{\text{пв}} = 100^\circ\text{C}$ , КПД котлоагрегата (брутто)  $\eta_{\text{ка}}^{\text{бр}} = 86\%$ , величина непрерывной продувки  $P = 3\%$ , температура воды на выходе из экономайзера  $t_{\text{нв}}'' = 150^\circ\text{C}$  и потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4 = 4\%$ .

*Ответ:*  $Q_3 = 2002$  кДж/кг.

**Задача 2.66.** Определить количество теплоты, воспринятое водой в экономайзере котельного агрегата паропроизводительностью  $D = 7,66$  кг/с, работающего на природном газе Ставропольского месторождения с низшей теплотой сгорания  $Q_n^p = 35\,621$  кДж/кг, если известны давление перегретого пара  $p_{\text{шт}} = 4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{\text{шт}} = 425^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{\text{пв}} = 100^\circ\text{C}$ , КПД котлоагрегата (брутто)  $\eta_{\text{ка}}^{\text{бр}} = 90\%$ , величина непрерывной продувки  $P = 3\%$  и температура воды на выходе из экономайзера  $t_{\text{нв}}'' = 168^\circ\text{C}$ .

*Ответ:*  $Q_3 = 3313$  кДж/м<sup>3</sup>.

**Задача 2.67.** Определить энтальпию воды на выходе из экономайзера котельного агрегата паропроизводительностью  $D = 5,6$  кг/с, работающего на подмосковном угле марки Б2 с низшей теплотой сгорания  $Q_n^p = 10516$  кДж/кг, если известны температура топлива на входе в топку  $t_{\text{т}} = 20^\circ\text{C}$ , теплоемкость рабочей массы топлива  $c_m^p = 2,1$  кДж/(кг·К), давление перегретого пара  $p_{\text{шт}} = 1,4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{\text{шт}} = 350^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{\text{пв}} = 100^\circ\text{C}$ , КПД котлоагрегата (брутто)  $\eta_{\text{ка}}^{\text{бр}} = 88\%$ , величина непрерывной продувки  $P = 4\%$ , энтальпия продуктов сгорания на входе в экономайзер  $I_3' = 3860$  кДж/кг, энтальпия продуктов сгорания на выходе из экономайзера  $I_3'' = 2050$  кДж/кг, теоретический объем воздуха, необходимый для сгорания топлива  $V^0 = 2,94$  м<sup>3</sup>/кг, присос воздуха в газоходе экономайзера  $\Delta\alpha_3 = 0,1$ , температура воздуха в котельной  $t_{\text{в}} = 30^\circ\text{C}$ ,

потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4=4\%$  и потери теплоты в окружающую среду  $q_5=1\%$ .

*Ответ:*  $i''_{нв} = 896$  кДж/кг.

**Задача 2.68.** Определить энтальпию воды на выходе из экономайзера котельного агрегата паропроизводительностью  $D=73$  кг/с, работающего на кузнецком угле марки Т состава:  $C^p=68,6\%$ ;  $H^p=3,1\%$ ;  $S_l^p=0,4\%$ ;  $N^p=1,5\%$ ;  $O^p=3,1\%$ ;  $A^p=5,8\%$ ;  $W^p=6,5\%$ , если известны расчетный расход топлива  $B_p=1,1$  кг/с, температура питательной воды  $t_{пв}=100^\circ\text{C}$ , величина непрерывной продувки  $P=4\%$ ; температура газов на входе в экономайзер  $\theta'_г=330^\circ\text{C}$ , температура газов на выходе из экономайзера  $\theta''_г=150^\circ\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха за экономайзером  $\alpha_э=1,45$ , присос воздуха в газоходе экономайзера  $\Delta\alpha_э=0,1$ , температура воздуха в котельной  $t_в=30^\circ\text{C}$  и коэффициент сохранения теплоты  $\varphi=0,99$ .

*Ответ:*  $i''_{нв} = 697$  кДж/кг.

**Задача 2.69.** Определить энтальпию воды на выходе из экономайзера котельного агрегата паропроизводительностью  $D=13,8$  кг/с, работающего на высокосернистом мазуте состава:  $C^p=83\%$ ;  $H^p=10,4\%$ ;  $S_l^p=2,8\%$ ;  $O^p=0,7\%$ ;  $A^p=0,1\%$ ;  $W^p=3,0\%$ , если известны температура подогрева мазута  $t_г=90^\circ\text{C}$ , давление перегретого пара  $p_{пп}=1,4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{пп}=280^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{пв}=100^\circ\text{C}$ , КПД котлоагрегата (брутто)  $\eta_{ка}^{бp}=88\%$ ; величина непрерывной продувки  $P=3\%$  и количество теплоты, воспринятое водой в экономайзере,  $Q_э=3100$  кДж/кг.

*Ответ:*  $i''_{нв} = 641$  кДж/кг.

**Задача 2.70.** Определить энтальпию продуктов сгорания на соде из экономайзера котельного агрегата, работающего на природном газе Саратовского месторождения состава:  $CO_2=0,8\%$ ;  $CH_4=84,5\%$ ;  $C_2H_6=3,8\%$ ;  $C_3H_8=1,9\%$ ;  $C_4H_{10}=0,9\%$ ;  $C_5H_{12}=0,3\%$ ;  $N_2=7,8\%$ , если температура газов на входе в



экономайзер  $\theta_{\text{э}} = 300^{\circ}\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха за экономайзером  $\alpha_{\text{э}} = 1,35$ , присос воздуха в газоходе экономайзера  $\Delta\alpha_{\text{э}} = 0,1$ , температура воздуха в котельной  $t_{\text{в}} = 30^{\circ}\text{C}$ , количество теплоты, принятое водой в экономайзере,  $Q_{\text{э}} = 2600$  кДж/кг и потери теплоты в окружающую среду  $q_5 = 1\%$ .

*Ответ:*  $I_{\text{э}} = 3291$  кДж/кг.

**Задача 2.71.** Определить энтальпию продуктов сгорания на коде из экономайзера котельного агрегата паропроизводительностью  $D = 13,8$  кг/с, работающего на малосернистом мазуте состава:  $\text{C}^{\text{p}} = 84,65\%$ ;  $\text{H}^{\text{p}} = 11,7\%$ ;  $\text{S}_{\text{л}}^{\text{p}} = 0,3\%$ ;  $\text{O}^{\text{p}} = 0,3\%$ ;  $\text{A}^{\text{p}} = 0,05\%$ ;  $\text{W}^{\text{p}} = 3,0\%$ , если известны расчетный расход топлива  $B_{\text{p}} = 1,06$  кг/с, температура питательной воды  $t_{\text{пв}} = 100^{\circ}\text{C}$ , температура воды на выходе из экономайзера  $t_{\text{нв}} = 150^{\circ}\text{C}$ , величина непрерывной продувки  $P = 4\%$ , температура газов на входе в экономайзер  $\theta_{\text{э}} = 330^{\circ}\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха за экономайзером  $\alpha_{\text{э}} = 1,3$ , присос воздуха в газоходе экономайзера  $\Delta\alpha_{\text{э}} = 0,1$ , температура воздуха в котельной  $t_{\text{в}} = 30^{\circ}\text{C}$  и потери теплоты в окружающую среду  $q_5 = 1\%$ .

*Ответ:*  $I_{\text{э}} = 3868$  кДж/кг.

**Задача 2.72.** Определить конвективную поверхность нагрева экономайзера котельного агрегата паропроизводительностью  $D = 4,0$  кг/с, работающего на природном газе, если известны температура воды на входе в экономайзер  $t_{\text{пв}} = 100^{\circ}\text{C}$ , температура воды на выходе из экономайзера  $t_{\text{нв}} = 152^{\circ}\text{C}$ , коэффициент теплопередачи в экономайзере  $\kappa_{\text{э}} = 0,02$  кВт/( $\text{м}^2 \cdot \text{K}$ ), температура газов на входе в экономайзер  $\theta_{\text{э}} = 280^{\circ}\text{C}$  и температура газов на выходе из экономайзера  $\theta_{\text{э}} = 150^{\circ}\text{C}$ .

*Ответ:*  $H_{\text{э}} = 541$   $\text{м}^2$ .

**Задача 2.73.** Определить количество теплоты, воспринятое водой, конвективную поверхность нагрева экономайзера котельного агрегата паропроизводительностью  $D=5,45$  кг/с, работающего на донецком каменном угле марки Т с низшей теплотой сгорания  $Q_n^p=24365$  кДж/кг, если известны давление перегретого пара  $p_{nn}=1,4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{nn}=260^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{пв}=104^\circ\text{C}$ , КПД котлоагрегата (брутто)  $\eta_{ка}^{\text{бр}}=88\%$ , величина непрерывной продувки  $P=3\%$ , температура воды на выходе из экономайзера  $t'_в=164^\circ\text{C}$ , коэффициент теплопередачи в экономайзере  $k_э=0,021$  кВт/(м<sup>2</sup>·К), температура газов на входе в экономайзер  $\theta_э=290^\circ\text{C}$ , температура газов на выходе из экономайзера  $\theta'_э=150^\circ\text{C}$  и потери теплоты от механической неполноты сгорания  $q_4=4\%$ .

**Решение:** Natural расход топлива определяем по формуле (2.25):

$$B = \frac{D_{ne} \left[ (i_{nn} - i_{нс}) + \frac{P}{100} (i_{кв} - i_{нс}) \right]}{Q_p^p \eta_{ка}^{\text{бр}}} 100 =$$

$$= \frac{5,45 \left[ (2951 - 436) + \frac{3}{100} (828,8 - 436) \right]}{24365 * 88} 100 =$$

$$= 0,64 \text{ кг/с}$$

$D_{ne}=D$ , так как отсутствует отбор насыщенного пара.

Расчетный расход топлива находим по формуле (2.26):

$$B_p = B(1 - q_4/100) = 0,64(1 - 4/100) = 0,614 \text{ кг/с.}$$

Расход воды через экономайзер, по формуле (2.43),

$$D_э = D(1 + P/100) = 5,45(1 + 3/100) = 5,61 \text{ кг/с.}$$

Количество теплоты, воспринятое водой в экономайзере, находим по формуле (2.42):

$$Q_э = \frac{D_э}{B_p} (i''_{нс} - i'_{нс}) = \frac{5,61}{0,614} (687 - 436) = 2293 \text{ кДж/кг.}$$

Температурный напор в экономайзере определяем по формуле (2.40):

$$\Delta t_{ne} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{m}}{2,31 \lg \left( \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{m}} \right)} = \frac{(290 - 164) - (150 - 104)}{2,31 \lg \left( \frac{290 - 164}{150 - 104} \right)} = 76^{\circ}\text{C}.$$

Конвективную поверхность нагрева экономайзера находим по формуле (2.45):

$$H_{\text{э}} = \frac{Q_{\text{э}} B_p}{\kappa_{\text{э}} \Delta t_{\text{э}}} = \frac{2293 \cdot 0,614}{0,021 \cdot 76} = 882,1 \text{ м}^2.$$

**Задача 2.74.** Определить энтальпию воды на выходе и конвективную поверхность нагрева экономайзера котельного агрегата паропроизводительностью  $D=5,9$  кг/с, работающего на донецком угле марки А, если известны расчетный расход топлива  $B_p=0,62$  кг/с, количество теплоты, воспринятое водой в экономайзере  $Q_{\text{э}}=2520$  кДж/кг, температура питательной воды  $t_{\text{пв}}=100^{\circ}\text{C}$ , коэффициент теплопередачи в экономайзере  $\kappa_{\text{э}}=0,021$  кВт/( $\text{м}^2 \cdot \text{K}$ ), величина непрерывной продувки  $P=4\%$ , температура газов на входе в экономайзер  $\theta'_{\text{э}}=320^{\circ}\text{C}$  и температура газов на выходе из экономайзера  $\theta''_{\text{э}}=170^{\circ}\text{C}$ .

*Ответ:*  $i''_{\text{нв}}=672$  кДж/кг;  $H_{\text{э}}=644$  м<sup>2</sup>.

**Задача 2.75.** Определить количество теплоты, воспринятое воздухом в воздухоподогревателе котельного агрегата, работающего на донецком угле марки Т состава:  $C^p=62,7\%$ ;  $H^p=3,1\%$ ;  $S^p=2,8\%$ ;  $N^p=0,9\%$ ;  $O^p=1,7\%$ ;  $A^p=23,8\%$ ;  $W^p=5,0\%$ , если известны температура газов на входе в воздухоподогреватель  $\theta'_{\text{вн}}=400^{\circ}\text{C}$ , температура газов на выходе из воздухоподогревателя  $\theta''_{\text{вн}}=300^{\circ}\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха за воздухоподогревателем  $\alpha_{\text{вп}}=1,4$ , присос воздуха в воздухоподогревателе  $\Delta\alpha_{\text{вп}}=0,05$ , температура воздуха на входе в

воздухоподогреватель  $t'_e = 30^\circ\text{C}$ , температура воздуха на выходе из воздухоподогревателя  $t''_e = 174^\circ\text{C}$  и потери теплоты в окружающую среду  $q_5 = 1\%$ .

*Ответ:*  $Q_{\text{вн}} = 1412$  кДж/кг.

**Задача 2.76.** Определить количество теплоты, воспринятое воздухом в воздухоподогревателе котельного агрегата, работающего на карагандинском угле марки К, если известны температура воздуха на входе в воздухоподогреватель  $t'_e = 30^\circ\text{C}$ , температура воздуха на выходе из воздухоподогревателя  $t''_e = 170^\circ\text{C}$ , теоретически необходимый объем воздуха  $V^0 = 5,61$  м<sup>3</sup>/кг, коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,3$ , присос воздуха в топочной камере  $\Delta\alpha_T = 0,05$  и присос воздуха в воздухоподогревателе  $\Delta\alpha_{\text{вн}} = 0,05$ .

*Ответ:*  $Q_{\text{вн}} = 1331$  кДж/кг.

**Задача 2.77.** Определить количество теплоты, воспринятое воздухом в воздухоподогревателе котельного агрегата, работающего на природном газе Ставропольского месторождения состава:  $\text{CO}_2 = 0,2\%$ ;  $\text{CH}_4 = 98,2\%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6 = 0,4\%$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8 = 0,1\%$ ;  $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,1\%$ ;  $\text{N}_2 = 1,0\%$ , если известны температура воздуха на входе в воздухоподогреватель  $t'_e = 30^\circ\text{C}$ , температура воздуха на выходе из воздухоподогревателя  $t''_e = 180^\circ\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,15$ , присос воздуха в топочной камере  $\Delta\alpha_T = 0,05$  и присос воздуха в воздухоподогревателе  $\Delta\alpha_{\text{вн}} = 0,06$ .

*Ответ:*  $Q_{\text{вн}} = 2139$  кДж/кг.

**Задача 2.78.** Определить энтальпию продуктов сгорания на выходе из воздухоподогревателя котельного агрегата, работающего на природном газе Саратовского месторождения, если известны температура воздуха на входе в воздухоподогреватель  $t'_e = 30^\circ\text{C}$ , температура воздуха на выходе из воздухоподогревателя  $t''_e = 170^\circ\text{C}$ , теоретически необходимый объем воздуха

$V^0=9,52 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T=1,15$ , присос воздуха в топочной камере  $\Delta\alpha_T=0,05$ , присос воздуха в воздухоподогревателе  $\Delta\alpha_{\text{вн}}=0,06$ , энтальпия продуктов сгорания на входе в воздухоподогреватель  $I'_{\text{вн}}=7670 \text{ кДж}/\text{м}^3$  и потеря теплоты в окружающую среду  $q_5=1\%$ .

*Ответ:*  $I''_{\text{вн}}=5724 \text{ кДж}/\text{м}^3$ .

**Задача 2.79.** Определить энтальпию продуктов сгорания на выходе из воздухоподогревателя котельного агрегата, работающего на карагандинском угле марки К состава:  $C^p=54,5\%$ ;  $H^p=3,3\%$ ;  $S_l^p=0,8\%$ ;  $N^p=0,8\%$ ;  $O^p=4,8\%$ ;  $A^p=27,6\%$ ;  $W^p=8,0\%$ , если известны температура воздуха на входе в воздухоподогреватель  $t'_\text{в} = 30^\circ\text{C}$ , температура воздуха на выходе из воздухоподогревателя  $t''_\text{в} = 177^\circ\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T=1,3$ , присос воздуха в топочной камере  $\Delta\alpha_T=0,05$ , коэффициент избытка воздуха за воздухоподогревателем  $\alpha_{\text{вн}}=1,45$ , присос воздуха в воздухоподогревателе  $\Delta\alpha_{\text{вн}}=0,05$ , температура газов на входе в воздухоподогреватель  $\theta'_{\text{вн}}=450^\circ\text{C}$  и потери теплоты в окружающую среду  $q_5=1\%$ .

*Ответ:*  $I''_{\text{вн}}=4123 \text{ кДж}/\text{кг}$ .

**Задача 2.80.** Определить конвективную поверхность нагрева воздухоподогревателя котельного агрегата, работающего на донецком угле марки Т, если известны температура воздуха входе в воздухоподогреватель  $t'_\text{в} = 30^\circ\text{C}$ , температура воздуха выходе из воздухоподогревателя  $t''_\text{в} = 175^\circ\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T=1,3$ , присос воздуха в топочной камере  $\Delta\alpha_T=0,05$ , присос воздуха в воздухоподогревателе  $\Delta\alpha_{\text{вн}}=0,05$ , расчетный расход топлива  $B_p=0,64 \text{ кг}/\text{с}$ , теоретически необходимый объем воздуха  $V^0=6,44 \text{ м}^3/\text{кг}$ , коэффициент теплопереда в воздухоподогревателе  $k_{\text{вн}}=0,0182 \text{ кВт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$ , температура

газов на входе в воздухоподогреватель  $\theta'_{en} = 412^\circ\text{C}$  и температура газов на выходе из воздухоподогревателя  $\theta''_{en} = 310^\circ\text{C}$ .

*Ответ:*  $H_{en} = 262 \text{ м}^2$ .

**Задача 2.81.** Определить конвективную поверхность нагрева воздухоподогревателя котельного агрегата паропроизводительностью  $D = 5,9 \text{ кг/с}$ , работающего на донецком угле марки Т состава:  $C^p = 62,7\%$ ;  $H^p = 3,1\%$ ;  $S^p_l = 2,8\%$ ;  $N^p = 0,9\%$ ;  $O^p = 1,7$ ;  $A^p = 23,8\%$ ;  $W^p = 5,0\%$ , если известны давление перегретого пара  $p_{шт} = 1,4 \text{ МПа}$ , температура перегретого пара  $t_{шт} = 275^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{пв} = 100^\circ\text{C}$ , КПД котлоагрегата (брутто)  $\eta_{ка}^{бp} = 88\%$ , величина непрерывной продувки  $P = 4\%$ , температура воздуха на входе в воздухоподогреватель  $t'_e = 30^\circ\text{C}$ , температура воздуха на выходе из воздухоподогревателя  $t''_e = 170^\circ\text{C}$  коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,3$ , присос воздуха в топочной камере  $\Delta\alpha_T = 0,05$ , присос воздуха в воздухоподогревателе  $\Delta\alpha_{en} = 0,06$ , коэффициент теплопередачи в воздухоподогревателе  $k_{en} = 0,0178 \text{ кВт/(м}^2\cdot\text{К)}$ , температура газов на входе в воздухоподогреватель  $\theta'_{en} = 402^\circ\text{C}$ , температура газов на выходе воздухоподогревателя  $\theta''_{en} = 300^\circ\text{C}$  и потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4 = 4\%$ .

**Решение:** Низшую теплоту сгорания рабочей массы топлива определяем по формуле (1.12):

$$Q_n^p = 338C^p + 1025H^p - 108,5(O^p - S^p_l) - 25W^p = 338 \cdot 62,7 + 1025 \cdot 3,1 - 108,5(1,7 - 2,8) - 25 \cdot 5,0 = 24\,365 \text{ кДж/кг.}$$

Натуральный расход топлива, по формуле (2.25),

$$B = \frac{D_{ne} \left[ (i_{nn} - i_{ns}) + \frac{P}{100} (i_{кв} - i_{ns}) \right]}{Q_p^p \eta_{ка}^{op}} 100 =$$

$$= \frac{5,9 \left[ (2980 - 419) + \frac{4}{100} (830 - 419) \right]}{24365 * 88} 100 =$$

$$= 0,713 \text{ кг/с}$$

$D_{ne}=D$ , так как отсутствует отбор насыщенного пара.

Расчетный расход топлива, по формуле (2.26),

$$B_p = B(1 - q_4/100) = 0,713(1 - 4/100) = 0,684 \text{ кг/с.}$$

Теоретически необходимый объем воздуха находим по (1.27):

$$V^0 = 0,089C^p + 0,226H^p + 0,033(S_l^p - O^p) =$$

$$= 0,089 \cdot 62,7 + 0,266 \cdot 3,1 + 0,033(2,8 - 1,7) = 6,44 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Энтальпия теоретически необходимого объема воздуха на входе в воздухоподогреватель, по формуле (1.62),

$$I'_в = V^0 (ct'_в) = 6,44 \cdot 40 = 258 \text{ кДж/кг.}$$

Энтальпия теоретически необходимого объема воздуха на выходе из воздухоподогревателя, по формуле (1.62),

$$I''_в = V^0 (ct''_в) = 6,44 \cdot 226 = 1455 \text{ кДж/кг.}$$

Отношение объема воздуха на выходе из воздухоподогревателя к теоретически необходимому находим по формуле (2.48):

$$\beta_{вн} = \alpha_{г} - \Delta\alpha_{г} = 1,3 - 0,05 = 1,25.$$

Количество теплоты, воспринятое воздухом в воздухоподогревателе, определяем по формуле (2.46):

$$Q_{вн} = (\beta_{вн} + \Delta\alpha_{вн}/2) (I''_в - I'_в) = (1,25 + 0,06/2)(1455 - 258) =$$

$$= 1532 \text{ кДж/кг.}$$

Температурный напор в воздухоподогревателе находим по (2.41):

$$\Delta t_{ne} = \frac{\Delta t_{\delta} + \Delta t_{м}}{2} = \frac{(402 - 170) + (300 - 30)}{2} = 251^{\circ}\text{C.}$$

Конвективную поверхность нагрева воздухоподогревателя определяем по формуле (2.49):

$$H_{\text{ен}} = \frac{Q_{\text{ен}} B_p}{\kappa_{\text{ен}} \Delta t_{\text{ен}}} = \frac{1532 \cdot 0,684}{0,0178 \cdot 251} = 235 \text{ м}^2.$$

**Задача 2.82.** Определить конвективную поверхность нагрева воздухоподогревателя котельного агрегата паропроизводительностью  $D=13,5$  кг/с, работающего на подмосковном угле марки Б2 состава:  $C^p=28,7\%$ ;  $H^p=2,2\%$ ;  $S_l^p=2,7\%$ ;  $N^p=0,6\%$ ;  $O^p=8,6\%$ ;  $A^p=25,2\%$ ;  $W^p=32,0\%$ , если известны температура топлива на входе в топку  $t_T=20^\circ\text{C}$ , давление перегретого пара  $p_{\text{пп}}=4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{\text{пп}}=450^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{\text{пв}}=150^\circ\text{C}$ , кпд котлоагрегата (брутто)  $\eta_{\text{ка}}^{\text{бp}}=88\%$ , величина непрерывной продувки  $P=4\%$ , энтальпия продуктов сгорания на входе в воздухоподогреватель  $I'_s=3780$  кДж/кг, энтальпия продуктов сгорания на выходе из воздухоподогревателя  $I''_s=2770$  кДж/кг, средняя температура воздуха  $t_{\text{ср.в}}=110^\circ\text{C}$ , присос воздуха в воздухоподогревателе  $\Delta\alpha_{\text{ен}}=0,05$ , коэффициент теплопередачи в воздухоподогревателе  $\kappa_{\text{ен}}=0,0174$  кВт/( $\text{м}^2 \cdot \text{K}$ ), температурный напор в воздухоподогревателе  $\Delta t_{\text{ен}}=230^\circ\text{C}$ , потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4=4\%$  и потери теплоты в окружающую среду  $q_5=1\%$ .

*Ответ:*  $H_{\text{ен}}=967 \text{ м}^2$ .

## 2.5. Золовый износ и низкотемпературная коррозия

**Золовый износ.** Максимально допустимый золовый износ (м) стенки трубы в наиболее опасном сечении определяется по формуле

$$h_{\text{max}} = a m \eta \beta_{\text{к}} \mu_{\text{зл}} (\beta_w w)^3 \tau, \quad (2.50)$$



где  $a$  – коэффициент, учитывающий абразивные свойства золы,  $\text{м}\cdot\text{с}^3/(\text{кг}\cdot\text{ч})$ ;  $m$  – коэффициент, учитывающий сопротивляемость металла износу и равный: для углеродистых труб  $m=1$ , для хромомолибденовых  $m=0,7$ ;

$\eta$  – коэффициент, учитывающий вероятность ударов частиц золы о поверхность трубы;

$\beta_k$  – коэффициент неравномерности концентрации золы;

$\mu_{зл}$  – концентрация золы в продуктах сгорания,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\beta_w$  – коэффициент неравномерности скорости газов;

$w$  – средняя скорость газа в узких промежутках между трубами,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$\tau$  – длительность работы поверхности нагрева, ч.

Концентрация золы ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) в продуктах сгорания

$$\mu_{зл} = \frac{A^p a_{ун}}{100V_г} \frac{273}{\theta'+273}, \quad (2.51)$$

где  $A^p$  – содержание золы в топливе, %;

$a_{ун}$  – доля золы топлива, уносимая продуктами сгорания;

$V_г$  – объем продуктов сгорания,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ;

$\theta'$  – температура газов на входе в пучок,  $^\circ\text{C}$ .

**Низкотемпературная коррозия.** Для предотвращения коррозии в трубах воздухоподогревателей необходимо, чтобы температура стенок труб была выше температуры точки росы продуктов сгорания.

Температура точки росы ( $^\circ\text{C}$ ) продуктов сгорания определяется по формуле

$$t_p = \frac{1253\sqrt{S_{np}^p}}{1,05a_{ун}A_{np}^p} + t_k, \quad (2.52)$$

где  $S_{np}^p$  – приведенная сернистость топлива,  $\text{кг}\cdot\%/ \text{МДж}$ ;

$a_{ун}$  – доля золы топлива, уносимая продуктами сгорания из топки, равная для слоевых топок 0,2...0,3, для камерных — 0,85;

$A_{np}^p$  – приведенная зольность топлива,  $\text{кг}\cdot\%/ \text{МДж}$ ;

$t_k$  – температура конденсации водяных паров,  $^\circ\text{C}$ .

**Задача 2.83.** Определить максимально допустимый золотый износ стенки хромомолибденовой трубы воздухоподогревателя котельного агрегата, если известны коэффициент, учитывающий абразивные свойства золы  $a=10 \cdot 10^{-9} \text{ м} \cdot \text{с}^3 / (\text{кг} \cdot \text{ч})$ , коэффициент, учитывающий вероятность ударов частиц золы о поверхность трубы,  $\eta=0,334$ , коэффициент неравномерности концентрации золы  $\beta_k=1,2$ , коэффициент неравномерности скорости газов  $\beta_w=1,25$ , средняя скорость газа в узких промежутках между трубами  $w=10 \text{ м/с}$ , длительность работы поверхности нагрева  $\tau=8160 \text{ ч}$ , доля золы топлива, уносимая продуктами сгорания из топки  $a_{ун}=0,85$ , температура газов на входе в пучок  $\theta'=407^\circ\text{C}$  и коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T=1,3$ . Котельный агрегат работает на карагандинском угле марки К состава:  $C^p=54,7\%$ ;  $H^p=3,3\%$ ;  $S_l^p=0,8\%$ ;  $N^p=0,8\%$ ;  $O^p=4,8\%$ ;  $A^p=27,6\%$ ;  $W^p=8,0\%$ .

*Ответ:*  $h_{max}=0,52 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

**Задача 2.84.** Определить максимально допустимый золотый износ стенки углеродистой трубы воздухоподогревателя котельного агрегата, если известны коэффициент, учитывающий абразивные свойства золы,  $a=14 \cdot 10 \text{ м} \cdot \text{с}^3 / (\text{кг} \cdot \text{ч})$ , коэффициент, учитывающий вероятность ударов частиц золы о поверхность трубы,  $\eta=0,334$ , коэффициент неравномерности концентрации золы  $\beta_k=1,2$ , коэффициент неравномерности скорости газов  $\beta_w=1,25$ , средняя скорость газа в узких промежутках между трубами  $w=12 \text{ м/с}$ , длительность работы поверхности нагрева  $\tau=8160 \text{ ч}$ , доля золы топлива, уносимая продуктами сгорания из топки,  $a_{ун}=0,85$ , коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T=1,3$ , объем продуктов сгорания  $V_\varepsilon=7,24 \text{ м}^3/\text{кг}$  и температура газов на входе в пучок  $\theta'=412^\circ\text{C}$ . Котельный агрегат работает на донецком угле марки Д с содержанием золы  $A^p=21,8\%$ .

*Ответ:*  $h_{max}=1,54 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

**Задача 2.85.** В топке котельного агрегата сжигается донецкий уголь марки Т состава:  $C^p=62,7\%$ ;  $H^p=3,1\%$ ;  $S_l^p=2,8\%$ ;  $N^p=0,9\%$ ;  $O^p=1,7\%$ ;  $A^p=23,8\%$ ;  $W^p=5,0\%$ . Определить температуру точки росы продуктов сгорания, если известны доля золы

эплива, уносимая продуктами сгорания из топки,  $a_{yh}=0,85$  и температура конденсации водяных паров  $t_k=50^\circ\text{C}$ .

*Ответ:*  $t_p=132^\circ\text{C}$ .

**Задача 2.86.** Определить максимально допустимый золовый износ стенки углеродистой трубы воздухоподогревателя котельного агрегата и температуру точки росы продуктов сгорания, если известны коэффициент, учитывающий абразивные свойства золы,  $a=14\cdot 10^{-9}$  м·с<sup>3</sup>/(кг·ч), коэффициент, учитывающий вероятность ударов частиц золы о поверхность трубы,  $\eta=0,334$ , коэффициент неравномерности концентрации золы  $\beta_k=1,2$ , коэффициент неравномерности скорости газов  $\beta_w=1,25$ , средняя скорость газа в узких промежутках между трубами  $w=9$  м/с, длительность работы поверхности нагрева  $\tau=8160$  ч, доля золы топлива, уносимая продуктами сгорания из топки,  $a_{yh}=0,85$ , температура газов на входе в пучок  $\theta'=427^\circ\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T=1,4$  и температура конденсации водяных паров  $t_k=50^\circ\text{C}$ . Котельный агрегат работает на подмосковном угле марки Б2 состава:  $C^p=28,7\%$ ;  $H^p=2,2\%$ ;  $S_l^p=2,7\%$ ;  $N^p=0,6\%$ ;  $O^p=8,6\%$ ;  $A^p=25,2\%$ ;  $W^p=32,0\%$ .

**Решение:** Низшую теплоту сгорания рабочей массы топлива определяем по формуле (1.12):

$$Q_n^p = 338C^p + 1025H^p - 108,5(O^p - S_l^p) - 25W^p = \\ = 338 \cdot 28,7 + 1025 \cdot 2,2 - 108,5(8,6 - 2,7) - 25 \cdot 32,0 = 10\,516 \text{ кДж/кг.}$$

Теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания 1 кг топлива, определяем по формуле (1.27):

$$V^0 = 0,089C^p + 0,226H^p + 0,033(S_l^p - O^p) = \\ = 0,089 \cdot 28,7 + 0,226 \cdot 2,2 + 0,033(2,7 - 8,6) = 2,94 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Объем сухих газов при  $\alpha_T=1,4$ , по формуле (1.43),

$$V_{c2} = V_{RO_2}^0 + V_{N_2}^0 + (\alpha_T - 1)V^0 = \\ = 0,0187(C^p + 0,375S_l^p) + 0,79V^0 + 0,8N^p/100 + (\alpha_T - 1)V^0 = \\ = 0,0187(28,7 + 0,375 \cdot 2,7) + 0,79 \cdot 2,94 + 0,8 \cdot 0,6/100 + (1,4 - 1)2,94 = \\ = 4,06 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Объем водяных паров при  $\alpha_T=1,4$  определяем по (1.44):

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha_T - 1)V^0 = \\ = 0,0124(9 \cdot 2,2 + 32,0) + 0,0161 \cdot 1,4 \cdot 2,94 = 0,7 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем продуктов полного сгорания находим по формуле (1.31):

$$V_{\Sigma} = V_{\Sigma}^0 + V_{H_2O}^0 = 4,06 + 0,7 = 4,76 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Концентрация золы в продуктах сгорания, по формуле (2.51),

$$\mu_{\text{зл}} = \frac{A^p a_{\text{ун}}}{100V_{\Sigma}} \frac{273}{\theta' + 273} = \frac{25,2 \cdot 0,85}{100 \cdot 4,76} \frac{273}{427 + 273} = 0,0175 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

Приведенная зольность топлива, по формуле (1.24),

$$A_{\text{пр}} = A^p / Q_n^p = 25,2 / 10516 = 2,39 \text{ кг}\cdot\%/\text{МДж}.$$

Приведенная сернистость топлива, по формуле (1.26),

$$S_{\text{пр}} = S_l^p / Q_n^p = 2,7 / 10516 = 0,257 \text{ кг}\cdot\%/\text{МДж}.$$

Максимально допустимый золовый износ стенки трубы находим по формуле (2.50):

$$h_{\text{max}} = a m \eta \beta_{\text{к}} \mu_{\text{зл}} (\beta_w w)^3 \tau = \\ = 14 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 0,334 \cdot 1,2 \cdot 0,0175 (1,25 \cdot 9)^3 8160 = 1,13 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Температуру точки росы продуктов сгорания определяем по формуле (2.52):

$$t_p = \frac{125^3 \sqrt{S_{\text{пр}}^p}}{1,05 a_{\text{ун}} A_{\text{пр}}^p} + t_{\text{к}} = \frac{125^3 \sqrt{0,257}}{1,05 \cdot 0,85 \cdot 2,39} + 50 = 122^{\circ}\text{C}.$$

**Задача 2.87.** В топке котельного агрегата сжигается челябинский уголь марки БЗ состава:  $C^p = 37,3\%$ ;  $H^p = 2,8\%$ ;  $S_l^p = 1,0\%$ ;  $N^p = 0,9\%$ ;  $O^p = 10,5\%$ ;  $A^p = 29,5\%$ ;  $W^p = 18,0\%$ . Определить температуру точки росы продуктов, сгорания, если известны доля золы топлива, уносимая продуктами сгорания из топки,  $a_{\text{ун}} = 0,85$  и температура конденсации водяных паров  $t_{\text{к}} = 50^{\circ}\text{C}$ .

*Ответ:*  $t_p = 102^{\circ}\text{C}$ .

## 2.6. Дутьевые и тяговые устройства

Дутьевые устройства предназначены для подачи воздуха в топку котлов с целью организации сжигания топлива. Они состоят из дутьевых вентиляторов и воздухопроводов с регулирующими задвижками.

Тяговые устройства обеспечивают определенную скорость перемещения дымовых газов по газоходам котлоагрегатов и последующее удаление их в атмосферу. Тяговые устройства состоят из газоходов, дымовых труб и дымососов.

**Дутьевые вентиляторы.** Расчетная подача ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) вентилятора определяется по формуле

$$Q_6 = \beta_1 V_p V^0 (\alpha_T - \Delta\alpha_T + \Delta\alpha'_{en} - \Delta\alpha_{nl}) \frac{t_{xв} + 273}{273} 1,01 \cdot 10^5 / h_6, \quad (2.53)$$

где  $\beta_1$  – коэффициент запаса подачи:  $\beta_1 = 1,05$  для котлоагрегатов с паропроизводительностью  $D > 5,6$  кг/с;  $\beta_1 = 1,1$  для  $D < 5,6$  кг/с;

$\Delta\alpha'_{en}$  – утечка воздуха в воздухоподогревателе  $\alpha_T$  — коэффициент избытка воздуха в топке;

$\Delta\alpha_T$  и  $\Delta\alpha_{nl}$  – присос воздуха в топке и в пылеприготовительной установке;

$t_{кв}$  – температура холодного воздуха, поступающего в вентилятор, °С;

$h_6$  – барометрическое давление воздуха, Па.

Мощность (кВт) электродвигателя для привода вентилятора

$$N_э^6 = (\beta_2 Q_6 H_6 / \eta_э^6) 100, \quad (2.54)$$

где  $\beta_2 = 1,1$  – коэффициент запаса мощности электродвигателя;

$H_6$  – расчетный полный напор вентилятора, кПа;

$\eta_э^6$  – эксплуатационный КПД вентилятора, %.

**Дымососы.** Расчетная подача ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) дымососа определяется по формуле

$$Q_{\partial} = \beta_1 B_p (V_z^0 + (\alpha_{\partial} - 1)V^0) \frac{\theta_{\partial} + 273}{273} \frac{1,01 \cdot 10^5}{h_{\partial}}, \quad (2.55)$$

где  $V_z^0$  – теоретический объем продуктов полного сгорания м<sup>3</sup>/кг (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>);

$\alpha_{\partial}$  – коэффициент избытка воздуха перед дымососом;

$\theta_{\partial}$  – температура газов перед дымососом, °С.

Мощность электродвигателя (кВт) для привода дымососа

$$N_{\partial}^{\partial} = (\beta_2 Q_{\partial} H_{\partial} / \eta_{\partial}^{\partial}) 100, \quad (2.56)$$

где  $H_{\partial}$  – расчетный полный напор дымососа, кПа;

$\eta_{\partial}^{\partial}$  — эксплуатационный КПД дымососа, %.

**Дымовая труба.** Объем дымовых газов (м<sup>3</sup>/с), проходящий через дымовую трубу:

$$V_z^{\partial m} = n B_p (V_z^0 + (\alpha_{\partial m} - 1)V^0) \frac{\theta_{\partial m} + 273}{273} \frac{1,01 \cdot 10^5}{h_{\partial}}, \quad (2.57)$$

где  $n$  – число котлоагрегатов, подсоединенных к трубе;

$\alpha_{\partial m}$  – коэффициент избытка воздуха перед дымовой трубой;

$\theta_{\partial m}$  – температура газов перед дымовой трубой, °С. Диаметр устья дымовой трубы

$$d_{\partial m} = 1,13 \sqrt{\frac{V_z^{\partial m}}{w_{\partial m}}}, \quad (2.58)$$

где  $w_{\partial m}$  – скорость газов на выходе из трубы, м/с. Высота дымовой трубы (м) при естественной тяге

$$H = \frac{S}{273 \left( \frac{\rho_v}{273 + t_v} - \frac{\rho_z}{273 + \theta_{cp}} \right) \frac{9,81 h_{\partial}}{1,01 \cdot 10^5}}, \quad (2.59)$$

где  $S$  – тяга, создаваемая трубой, Па;

$\rho_z, \rho_v$  – приведенные к нормальным условиям плотности газа и воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$\theta_{cp}$  – средняя температура газов в дымовой трубе, °С;

$t_v$  – температура окружающего воздуха, °С.

Приведенная к нормальным условиям плотность (кг/м<sup>3</sup>) газа

$$\rho_2 = \frac{1 - 0,01A^p + 0,3\alpha_{dm}V^0}{V_2^{\delta m}}, \quad (2.60)$$

**Задача 2.88.** Определить расчетную подачу вентилятора котельного агрегата паропроизводительностью  $D=13,8$  кг/с, работающего на природном газе с низшей теплотой сгорания  $Q_n^c = 35700$  кДж/м<sup>3</sup>, если давление перегретого пара  $p_{пп}=4$  МПа; температура перегретого пара  $t_{пп}=430^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{пв}=130^\circ\text{C}$ , КПД котлоагрегата (брутто)  $\eta_{ка}^{\delta p} = 91\%$ ; теоретически необходимый объем воздуха  $V^0=9,48$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, коэффициент запаса подачи  $\beta_l=1,05$ , коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T=1,15$ , присос воздуха в топочной камере  $\Delta\alpha_T=0,05$ . утечка воздуха в воздухоподогревателе  $\Delta\alpha'_{en}=0,04$ , температура холодного воздуха, поступающего в вентилятор,  $t_{вп}=20^\circ\text{C}$  и барометрическое давление воздуха  $h_6=98 \cdot 10^3$  Па.

*Ответ:*  $Q_6=14,6$  м<sup>3</sup>/с.

**Задача 2.89.** Определить расчетную подачу вентилятора котельного агрегата, работающего на донецком каменном угле марки Т состава:  $C^p=62,7\%$ ;  $H^p=3,1\%$ ;  $S_l^p=2,8\%$ ;  $N^p=0,9\%$ ;  $O^p=1,7\%$ ;  $A^p=23,8\%$ ;  $W^p=5,0\%$ , если расчетный расход топлива  $B_p=3,1$  кг/с, коэффициент запаса подачи  $\beta_l=1,05$ , коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T=1,2$ , присос воздуха в топочной камере  $\Delta\alpha_T=0,05$ , утечка воздуха в воздухоподогревателе  $\Delta\alpha'_{en} = 0,035$ , температура поступающего в вентилятор холодного воздуха  $t_{хв}=25^\circ\text{C}$  и барометрическое давление воздуха  $h_6=97 \cdot 10^3$  Па.

*Ответ:*  $Q_6=28,1$  м<sup>3</sup>/с.

**Задача 2.90.** Определить мощность электродвигателя для привода вентилятора котельного агрегата паропроизводительностью  $D=4,16$  кг/с, работающего на природном газе Дашавского месторождения состава:  $\text{CO}_2=0,2\%$ ;  $\text{CH}_4=98,9\%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6=0,3\%$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8=0,1\%$ ;  $\text{C}_4\text{H}_{10}=0,1\%$ ;  $\text{N}_2=0,4\%$ , если давление перегретого пара  $p_{пп}=1,4$  МПа, температура перегретого пара

$t_{\text{пп}}=275^{\circ}\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{\text{пв}}=130^{\circ}\text{C}$ , величина непрерывной продувки  $P=3\%$ , КПД котлоагрегата (брутто)  $\eta_{\text{ка}}^{\text{бр}}=90\%$ , коэффициент запаса подачи  $\beta_1=1,1$ , коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_{\text{T}}=1,1$ , присос воздуха в топочной камере  $\Delta\alpha_{\text{T}}=0,05$ , утечка воздуха в воздухоподогревателе  $\Delta\alpha'_{\text{ен}}=0,04$ , температура холодного воздуха, поступающего в вентилятор,  $t_{\text{хв}}=20^{\circ}\text{C}$ , расчетный полный напор вентилятора  $H_{\text{в}}=2,1$  кПа, коэффициент запаса мощности электродвигателя  $\beta_2=1,1$ , эксплуатационный КПД вентилятора  $\eta_{\text{в}}^{\text{д}}=61\%$  и барометрическое давление воздуха  $h_{\text{в}}=98 \cdot 10^3$  Па.

**Решение:** Низшую теплоту сгорания рабочей массы топлива определяем по формуле (1.13):

$$Q_n^p = 358\text{CH}_4 + 638\text{C}_2\text{H}_6 + 913\text{C}_3\text{H}_8 + 1187\text{C}_4\text{H}_{10} = \\ = 358 \cdot 98,9 + 638 \cdot 0,3 + 913 \cdot 0,1 + 1187 \cdot 0,1 = 35807 \text{ кДж/м}^3.$$

Расчетный расход топлива, по формуле (2.25),

$$B = \frac{D_{\text{не}} \left[ (i_{\text{тн}} - i_{\text{нв}}) + \frac{P}{100} (i_{\text{кв}} - i_{\text{нв}}) \right]}{Q_p^p \eta_{\text{ка}}^{\text{бр}}} 100 = \\ = \frac{4,16 \left[ (2980 - 544) + \frac{3}{100} (830 - 544) \right]}{35807 \cdot 90} 100 = \\ = 0,316 \text{ м}^3/\text{с}$$

Теоретически необходимый объем воздуха, по формуле (1.28),

$$V^0 = 0,0478 [0,5(\text{CO} + \text{H}_2) + 1,5\text{H}_2\text{S} + 2\text{CH}_4 + \Sigma(m+n/4)\text{C}_m\text{H}_n - \text{O}_2] = \\ = 0,0478 (2 \cdot 98,9 + 3,5 \cdot 0,3 + 5 \cdot 0,1 + 6,5 \cdot 0,1) = 9,56 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Расчетная подача вентилятора, по формуле (2.53),

$$Q_{\text{в}} = \beta_1 B_p V^0 (\alpha_{\text{T}} - \Delta\alpha_{\text{T}} + \Delta\alpha'_{\text{ен}} - \Delta\alpha_{\text{нл}}) \frac{t_{\text{хв}} + 273}{273} 1,01 \cdot 10^5 / h_{\text{в}} = \\ = 1,1 \cdot 0,316 \cdot 9,56 (1,1 - 0,05 + 0,04) \frac{20 + 273}{273} \frac{1,01 \cdot 10^5}{98 \cdot 10^3} = 4,1 \text{ м}^3/\text{с}.$$



Мощность электродвигателя для привода вентилятора, формуле (2.54),

$$N_{\text{э}}^6 = (\beta_2 Q_6 H_6 / \eta_{\text{э}}^6) 100 = (1,1 \cdot 4,1 \cdot 2,1 / 61) 100 = 15,5 \text{ кВт.}$$

**Задача 2.91.** Определить мощность электродвигателя привода вентилятора котельного агрегата, работающего на ром угле состава:  $C^p=41,6\%$ ;  $H^p=2,8\%$ ;  $S_l^p=0,2\%$ ;  $N^p=0,7\%$ ;  $O^p=11,7\%$ ;  $A^p=10,0\%$ ;  $W^p=33,0\%$ , если коэффициент запаса подачи  $\beta_l=1,1$ , расчетный расход топлива  $B_p=2,1$  кг/с, коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T=1,25$ , присос воздуха в топочной камере  $\Delta\alpha_T=0,06$ , утечка воздуха в воздухоподогревателе  $\Delta\alpha'_{\text{ен}}=0,04$ , температура холодного воздуха, поступающего в вентилятор,  $t_{\text{хв}}=20^\circ\text{C}$ , расчетный полный напор вентилятора  $H_6=1,9$  кПа, коэффициент запаса мощности электродвигателя  $\beta_2=1,13$  эксплуатационный КПД вентилятора  $\eta_{\text{э}}^6=62\%$  и барометрическое давление воздуха  $h_6=97 \cdot 10^3$  Па.

*Ответ:*  $N_{\text{э}}^6=43,8$  кВт.

**Задача 2.92.** Определить мощность электродвигателя для привода вентилятора котельного агрегата паропроизводительностью  $D=13,9$  кг/с, работающего на подмосковном угле с низшей теплотой сгорания  $Q_n^p=10\,636$  кДж/кг, если температура топлива на входе в топку  $t_T=20^\circ\text{C}$ , теплоемкость рабочей массы топлива  $c_m^p=2,1$  кДж/(кг·К), давление перегретого пара  $p_{\text{пп}}=4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{\text{пп}}=450^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{\text{пв}}=150^\circ\text{C}$ , КПД котлоагрегата (брутто)  $\eta_{\text{ка}}^{\text{бр}}=86\%$ , теоретически необходимый объем воздуха  $V^0=2,98$  м<sup>3</sup>/кг, коэффициент запаса подачи  $\beta_l=1,05$ , коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T=1,25$ , присос воздуха в топочной камере  $\Delta\alpha_T=0,05$ , утечка воздуха в воздухоподогревателе  $\Delta\alpha'_{\text{ен}}=0,04$ , температура холодного воздуха, поступающего в вентилятор,  $t_{\text{хв}}=25^\circ\text{C}$ , расчетный полный напор вентилятора  $H_6=1,95$  кПа,

коэффициент запаса мощности электродвигателя  $\beta_2=1,1$ , эксплуатационный КПД вентилятора  $\eta_{\text{э}}^6=61\%$ , барометрическое давление воздуха  $h_{\text{б}}=98 \cdot 10^3$  Па и потери теплоты от механической неполноты, сгорания топлива  $q_4=4\%$ .

*Ответ:*  $N_{\text{э}}^6=60,3$  кВт.

**Задача 2.93.** Определить расчетный полный напор вентилятора котельного агрегата, работающего на фрезерном торфе состава:  $C^p=24,7\%$ ;  $H^p=2,6\%$ ;  $S_l^p=0,1\%$ ;  $N^p=1,1\%$ ;  $O^p=15,2\%$ ;  $A^p=6,3\%$ ;  $W^p=50,0\%$ , если расчетный расход топлива  $B_p=4,6$  кг/с, коэффициент запаса подачи  $\beta_l=1,05$ , коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T=1,25$ , присос воздуха в топочной камере  $\Delta\alpha_T=0,05$ , утечка воздуха в воздухоподогревателе  $\Delta\alpha'_{\text{ен}}=0,045$ , температура холодного воздуха, поступающего в вентилятор,  $t_{\text{хв}}=20^\circ\text{C}$ , мощность электродвигателя для привода вентилятора  $N_{\text{э}}^6=60$  кВт, коэффициент запаса мощности электродвигателя  $\beta_2=1,1$ , эксплуатационный КПД вентилятора  $\eta_{\text{э}}^6=60\%$  и барометрическое давление воздуха  $h_{\text{б}}=97 \cdot 10^3$  Па.

*Ответ:*  $H_{\text{б}}=1,96$  кПа.

**Задача 2.94.** Определить расчетный полный напор вентилятора котельного агрегата, работающего на буром угле с низшей теплотой сгорания  $Q_n^p=15\,800$  кДж/кг, если коэффициент запаса подачи  $\beta_l=1,05$ , условный расход топлива  $B_y=1,45$  кг/с, коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T=1,25$ , присос воздуха в топочной камере  $\Delta\alpha_T=0,05$ , теоретически необходимый объем воздуха  $V^0=4$  м<sup>3</sup>/кг, утечка воздуха в воздухоподогревателе  $\Delta\alpha'_{\text{ен}}=0,04$ , температура холодного воздуха, поступающего в вентилятор,  $t_{\text{хв}}=25^\circ\text{C}$ , мощность электродвигателя для привода вентилятора  $N_{\text{э}}^6=54$  кВт, коэффициент запаса мощности электродвигателя  $\beta_2=1,1$ , эксплуатационный КПД вентилятора  $\eta_{\text{э}}^6=61\%$ , барометрическое давление воздуха  $h_{\text{б}}=98 \cdot 10^3$  Па и потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4=5\%$ .

*Ответ:*  $H_6=2,06$  кПа.

**Задача 2.95.** Определить расчетную подачу дымососа котельного агрегата, работающего на природном газе состава:  $\text{CO}_2=0,2\%$ ;  $\text{CH}_4=97,9\%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_4=0,1\%$ ;  $\text{N}_2=1,8\%$ , если коэффициент запаса подачи  $\beta_I=1,1$ , расчетный расход топлива  $B_p=0,32$  кг/с, коэффициент избытка воздуха перед дымососом  $\alpha_d=1,45$ , температура газов перед дымососом  $\theta_d=188^\circ\text{C}$  и барометрическое давление воздуха  $h_6=97 \cdot 10^3$  Па.

*Ответ:*  $Q_d=9$  м<sup>3</sup>/с.

**Задача 2.96.** Определить расчетную подачу дымососа котельного агрегата паропроизводительностью  $D=13,9$  кг/с, работающего на подмосковном угле состава:  $\text{C}^p=28,7\%$ ;  $\text{H}^p=2,2\%$ ;  $\text{S}_l^p=2,7\%$ ;  $\text{N}^p=0,6\%$ ;  $\text{O}^p=8,6\%$ ;  $\text{A}^p=25,2\%$ ;  $\text{W}^p=32,0\%$ , если температура топлива на входе в топку  $t_T=20^\circ\text{C}$ , КПД котлоагрегата (брутто)  $\eta_{ка}^{\text{бp}}=88\%$ , давление перегретого пара  $p_{\text{пн}}=4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{\text{пн}}=450^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{\text{пв}}=140^\circ\text{C}$ , величина непрерывной продувки  $P=3\%$ , коэффициент запаса подачи  $\beta_I=1,05$ , коэффициент избытка воздуха перед дымососом  $\alpha_d=1,55$ , температура газов перед дымососом  $\theta_d=180^\circ\text{C}$ , потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4=4,5\%$  и барометрическое давление  $h_6=98 \cdot 10^3$  Па.

*Ответ:*  $Q_d=41,5$  м<sup>3</sup>/с.

**Задача 2.97.** Определить мощность электродвигателя для привода дымососа котельного агрегата паропроизводительностью  $D=9,73$  кг/с, работающего на челябинском буром угле состава:  $\text{C}^p=37,3\%$ ;  $\text{H}^p=2,8\%$ ;  $\text{S}_l^p=1,0\%$ ;  $\text{N}^p=0,9\%$ ;  $\text{O}^p=10,5\%$ ;  $\text{A}^p=29,5\%$ ;  $\text{W}^p=18,0\%$ , если температура топлива на входе в топку  $t_T=20^\circ\text{C}$ , давление перегретого пара  $p_{\text{пн}}=1,4$  МПа, температура перегретого пара  $t_{\text{пн}}=275^\circ\text{C}$ , температура питательной воды  $t_{\text{пв}}=100^\circ\text{C}$ , КПД котлоагрегата (брутто)  $\eta_{ка}^{\text{бp}}=86\%$ , величина непрерывной продувки  $P=3\%$ , коэффициент запаса подачи  $\beta_I=1,05$ , коэффициент избытка воздуха перед дымососом  $\alpha_d=1,6$ , температура газов перед дымососом  $\theta_d=182^\circ\text{C}$ , расчетный полный

напор дымососа  $H_d=2,2$  кПа, коэффициент запаса мощности электродвигателя  $\beta_2=1,1$ , эксплуатационный КПД дымососа  $\eta_э^6=65\%$ , барометрическое давление воздуха  $h_6=97 \cdot 10^3$  Па и потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4=4\%$ .

**Решение:** Низшую теплоту сгорания рабочей массы топлива определяем по формуле (1.12):

$$Q_n^p = 338C^p + 1025H^p - 108,5(O^p - S_l^p) - 25W^p = \\ = 338 \cdot 37,3 + 1025 \cdot 2,8 - 108,5(10,5 - 1,0) - 25 \cdot 18,0 = 13542 \text{ кДж/кг.}$$

Теплоемкость рабочей массы топлива находим по формуле (2.5):

$$c_m^p = c_m^c \frac{100 - W^p}{100} + c_{H_2O} \frac{W^p}{100} = 1,088 \frac{100 - 18,0}{100} + 4,19 \frac{18,0}{100} = 1,65 \\ \text{кДж/(кг} \cdot \text{К).}$$

Физическую теплоту топлива определяем по формуле (2.4):

$$Q_{мл} = c_m^p / t_T = 1,65 \cdot 20 = 33 \text{ кДж/кг.}$$

Располагаемую теплоту находим по формуле (2.3):

$$Q_m^p = Q_n^p + Q_{мл} = 13542 + 33 = 13575 \text{ кДж/кг.}$$

Натуральный расход топлива, по формуле (2.25),

$$B = \frac{D_{ne} \left[ (i_{nn} - i_{ng}) + \frac{P}{100} (i_{кв} - i_{ng}) \right]}{Q_p^p \eta_{ка}^{6p}} 100 = \\ = \frac{9,73 \left[ (2980 - 419) + \frac{3}{100} (830 - 419) \right]}{13575 \cdot 86} 100 = \\ = 2,06 \text{ кг/с}$$

$D_{ne}=D$ , так как отсутствует отбор насыщенного пара.

Расчетный расход топлива, по формуле (2.26),

$$B_p = B(1 - q_4/100) = 2,06(1 - 4/100) = 1,98 \text{ кг/с.}$$

Теоретически необходимый объем воздуха, по формуле (1.27),

$$V^0 = 0,089C^p + 0,226H^p + 0,033(S_a^p - O^p) = \\ = 0,089 \cdot 37,3 + 0,266 \cdot 2,8 + 0,033(1,0 - 10,5) = 3,75 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Теоретический объем продуктов полного сгорания, по формуле (1.36),

$$\begin{aligned}
 V_z^0 &= 0,0187(C^P + 0,375S_n^P) + 0,79V^0 + \frac{0,8N^P}{100} \\
 &\quad + 0,0124(9H^P + W^P) + 0,0161V^0 = \\
 &= 0,0187(37,3 + 0,375 \cdot 1,0) + 0,79 \cdot 3,75 + 0,8 \cdot 0,9 / 100 + \\
 &\quad + 0,0124(9 \cdot 2,8 + 18) + 0,0161 \cdot 3,75 = 4,26 \text{ м}^3/\text{кг}.
 \end{aligned}$$

Расчетная подача дымососа, по формуле (2.55),

$$\begin{aligned}
 Q_d &= \beta_1 B_p (V_z^0 + (\alpha_d - 1)V^0) \frac{\theta_d + 273}{273} \frac{1,01 \cdot 10^5}{h_6} = \\
 &= 1,05 \cdot 1,98(4,26 + (1,6 - 1)375) \frac{182 + 273}{273} \frac{1,01 \cdot 10^5}{97 \cdot 10^3} = 23,5 \text{ м}^3/\text{с}.
 \end{aligned}$$

Мощность электродвигателя для привода дымососа, по формуле (2.56),

$$N_d^{\partial} = (\beta_2 Q_d H_d / \eta_d^{\partial}) 100 = (1,1 \cdot 23,5 \cdot 2,2 / 65) 100 = 88 \text{ кВт}.$$

**Задача 2.98.** Определить мощность электродвигателя для привода дымососа котельного агрегата, работающего на малосернистом мазуте состава:  $C^P=84,65\%$ ;  $H^P=11,7\%$ ;  $S_n^P=0,3\%$ ;  $O^P=0,3\%$ ;  $A^P=0,05\%$ ;  $W^P=3,0\%$ , если коэффициент запаса подачи  $\beta_1=1,05$ , расчетный расход топлива  $B_p=1,05$  кг/с, коэффициент избытка воздуха перед дымососом  $\alpha_d=1,5$ , температура газов перед дымососом  $\theta_d=195^\circ\text{C}$ , расчетный полный напор дымососа  $H_d=2,14$  кПа, коэффициент запаса мощности электродвигателя  $\beta_2=1,1$ , эксплуатационный КПД дымососа  $\eta_d^{\partial} = 63\%$  и барометрическое давление воздуха  $h_6=97 \cdot 10^3$  Па.

*Ответ:*  $N_d^{\partial} = 122$  кВт.

**Задача 2.99.** Определить расчетный полный напор дымососа котельного агрегата, работающего на природном газе состава:  $\text{CO}_2=0,1\%$ ;  $\text{CH}_4=98\%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6=0,4\%$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8=0,2\%$ ;  $\text{N}_2=1,3\%$ , если коэффициент запаса подачи  $\beta_1=1,1$ , расчетный расход топлива  $B_p=1$  кг/с, коэффициент избытка воздуха перед дымососом  $\alpha_d=1,45$ , температура газов перед дымососом  $\theta_d=177^\circ\text{C}$ ,

мощность электродвигателя для привода дымососа  $N_{\partial}^{\partial}=80$  кВт, коэффициент запаса мощности электродвигателя  $\beta_2=1,1$ , эксплуатационный КПД дымососа  $\eta_{\partial}^{\partial}=62\%$  и барометрическое давление воздуха  $h_{\partial}=98 \cdot 10^3$  Па.

*Ответ:*  $H_{\partial}=1,62$  кПа.

**Задача 2.100.** Определить расчетный полный напор дымососа котельного агрегата, работающего на высокосернистом мазуте состава:  $C^p=83,0\%$ ;  $H^p=10,4\%$ ;  $S_{\text{л}}^p=2,8\%$ ;  $O^p=0,7\%$ ;  $A^p=0,1\%$ ;  $W^p=3,0\%$ , если коэффициент запаса подачи  $\beta_1=1,05$ , условный расход топлива  $B_y=1,36$  кг/с, коэффициент избытка воздуха перед дымососом  $\alpha_{\partial}=1,5$ , температура газов перед дымососом  $\theta_{\partial}=192^{\circ}\text{C}$ , мощность электродвигателя для привода дымососа  $N_{\partial}^{\partial}=102$  кВт, коэффициент запаса мощности электродвигателя  $\beta_2=1,1$ , эксплуатационный КПД дымососа  $\eta_{\partial}^{\partial}=66\%$  и барометрическое давление воздуха  $h_{\partial}=97 \cdot 10^3$  Па.

*Ответ:*  $H_{\partial}=2$  кПа.

**Задача 2.101.** Определить объем дымовых газов, проходящих через дымовую трубу котельной, в которой установлены два одинаковых котлоагрегата, работающих на донецком угле марки Д состава:  $C^p=49,3\%$ ;  $H^p=3,6\%$ ;  $S_{\text{л}}^p=3,0\%$ ;  $N^p=1,0\%$ ;  $O^p=8,3\%$ ;  $A^p=21,8\%$ ;  $W^p=13,0\%$ , если расчетный расход топлива  $B_p=1,12$  кг/с, температура газов перед дымовой трубой  $\theta_{\partial m}=185^{\circ}\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха перед трубой  $\alpha_{\partial m}=1,5$  и барометрическое давление воздуха  $h_{\partial}=98 \cdot 10^3$  Па.

*Ответ:*  $V_{\partial}^{\partial m}=32,4$  м<sup>3</sup>/с.

**Задача 2.102.** Определить диаметр устья дымовой трубы и объем газов, проходящих через дымовую трубу котельной, в которой установлены три одинаковых котлоагрегата, работающих на карагандинском угле марки К состава:  $C^p=54,7\%$ ;  $H^p=3,3\%$ ;  $S_{\text{л}}^p=0,8\%$ ;  $N^p=0,8\%$ ;  $O^p=4,8\%$ ;  $A^p=27,6\%$ ;  $W^p=8,0\%$ , если расчетный расход топлива  $B_p=2,1$  кг/с, температура газов перед дымовой трубой  $\theta_{\partial m}=187^{\circ}\text{C}$ , коэффициент избытка

воздуха перед трубой  $\alpha_{dm}=1,5$ , скорость газов на выходе из трубы  $w_{dm}=8,8$  м/с и барометрическое давление воздуха  $h_6=97 \cdot 10^3$  Па.

*Ответ:*  $d_{dm}=3,8$  м;  $V_z^{dm}=98,3$  м<sup>3</sup>/с.

**Задача 2.103.** Определить высоту и диаметр устья дымовой трубы котельной, в которой установлены два одинаковых котлоагрегата, работающих на малосернистом мазуте состава:  $C^p=84,65\%$ ;  $H^p=11,7\%$ ;  $S_l^p=0,3\%$ ;  $O^p=0,3\%$ ;  $A^p=0,05\%$ ;  $W^p=3,0\%$ , если тяга, создаваемая трубой,  $S=231$  Па, расчетный расход топлива  $B_p=1,05$  кг/с, температура газов перед дымовой трубой  $\theta_{dm}=182^\circ\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха перед трубой  $\alpha_{dm}=1,5$ , средняя температура газов в трубе  $\theta_{cp}=187^\circ\text{C}$ , температура окружающего воздуха  $t_b=20^\circ\text{C}$ , скорость газов на выходе из трубы  $w_{dm}=10$  м/с, барометрическое давление воздуха  $h_6=97 \cdot 10^3$  Па и приведенная к нормальным условиям плотность воздуха  $\rho_6=1,205$  кг/м<sup>3</sup>.

**Решение:** Теоретически необходимый объем воздуха определяем по формуле (1.27):

$$\begin{aligned} V^0 &= 0,089C^p + 0,226H^p + 0,033(S_l^p - O^p) = \\ &= 0,089 \cdot 84,65 + 0,266 \cdot 11,7 + 0,033(0,3 - 0,3) = 10,62 \text{ м}^3/\text{кг}. \end{aligned}$$

Теоретический объем продуктов полного сгорания, по формуле (1.36),

$$\begin{aligned} V_z^0 &= 0,0187(C^p + 0,375S_l^p) + 0,79V^0 + \frac{0,8N^p}{100} + \\ &+ 0,0124(9H^p + W^p) + 0,0161V^0 = \\ &= 0,0187(84,65 + 0,375 \cdot 0,3) + 0,79 \cdot 10,62 + 0,8/100 + \\ &+ 0,0124(9 \cdot 11,7 + 3,0) + 0,0161 \cdot 10,62 = 11,48 \text{ м}^3/\text{кг}. \end{aligned}$$

Объем газов, проходящих через дымовую трубу, по формуле (2.57),

$$\begin{aligned} V_z^{dm} &= nB_p \left( V_z^0 + (\alpha_{dm} - 1)V^0 \right) \frac{\theta_{dm} + 273}{273} \frac{1,01 \cdot 10^5}{h_6} = \\ &= 2 \cdot 1,05(11,48 + (1,5 - 1)10,62) \frac{182 + 273}{273} \frac{1,01 \cdot 10^5}{97 \cdot 10^3} = 62,4 \text{ м}^3/\text{с}. \end{aligned}$$

Приведенную к нормальным условиям плотность газа находим по формуле (2.60):

$$\begin{aligned}\rho_z &= \frac{1 - 0,01A^p + 0,3\alpha_{\partial m}V_0}{V_z^{\partial m}} = \\ &= \frac{1 - 0,01 * 0,05 + 0,3 * 1,5 * 10,62}{62,4} = \\ &0,33 \text{ кг/м}^3\end{aligned}$$

Высота дымовой трубы, по формуле (2.59),

$$\begin{aligned}H &= \frac{S}{273 \left( \frac{\rho_e}{273 + t_e} - \frac{\rho_z}{273 + \theta_{cp}} \right) \frac{9,81h_6}{1,01 * 10^5}} = \\ &= \frac{231}{273 \left( \frac{1,205}{273 + 20} - \frac{0,33}{273 + 180} \right) \frac{9,81 * 97 * 10^3}{1,01 * 10^5}} = \\ &= 26,5 \text{ м}\end{aligned}$$

Диаметр устья дымовой трубы, по формуле (2.58),

$$d_{\partial m} = 1,13 \sqrt{\frac{V_z^{\partial m}}{w_{\partial m}}} = 1,13 \sqrt{\frac{62,4}{10}} = 2,8 \text{ м.}$$

**Задача 2.104.** Определить высоту дымовой трубы котельной если тяга, создаваемая трубой,  $S=192$  Па, температура газов на входе в дымовую трубу  $\theta_{\partial m}=180^\circ\text{C}$ , температура газов на выходе из дымовой трубы  $\theta'_{\partial m}=186^\circ\text{C}$ , температура окружающего воздуха  $t_b=20^\circ\text{C}$ , приведенная к нормальным условиям плотности газа  $\rho_z=0,52$  кг/м<sup>3</sup>, приведенная к нормальным условиям плотность воздуха  $\rho_e=1,205$  кг/м<sup>3</sup> и барометрическое давление в духа  $h_6=98 \cdot 10^3$  Па.

*Ответ:*  $H=25$  м.



## 2.7. Расчет дымовой трубы на рассеивание в атмосфере загрязняющих веществ

Расчет дымовой трубы на рассеивание в атмосфере загрязняющих веществ состоит в проверке высоты трубы на рассеивание в атмосфере золы, оксидов азота и диоксида серы SO<sub>2</sub> (IV). Высота дымовой трубы должна обеспечивать такое рассеивание загрязняющих веществ в атмосфере, при котором их концентрация у поверхности земли будет меньше предельно допустимой санитарными нормами. Предельно допустимая концентрация (п.д.к) не должна превышать для золы и диоксида серы значения  $0,5 \cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup>.

Концентрация загрязняющих веществ (кг/м<sup>3</sup>) у поверхности земли определяется по формуле

$$C = 0,001 \frac{AMFm}{H^2 \sqrt[3]{V_z^{\partial m} \Delta t}} + 2C_{\phi}, \quad (2.61)$$

где  $A$  – коэффициент стратификации атмосферы,  $C^{2/3}$  град<sup>1/3</sup>;

$M$  – масса загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу из дымовой трубы, кг/с;

$F$  – коэффициент, учитывающий скорость осаждения загрязняющих веществ в атмосфере;

$m$  – коэффициент, учитывающий условия выхода продуктов сгорания из устья дымовой трубы;

$H$  – высота дымовой трубы, м;

$V_z^{\partial m}$  – объем продуктов сгорания, проходящих через дымовую трубу, м<sup>3</sup>/с;

$\Delta t = \theta_{\partial m} - t_{\text{в}}$  – разность между температурой газов на выходе из дымовой трубы  $\theta_{\partial m}$  и температурой окружающего воздуха  $t_{\text{в}}$ , °С;

$C_{\phi}$  – фоновая концентрация загрязняющих веществ в атмосфере, кг/м<sup>3</sup>.

Масса золы (кг/с), выбрасываемой в атмосферу из дымовой трубы,

$$M=0,01 n B_p a_{yn} A^p, \quad (2.62)$$

где  $n$  – число котлоагрегатов, подсоединенных к трубе;

$B_p$  – расчетный расход топлива, кг/с;

$a_{yn}$  – доля золы топлива, уносимая дымовыми газами.

Масса диоксида серы (кг/с), выбрасываемого в атмосферу из дымовой трубы,

$$M=0,01nB_pS_l^p \frac{M_{SO_2}}{M_S}, \quad (2.63)$$

где  $M_{SO_2} = 64$ ,  $M_S = 32$  – относительные молекулярные массы диоксида серы и серы.

**Задача 2.105.** Определить концентрацию диоксида серы у поверхности земли для котельной, в которой установлены два одинаковых котлоагрегата, работающих на высокосернистом мазуте состава:  $C^p=83\%$ ;  $H^p=10,4\%$ ;  $S_l^p=2,8\%$ ;  $O^p=0,7\%$ ;  $A^p=0,1\%$ ;  $W^p=3,0\%$ , если известны высота дымовой трубы  $H=31$ м, расчетный расход топлива  $B_p=0,525$  кг/с, температура газов на входе в дымовую трубу  $\theta_{dm}=180^\circ\text{C}$ , температура газов на выходе из дымовой трубы  $\theta'_{dm}=186^\circ\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха перед трубой  $\alpha_{dm}=1,5$ , температура окружающего воздуха  $t_b=20^\circ\text{C}$ , барометрическое давление воздуха  $h_b=97 \cdot 10^3$  Па, коэффициент, учитывающий скорость осаждения диоксида серы в атмосфере,  $F=1,0$ , коэффициент, учитывающий условия выхода продуктов сгорания газов из устья дымовой трубы  $m=0,9$ , коэффициент стратификации атмосферы  $A=120 \text{ с}^{2/3} \cdot \text{град}^{1/3}$  и фоновая концентрация загрязнения атмосферы диоксидом серы  $C_\phi=0,03 \cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup>.

**Решение:** Теоретически необходимый объем воздуха определяем по формуле (1.27):

$$\begin{aligned} V^0 &= 0,089C^p + 0,226H^p + 0,033(S_l^p - O^p) = \\ &= 0,089 \cdot 83 + 0,266 \cdot 10,4 + 0,033(2,8 - 0,7) = 10,2 \text{ м}^3/\text{кг}. \end{aligned}$$

Теоретический объем продуктов полного сгорания находим по формуле (1.36):

$$\begin{aligned}
 V_z^0 &= 0,0187(C^p + 0,375S_l^p) + 0,79V^0 + \frac{0,8N^p}{100} + \\
 &+ 0,0124(9H^p + W^p) + 0,0161V^0 = \\
 &= 0,0187(83 + 0,375 \cdot 2,8) + 0,79 \cdot 10,2 + 0,0124(9 \cdot 10,4 + 3,0) + 0,0161 \cdot 10,2 \\
 &= 10,99 \text{ м}^3/\text{кг}.
 \end{aligned}$$

Объем дымовых газов, проходящих через дымовую трубу, определяем по формуле (2.57):

$$\begin{aligned}
 V_z^{\partial m} &= nB_p \left( V_z^0 + (\alpha_{\partial m} - 1)V^0 \right) \frac{\theta_{\partial m} + 273}{273} \frac{1,01 \cdot 10^5}{h_{\sigma}} \\
 &= 2 \cdot 0,525(10,99 + (1,5 - 1)10,2) \frac{180 + 273}{273} \frac{1,01 \cdot 10^5}{97 \cdot 10^3} = 29 \text{ м}^3/\text{с}.
 \end{aligned}$$

Массу диоксида серы, выбрасываемого в атмосферу из дымовой трубы, находим по формуле (2.63):

$$M = 0,01nB_p S_l^p \frac{M_{SO_2}}{M_S} = 0,01 \cdot 2 \cdot 0,525 \cdot 2,8 \cdot 64/32 = 0,059 \text{ кг/с}.$$

Концентрацию оксида серы у поверхности земли определяем по формуле (2.61):

$$\begin{aligned}
 C &= 0,001 \frac{AMFm}{H^2 \sqrt[3]{V_z^{\partial m} \Delta t}} + 2C_{\phi} = \\
 &= 0,001 \frac{120 \cdot 0,059 \cdot 1 \cdot 0,9}{31^2 \sqrt[3]{29 \cdot 166}} + 2 + 0,03 \cdot 10^{-6} = \\
 &= 0,45 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3
 \end{aligned}$$

**Задача 2.106.** Определить концентрацию диоксида серы у поверхности земли для котельной, в которой установлены три одинаковых котлоагрегата, работающих на донецком угле марки Г состава:  $C^p=62,7\%$ ;  $H^p=3,1\%$ ;  $S_l^p=2,8\%$ ;  $N^p=0,9\%$ ;  $O^p=1,7\%$ ;  $A^p=23,8\%$ ;  $W^p=5,0\%$ , если известны высота дымовой трубы  $H=32$  м, расчетный расход топлива  $B_p=0,35$  кг/с, температура газов на входе в дымовую трубу  $\theta_{\partial m}=180^\circ\text{C}$ , температура газов на выходе из дымовой трубы  $\theta'_{\partial m}=185^\circ\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха

перед трубой  $\alpha_{\partial m}=1,7$ , температура окружающего воздуха  $t_{\text{в}}=20^{\circ}\text{C}$ , барометрическое давление воздуха  $h_{\text{б}}=97 \cdot 10^3 \text{ Па}$ , коэффициент, учитывающий скорость осаждения диоксида серы в атмосфере,  $F=1,0$ , коэффициент, учитывающий условия выхода продуктов сгорания из устья дымовой трубы,  $m=0,9$ , коэффициент стратификации атмосферы  $A=120 \text{ с}^{2/3} \cdot \text{град}^{1/3}$  и фоновая концентрация загрязнения атмосферы диоксидом серы  $C_{\text{ф}}=0,03 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3$ .

*Ответ:*  $C=0,5 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3$ .

**Задача 2.107.** Определить концентрацию золы у поверхности земли для котельной, в которой установлены два одинаковых котлоагрегата, работающих на кузнецком угле марки Д состава:  $C^{\text{п}}=58,7\%$ ;  $H^{\text{п}}=4,2\%$ ;  $S_{\text{л}}^{\text{п}}=0,3\%$ ;  $N^{\text{п}}=1,9\%$ ;  $O^{\text{п}}=9,7\%$ ;  $A^{\text{п}}=13,2\%$ ;  $W^{\text{п}}=12,0\%$ , если известны высота дымовой трубы  $H=32 \text{ м}$ , расчетный расход топлива  $B_{\text{р}}=0,225 \text{ кг/с}$ , температура газов на входе в дымовую трубу  $\theta_{\partial m}=182^{\circ}\text{C}$ , температура газов на выходе из дымовой трубы  $\theta_{\partial m} = 188^{\circ}\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха перед трубой  $\alpha_{\partial m}=1,75$ , температура окружающего воздуха  $t_{\text{в}}=20^{\circ}\text{C}$ , барометрическое давление воздуха  $h_{\text{б}}=97 \cdot 10^3 \text{ Па}$ , доля золы топлива, уносимая дымовыми газами  $a_{\text{ун}}=0,85$ , коэффициент, учитывающий скорость осаждения золы в атмосфере,  $F=1,0$ , коэффициент, учитывающий условия выхода продуктов сгорания из устья дымовой трубы,  $m=0,9$ , коэффициент стратификации атмосферы  $A=120 \text{ с}^{2/3} \cdot \text{град}^{1/3}$  и фоновая концентрация загрязнения атмосферы золой  $C_{\text{ф}}=0,02 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3$ .

*Ответ:*  $C=0,49 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3$ .

**Задача 2.108.** Определить высоту дымовой трубы котельной, в которой установлены три одинаковых котлоагрегата, работающих на донецком угле марки А состава:  $C^{\text{п}}=63,8\%$ ;  $H^{\text{п}}=1,2\%$ ;  $S_{\text{л}}^{\text{п}}=1,7\%$ ;  $N^{\text{п}}=0,6\%$ ;  $O^{\text{п}}=1,3\%$ ;  $A^{\text{п}}=22,9\%$ ;  $W^{\text{п}}=8,5\%$ , если известны расчетный расход топлива  $B_{\text{р}}=0,63 \text{ кг/с}$ , температура газов на входе в дымовую трубу  $\theta_{\partial m}=178^{\circ}\text{C}$ , температура газов на выходе из дымовой трубы  $\theta_{\partial m} = 184^{\circ}\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха перед трубой  $\alpha_{\partial m}=1,7$ ,

температура окружающего воздуха  $t_{\text{в}}=20^{\circ}\text{C}$ , барометрическое давление воздуха  $h_{\text{б}}=97\cdot 10^3$  Па, коэффициент, учитывающий скорость осаждения диоксида серы в атмосфере,  $F=1,0$ , коэффициент, учитывающий условия выхода продуктов сгорания из устья дымовой трубы,  $m=0,9$ , коэффициент стратификации атмосферы  $A=120 \text{ с}^{2/3}\cdot\text{град}^{1/3}$ , фоновая концентрация загрязнения атмосферы диоксидом серы  $C_{\text{ф}}=0,03\cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup> и п.д.к. диоксида серы у поверхности земли  $C=0,5\cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup>.

*Ответ:*  $H=30$  м.

**Задача 2.109.** Определить высоту дымовой трубы котельной в которой установлены два одинаковых котлоагрегата, работающих на ангреном угле марки Б2 состава:  $C^{\text{p}}=39,8\%$ ;  $H^{\text{p}}=2,0\%$ ;  $S_{\text{л}}^{\text{p}}=1,3\%$ ;  $N^{\text{p}}=0,2\%$ ;  $O^{\text{p}}=9,1\%$ ;  $A^{\text{p}}=13,1\%$ ;  $W^{\text{p}}=34,5\%$ , если известны расчетный расход топлива  $B_{\text{р}}=0,21$  кг/с, температура газов на входе в дымовую трубу  $\theta_{\text{дт}}=179^{\circ}\text{C}$ , температура газов на выходе из дымовой труб  $\theta'_{\text{дт}}=183^{\circ}\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха перед трубе  $\alpha_{\text{дт}}=1,75$ , температура окружающего воздуха  $t_{\text{в}}=20^{\circ}\text{C}$ , барометрическое давление воздуха  $h_{\text{б}}=97\cdot 10^3$  Па, доля золы топлив уносимая дымовыми газами,  $a_{\text{ун}}=0,85$ , коэффициент, учитывающий скорость осаждения золы в атмосфере,  $F=1,0$ , коэффициент, учитывающий условия выхода продуктов сгорания из устья дымовой трубы,  $m=0,9$ , коэффициент стратификации атмосферы  $A=120 \text{ с}^{2/3}\cdot\text{град}^{1/3}$ , фоновая концентрация загрязнения атмосферы золой  $C_{\text{ф}}=0,02\cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup> и п. д. к. золы у поверхности земли  $C=0,5\cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup>.

*Ответ:*  $H=34$  м.

## 2.8. Теплообменные аппараты

Для подогрева сетевой, сырой и химически очищенной воды в котельных с водогрейными котлами применяются водоводяные теплообменники, а в котельных с паровыми котлами — пароводяные теплообменники (подогреватели).

**Водоводяные теплообменники.** Количество теплоты (кДж/с) воспринятое нагреваемой водой в теплообменнике, определяется по формуле

$$Q = W_1 c_{p1} (t_1' - t_1'') \eta = W_2 c_{p2} (t_2'' - t_2'), \quad (2.64)$$

где  $W_1$  – расход нагревающей воды, кг/с;

$W_2$  – расход нагреваемой воды, кг/с;

$c_{p1}$  и  $c_{p2}$  – средние массовые теплоемкости нагревающей и нагреваемой воды при постоянном давлении кДж/(кг·К);

$t_1'$  и  $t_1''$  – температуры нагревающей воды на входе и выходе, °С;

$t_2''$  и  $t_2'$  – температуры нагреваемой воды на входе и выходе °С;

$\eta$  – коэффициент, учитывающий потери теплоты теплообменником в окружающую среду.

Поверхность нагрева ( $m^2$ ) теплообменника определяется из уравнения теплопередачи

$$F = \frac{Q}{k \Delta t_{cp}}, \quad (2.65)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи, кВт/( $m^2 \cdot K$ );

$\Delta t_{cp}$  – средний температурный напор в теплообменнике, °С.

Средний температурный напор в прямоточном теплообменнике

$$\Delta t_{cp} = \frac{(t_1' - t_2')(t_1'' - t_2'')}{2,3 \lg \frac{t_1' - t_2''}{t_1'' - t_2'}}, \quad (2.66)$$

Средний температурный напор в противоточном теплообменнике

$$\Delta t_{cp} = \frac{(t_1' - t_2'')(t_1'' - t_2')}{2,3 \lg \frac{t_1' - t_2''}{t_1'' - t_2'}}, \quad (2.67)$$

Если  $\frac{t_1' - t_2'}{t_1'' - t_2''} \leq 1,7$ , то средний температурный напор в теплообменнике находится по формуле

$$\Delta t_{cp} = \frac{t_1' + t_1''}{2} - \frac{t_2' + t_2''}{2}, \quad (2.68)$$

**Пароводяные теплообменники.** Количество теплоты (кДж/с), воспринятое нагреваемой водой в теплообменнике, определяется по формуле

$$Q' = D_1(i'' - i'_k)\eta = W_2 c_{p2}(t_2'' - t_2'), \quad (2.69)$$

где  $D_1$  – расход нагревающего пара, кг/с;

$i''$  – энтальпия нагревающего пара, кДж/кг;

$i'_k$  – энтальпия конденсата, кДж/кг.

Поверхность нагрева ( $m^2$ ) теплообменника находится из уравнения теплопередачи

$$F = \frac{Q'}{k\Delta t_{cp}}, \quad (2.70)$$

Средний температурный напор как в прямоточном, так и в противоточном пароводяном теплообменнике

$$\Delta t_{cp} = \frac{t_2'' - t_2'}{2,3 \lg \frac{t_n - t_2'}{t_n - t_2''}}, \quad (2.71)$$

где  $t_n$  – температура нагревающего пара, °С.

**Задача 2.110.** Определить расход нагреваемой воды и поверхность нагрева прямоточного водоводяного теплообменника, если известны расход нагревающей воды  $W_1 = 15$  кг/с, температура нагревающей воды на входе в теплообменник  $t_1' = 120^\circ\text{C}$ , температура нагревающей воды на выходе из теплообменника  $t_1'' = 80^\circ\text{C}$ , температура нагреваемой воды на входе в теплообменник  $t_2' = 10^\circ\text{C}$ , температура нагреваемой воды на

выходе из теплообменника  $t_2''=60^\circ\text{C}$ , коэффициент теплопередачи  $k=1,9 \text{ кВт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$  и коэффициент, учитывающий потери теплоты теплообменником в окружающую среду,  $\eta=0,98$ .

**Решение:** Количество теплоты, воспринятое нагреваемой водой в теплообменнике, определяем по формуле (2.64):

$$Q=W_1c_{p1}(t_1'-t_1'')\eta=15\cdot4,19(120-80)0,98=2463,7 \text{ кДж/с.}$$

Расход нагреваемой воды в теплообменнике находим из формулы (2.64):

$$W_2 = \frac{Q}{c_{p2}(t_2' - t_2'')} = \frac{2463,7}{4,19(60 - 10)} = 11,8 \text{ кг/с.}$$

Средний температурный напор в прямоточном теплообменнике определяем по формуле (2.66):

$$\Delta t_{cp} = \frac{(t_1' - t_2')(t_1'' - t_2'')}{2,3 \lg \frac{t_1' - t_2'}{t_1'' - t_2''}} = \frac{(120 - 10)(80 - 60)}{2,3 \lg \frac{120 - 10}{80 - 60}} = 53^\circ\text{C.}$$

Поверхность нагрева теплообменника находим по формуле (2.65):

$$F = \frac{Q}{k\Delta t_{cp}} = \frac{2463,7}{1,9 \cdot 53} = 24,5 \text{ м}^2.$$

**Задача 2.111.** Определить поверхность нагрева противоточного водоводяного теплообменника, если известны расход нагреваемой воды  $W_2=5 \text{ кг/с}$ , температура нагревающей воды на входе в теплообменник  $t_1'=97^\circ\text{C}$ , температура нагревающей воды на выходе из теплообменника  $t_1''=63^\circ\text{C}$ , температура нагреваемой воды на входе в теплообменник  $t_2'=17^\circ\text{C}$  температура нагреваемой воды на выходе из теплообменника  $t_2''=47^\circ\text{C}$  и коэффициент теплопередачи  $k=1,1 \text{ кВт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

*Ответ:*  $F=11,8 \text{ м}^2$ .

**Задача 2.112.** Определить расход нагревающего пара и поверхность нагрева противоточного пароводяного теплообменника, если известны расход нагреваемой воды  $W_2=5,6 \text{ кг/с}$ ,



давление нагревающего пара  $p_{\text{п}}=0,12$  МПа, температура нагревающего пара  $t_{\text{п}}=104^{\circ}\text{C}$ , энтальпия конденсата  $i'_{\text{к}}=436$  кДж/кг, температура нагреваемой воды на входе в теплообменник  $t'_2=12^{\circ}\text{C}$ , температура нагреваемой воды на выходе из теплообменника  $t''_2=42^{\circ}\text{C}$ , коэффициент теплопередачи  $k=1,05$  кВт/( $\text{м}^2 \cdot \text{K}$ ) и коэффициент, учитывающий потери теплоты теплообменником в окружающую среду,  $\eta=0,97$ .

*Ответ:*  $D_1=0,32$  кг/с;  $F=20,3$   $\text{м}^2$ .

**Задача 2.113.** Определить расход нагреваемой воды и средний температурный напор в прямоточном пароводяном теплообменнике, если известны расход нагревающего пара  $D_1=1$  кг/с, давление нагревающего пара  $p_{\text{п}}=0,118$  МПа, температура нагревающего пара  $t_{\text{п}}=104^{\circ}\text{C}$ , энтальпия конденсата  $i'_{\text{к}}=436$  кДж/кг, температура нагреваемой воды на входе в теплообменник  $t'_2=10^{\circ}\text{C}$ , температура нагреваемой воды на выходе из теплообменника  $t''_2=36^{\circ}\text{C}$  и коэффициент, учитывающий потери теплоты теплообменником в окружающую среду,  $\eta=0,98$ .

*Ответ:*  $W_2=20,2$  кг/с;  $\Delta t_{\text{ср}}=80^{\circ}\text{C}$ .

**Задача 2.114.** Определить поверхность нагрева прямоточного водоводяного теплообменника, если известны расход нагревающей воды  $W_1=2$  кг/с, расход нагреваемой воды  $W_2=2,28$  кг/с, температура нагревающей воды на входе в теплообменник  $t'_1=97^{\circ}\text{C}$ , температура нагреваемой воды на входе в теплообменник  $t'_2=17^{\circ}\text{C}$ , температура нагреваемой воды на выходе из теплообменника  $t''_2=47^{\circ}\text{C}$ , коэффициент теплопередачи  $k=0,95$  кВт/( $\text{м}^2 \cdot \text{K}$ ) и коэффициент, учитывающий потери теплоты теплообменником в окружающую среду,  $\eta=0,97$ .

*Ответ:*  $F=1,6$   $\text{м}^2$ .

## 2.9. Питательные устройства

Питательные устройства предназначены для подачи воды в котлы и перемещения ее по трубопроводам. Питательные

устройства состоят из насосов, питательных и конденсатных баков и трубопроводов.

**Питательные насосы.** Расчетная производительность питательного насоса ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) определяется по формуле

$$Q_{nn} = \beta_1 D_{max} / \rho \quad (2.72)$$

где  $D_{max}$  – максимальная паропроизводительность котельной,  $\text{кг}/\text{с}$ ;

$\rho$  – плотность воды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\beta_1$  – коэффициент запаса по паропроизводительности котельной.

Расчетный напор (Па) питательного насоса

$$H_{nn} = \beta_2 (p_k + H_{сет}), \quad (2.73)$$

где  $p_k$  – давление в барабане котла, равное давлению, на которое отрегулирован предохранительный клапан, Па;

$H_{сет}$  – сопротивление всасывающего и нагнетательного трубопроводов, Па;

$\beta_2$  – коэффициент запаса по напору.

Мощность (кВт) электродвигателя для привода питательного насоса

$$N_{э}^{nn} = (Q_{nn} H_{nn} / \eta_{nn}) 10^{-3}, \quad (2.74)$$

где  $\eta_{nn}$  – КПД питательного насоса.

**Задача 2.115.** Определить расчетную производительность и расчетный напор питательного насоса для котельной с максимальной паропроизводительностью  $D_{max} = 5,56 \text{ кг}/\text{с}$ , если известны давление в барабане котла  $p_k = 1,4 \text{ МПа}$ , плотность воды  $\rho = 958 \text{ кг}/\text{м}^3$ , сопротивление всасывающего и нагнетательного трубопроводов  $H_{сет} = 0,2 \text{ МПа}$ , коэффициент запаса по паропроизводительности котельной  $\beta_1 = 1,2$  и коэффициент запаса по напору  $\beta_2 = 1,1$ .

*Ответ:*  $Q_{nn} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $H_{nn} = 1,76 \text{ МПа}$ .

**Задача 2.116.** Определить мощность электродвигателя для привода питательного насоса для котельной с максимальной паропроизводительностью  $D_{max} = 8,34 \text{ кг}/\text{с}$ , если известны давление в барабане котла  $p_k = 2,4 \text{ МПа}$ , температура перекачиваемой

воды  $t_{\text{пв}}=100^{\circ}\text{C}$ , сопротивление всасывающего и нагнетательного трубопроводов  $H_{\text{сеп}}=0,2$  МПа, коэффициент запаса по паропроизводительности котельной  $\beta_1=1,2$ , коэффициент запаса по напору  $\beta_2=1,1$  и КПД питательного насоса  $\eta_{\text{пн}}=0,8$ .

**Решение:** Расчетную производительность питательного насоса определяем по формуле (2.72):

$$Q_{\text{пн}}=\beta_1 D_{\text{max}}/\rho=1,2\cdot 8,34/958=10,4\cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Расчетный напор питательного насоса находим по формуле (2.73):

$$H_{\text{пн}}=\beta_2(p_{\text{к}}+H_{\text{сеп}})=1,1(2,4+0,2)=2,86 \text{ МПа}.$$

Мощность электродвигателя для привода питательного насоса определяем по формуле (2.74):

$$N_{\text{э}}^{\text{пн}}=(Q_{\text{пн}}H_{\text{пн}}/\eta_{\text{пн}})10^{-3}=(10,4\cdot 10^{-3}\cdot 2,86\cdot 10^6/0,8)10^{-3}=37,2 \text{ кВт}.$$

**Задача 2.117.** Определить расчетную производительность и расчетный напор питательного насоса котельной, если известны давление в барабане котла  $p_{\text{к}}=3,6$  МПа, сопротивление всасывающего и нагнетательного трубопроводов  $H_{\text{сеп}}=0,2$  МПа, коэффициент запаса по напору  $\beta_2=1,1$ , мощность электродвигателя для привода питательного насоса  $N_{\text{э}}^{\text{пн}}=100$  кВт и КПД питательного насоса  $\eta_{\text{пн}}=0,75$ .

*Ответ:*  $Q_{\text{пн}}=1,8\cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $H_{\text{пн}}=4,2$  МПа.

**Задача 2.118.** Определить мощность электродвигателя для привода питательного насоса для котельной с максимальной паропроизводительностью  $D_{\text{max}}=1,8$  кг/с, если известны давление в барабане котла  $p_{\text{к}}=2,4$  МПа, плотность воды  $\rho=958$  кг/м<sup>3</sup>, сопротивление всасывающего и нагнетательного трубопроводов  $H_{\text{сеп}}=0,15$  МПа, коэффициент запаса по паропроизводительности котельной  $\beta_1=1,2$ , коэффициент запаса по напору  $\beta_2=1,1$  и КПД питательного насоса  $\eta_{\text{пн}}=0,74$ .

*Ответ:*  $N_{\text{э}}^{\text{пн}}=8,5$  кВт.

## 2.10. Определение величины продувки и расчет расширителя (сепаратора) непрерывной продувки

Непрерывная продувка паровых котлоагрегатов осуществляется для поддержания в допустимых пределах концентрации солей в котловой воде и получения пара надлежащей чистоты.

Величина непрерывной продувки выражается в процентах от паропроизводительности котельного агрегата, т. е.

$$P=(W_{np} / D)100, \quad (2.75)$$

где  $D$  – паропроизводительность котельного агрегата, кг/с;

$W_{np}$  – количество продувочной воды, кг/с.

Количество (кг/с) продувочной воды определяется из уравнения солевого баланса котлоагрегата по формуле

$$W_{np} = D \frac{S_{ng}}{S_{np} - S_{ng}}, \quad (2.76)$$

где  $S_{np}$ ,  $S_{ng}$  – соответственно солесодержание питательной воды и продувочной воды, кг/кг.

Количество пара (кг/с), выделяющегося из продувочной воды, определяется из уравнения теплового баланса расширителя по формуле

$$D_p = \frac{W_{np}(i_1' - i_2')}{x(i_n'' - i_2')} \quad (2.77)$$

где  $i_1'$  – энтальпия продувочной воды при давлении в котле, кДж/кг;

$i_2'$  – энтальпия воды при давлении в расширителе, кДж/кг;

$i_n''$  – энтальпия пара при давлении в расширителе, кДж/кг;

$x$  – степень сухости пара, выходящего из расширителя.

Расход воды (кг/с) на выходе из расширителя

$$W_p = W_{np} - D_p. \quad (2.78)$$

**Задача 2.119.** Определить величину непрерывной продувки и расход воды на выходе из расширителя непрерывной продувки котельного агрегата паропроизводительностью  $D=5,56$  кг/с, если давление в котле  $p_1=1,37$  МПа, давление в расширителе  $p_2=0,118$

МПа, степень сухости пара, выходящего из расширителя,  $x=0,98$ , солесодержание питательной воды  $S_{нг}=8,75 \cdot 10^{-5}$  кг/кг и солесодержание продувочной воды  $S_{np}=3 \cdot 10^{-3}$  кг/кг.

**Решение:** Количество продувочной воды определяем по формуле (2.76):

$$W_{np} = D \frac{S_{нг}}{S_{np} - S_{нг}} = 5,56 \frac{8,75 \cdot 10^{-5}}{3 \cdot 10^{-3} - 8,75 \cdot 10^{-5}} = 0,167 \text{ кг/с.}$$

Величину непрерывной продувки находим по формуле (2.75):

$$P = (W_{np}/D)100 = (0,167/5,56)100 = 3\%.$$

Пользуясь табл. 2 (см. Приложение), находим энтальпию продувочной воды  $i_1' = 825$  кДж/кг, энтальпию воды  $i_2' = 436$  кДж/кг и энтальпию пара  $i_n'' = 2680$  кДж/кг.

Количество пара, выделяющегося из продувочной воды, определяем по формуле (2.77):

$$D_p = \frac{W_{np}(i_1' - i_2')}{x(i_n'' - i_2')} = \frac{0,167(825 - 436)}{0,98(2680 - 436)} = 0,03 \text{ кг/с.}$$

Расход воды на выходе из расширителя непрерывной продувки находим по формуле (2.78):

$$W_p = W_{np} - D_p = 0,167 - 0,03 = 0,137 \text{ кг/с.}$$

**Задача 2.120.** Определить величину непрерывной продувки и количество пара, выделяющегося из продувочной воды в расширителе непрерывной продувки котельного агрегата паропроизводительностью  $D=4,16$  кг/с, если давление в котле  $p_1=1,37$  МПа, давление в расширителе  $p_2=0,12$  МПа, степень сухости пара, выходящего из расширителя,  $x=0,98$ , солесодержание питательной воды  $S_{нг}=9 \cdot 10^{-5}$  кг/кг и солесодержание продувочной воды  $S_{np}=3,1 \cdot 10^{-3}$  кг/кг.

*Ответ:*  $P=3\%$ ;  $D_p=0,02$  кг/с.

**Задача 2.121.** Определить количество продувочной воды и расход воды на выходе из расширителя непрерывной продувки котельного агрегата паропроизводительностью  $D=6,9$  кг/с, если величина непрерывной продувки  $P=4\%$ ; энтальпия продувочной

воды  $i_1' = 836$  кДж/кг, давление в расширителе  $p_2 = 0,12$  МПа и степень сухости пара, выходящего из расширителя,  $x = 0,98$ .

*Ответ:*  $W_{np} = 0,276$  кг/с;  $W_p = 0,226$  кг/с.

### Глава 3. ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Повышение экономичности котельных установок достигается путем применения комплекса пуско-наладочных и режимно-наладочных работ, повышающих экономическую эффективность технологических показателей котельного оборудования, и мероприятиями малой и капитальной модернизации. К мероприятиям комплекса режимно-наладочных работ и к мероприятиям малой модернизации, проводимых с целью энергосбережения, относятся:

1. Систематические наладочные режимные испытания.
2. Повышение экономичности работы топочных устройств путем ликвидации потерь теплоты от химической неполноты горения.
3. Снижение потерь теплоты от механической неполноты горения.
4. Уменьшение коэффициента избытка воздуха в топке.
5. Систематический надзор за газовым и воздушным трактами
6. Улучшение работы конвективных поверхностей нагрева.
7. Снижение сопротивлений газоздушного тракта.
8. Экономичное распределение нагрузки между работающими котлоагрегатами.
9. Изоляция горючих поверхностей.
10. Внедрение экономичных способов регулирования производительности тягодутьевых машин.

Малая модернизация оборудования не требует больших затрат и, как правило, может быть осуществлена собственными силами предприятия в короткий срок.

Практика показала, что за счет малой модернизации и повышения культуры эксплуатации в промышленных и отопительных котельных можно получить до 10–15 % экономии топлива.

К мероприятиям капитальной модернизации относятся:

1. Полная замена котельных агрегатов.

2. Замена топочных устройств.
3. Установка хвостовых поверхностей нагрева.
4. Экранирование топочной камеры.
5. Реконструкция или замена оборудования водоподготовки.
6. Установка теплофикационных экономайзеров.
7. Автоматизация процесса горения.
8. Автоматизация регулирования температуры перегрева пара.
9. Перевод паровых котлов на водогрейный режим.

В табл. 3.1. приведены данные, характеризующие удельный расход электроэнергии на единицу отпущенного тепла по различным маркам котлов.

Режимная карта котлоагрегата составляется в результате режимно-наладочных испытаний. В ней указываются основные параметры, поддержание которых обеспечивает наиболее экономичный режим работы котлоагрегата. Поддержание заданного режима осуществляет оперативный персонал или система автоматического регулирования котлоагрегата.

Режимная карта должна быть составлена для всех промежуточных нагрузок котла от минимальной до максимальной.

Одной из основных задач эксплуатации котельных установок является экономия сжигаемого топлива. Для решения этой задачи необходимо систематически анализировать режим работы котельной установки и на базе показаний контрольно-измерительных приборов составлять эксплуатационный тепловой баланс котлоагрегатов.



Таблица 3.1

Удельные расходы электроэнергии на единицу отпущенного тепла по маркам котлов, кВт·ч/ГДж

Марка котла	Расход электроэнергии, кВт·ч, на отпущенный 1 ГДж (1 Гкал) тепловой энергии	
	Вид топлива	
	газ, мазут	уголь
БКЗ–75–35–39ФБ	–	4,06 – 4,77 (17,0 – 20,0)
БКЗ–75–39ГМА	2,15–2,62 (9,0–11,0)	–
К–50–40/14	–	4,56 – 5,0 (19,0 – 21,0)
ГМ–50–14	2,38–2,86 (10,0–12,0)	–
КВ–ГМ–100	1,43–1,91 (6,0–8,0)	–
КВ–ГМ–50	1,31–1,91 (5,5–8,0)	–
ЭЧМ–60	–	4,56 – 5,0 (19,0 – 21,0)

Поэтому оперативный персонал должен вести суточную ведомость оборудования котельного цеха, снимать и обрабатывать показания регистрирующих приборов. Обычно запись показаний измерительных приборов производят через каждые 30 мин, а счетчиков, указывающих расход пара, воды газообразного или жидкого топлива, – через каждый час. Инженерно-технический персонал, отвечающий за эксплуатацию оборудования (начальник цеха, старший мастер или мастер), ежедневно просматривает суточную ведомость работы и вахтенный журнал. Это позволяет выявить отклонение отдельных параметров от оптимальных значений, проанализировать среднесменные показатели, характеризующие экономичность работы и качество обслуживания оборудования персоналом. Основные показатели работы оборудования обрабатываются за декаду, а затем за месяц с составлением и анализом отдельных статей теплового баланса котлоагрегата.

Основными показателями, характеризующими экономичность работы котла на газообразном и жидком топливе, являются:

1. Давление и температура перегретого пара.
2. Расход пара и питательной воды.
3. Содержание трехатомных газов и кислорода в продуктах сгорания.
4. Температура питательной воды до экономайзера и после него (для некипящих экономайзеров).
5. Температура воздуха, забираемого вентилятором, и температура после воздухоподогревателя.
6. Температура уходящих газов.
7. Расход электроэнергии на привод агрегатов для собственных нужд.

При работе на твердом топливе дополнительно к указанным показателям добавляется определение содержания горючих в шлаке, а также низшая теплота сгорания рабочей массы топлива.

Улучшение работы конвективных поверхностей нагрева достигается соответствующим расположением перегородок, направляющих продукты сгорания, и их целостью, а также систематической очисткой наружной и внутренней поверхности труб.

При эксплуатации котельных с паровыми и водогрейными котлами при сжигании любого топлива недопустимо отклонение параметров пара и воды от номинальных значений, так как это приводит к перерасходу топлива.

Однако на практике поддержанию номинальных параметров в промышленных и отопительных котельных не уделяется должного внимания.

Работа паровых котлов с пониженным давлением приводит к уменьшению КПД вследствие двух причин:

1. Из-за необходимости снижения температуры воды после чугунного водяного экономайзера во избежание ее закипания.
2. Объем пара при снижении давления заметно возрастает, что приводит к увеличению скорости пара в барабане котла и в

сепарационных устройствах, т.е. к повышению влажности пара и к росту его солесодержания.

Существенное влияние на общий расход топлива котельным цехом оказывает распределение общей нагрузки между установленными котлами и выбор числа работающих колов для покрытия заданного графика нагрузок.

Наивыгоднейшее распределение общей нагрузки между котельными агрегатами может производиться методами:

1. Методом поддержания наибольшего КПД.
2. Методом загрузки котлоагрегатов пропорционально их номинальной производительности и равенства относительных приростов расхода топлива при измерении производительности.

Метод поддержания наибольшего КПД котлоагрегатов заключается в том, что сначала загружаются наиболее экономичные котлы до их номинальной производительности, затем последовательно менее экономичные.

Метод загрузки котлоагрегатов пропорционально их номинальной производительности заключается в том, что общая нагрузка распределяется в отношении номинальной производительности котлов и равенства относительных приростов расхода топлива при изменении производительности.

**Задача 3.1.** Определить экономию топлива в котле БКЗ–210–140ФЖШ за счет выполнения газоплотного стального кожуха снаружи обмуровки котла и газохода. Топливо-природный газ Оренбургского месторождения.

**Решение**

1. Определяем располагаемую теплоту топлива. Принимаем расчетную температуру топлива  $t_{\text{тл}} = 0$  °С. В связи с отсутствием предварительной подготовки  $Q_{\text{в.вн}} = 0$ . Теплота сгорания газа  $Q_{\text{р}} = 33369,2$  кДж/нм<sup>3</sup>.

Располагаемая теплота топлива  $Q_{\text{р}}^{\text{п}} = Q_{\text{н}}^{\text{п}}$ .

2. Определяем потерю тепла с уходящими газами (для данного природного газа при  $t_{\text{yx}} = 125$  °С).

Теоретические энтальпии воздуха и продуктов сгорания равны [4]:

$$H^0_{\text{в}} = 1583 \text{ кДж/м}^3 \text{ и } H^0_{\text{г}} = 1854 \text{ кДж/м}^3 .$$

Теоретическая энтальпия воздуха при температуре 30 °С

$$H^0_{\text{н.в}} = 395,7 \text{ кДж/м}^3 .$$

Избыток воздуха в уходящих газах [4]

$$\alpha_{\text{yx}} = \alpha_{\text{т}} + \Delta\alpha_{\text{эк}} + \Delta\alpha_{\text{вп}} = 1,05 + 0,04 + 0,06 = 1,15,$$

где  $\alpha_{\text{т}}$ ,  $\Delta\alpha_{\text{эк}}$ ,  $\Delta\alpha_{\text{вп}}$  – соответственно коэффициенты избытка воздуха в топке, присосы воздуха в экономайзере и воздухоподогревателе.

При избытке воздуха  $\alpha_{\text{yx}} = 1,15$  энтальпия уходящих газов

$$H_{\text{yx}} = H^0_{\text{г}} + (\alpha_{\text{yx}} - 1)H^0_{\text{н.в}} = 1854 + (1,15 - 1)1583 = 2091,5 \text{ кДж/м}^3 .$$

Для газообразного топлива потери тепла с механическим недожогом

$$q_4 = 0.$$

Потери тепла с уходящими газами [4]

$$q_2 = (H_{\text{yx}} - \alpha_{\text{yx}} H^0_{\text{н.в}})(100 - q_4) / Q^{\text{p}}_{\text{р}} = \\ = (2091,5 - 1,15 \cdot 395,7)(100 - 0) / 33369,2 = 4,9 \text{ \%}.$$

3. Принимаем для газообразного топлива потери тепла с химическим недожогом  $q_3 = 0,5 \text{ \%}$  [4].

Определяем коэффициент полезного действия (брутто):

$$\eta_{\text{к}} = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6 = \\ = 100 - 4,9 - 0,5 - 0 - 0,5 - 0 = 94,1 \text{ \%},$$

где  $q_3 = 0,5 \text{ \%}$ ;  $q_4 = 0 \text{ \%}$ ;  $q_5 = 0,5 \text{ \%}$ ;

$q_6 = 0 \text{ \%}$  – соответственно потери тепла с химическим и механическим недожогом, на наружное охлаждение и с теплотой шлака (зола) [4].

4. Определяем полный расход топлива для котла с уплотненным газоходом [4]:

$$B_{\text{упл}} = Q_{\text{п.к}} \cdot 100 / (Q^{\text{p}}_{\text{р}} \cdot \eta_{\text{к}}) = \\ = 149862,3 \cdot 100 / (33369,2 \cdot 94,1) = 4,77 \text{ м}^3 / \text{с},$$

где  $Q_{\text{п.к}}$  – удельное количество теплоты, воспринятое рабочей средой в котле (при параметрах перегретого пара  $t_{\text{пе}} = 570 \text{ °С}$ ;

$P_{\text{пе}} = 140 \text{ атм}$ ), вычисляемое как

$$Q_{\text{п.к}} = D_{\text{п.к}}(i_{\text{пе}} - i_{\text{п.в}}) + D_{\text{пр}}(i' - i_{\text{п.в}}) = (58,3(841,3 - 231,7) +$$

$$+ 0,58(623,6 - 231,7)4,19 = 149862,3 \text{ кДж/с.}$$

где  $D_{п.к} = 210000 / 3600 = 58,3 \text{ кг/с}$  – паропроизводительность котла БКЗ–210–140ФЖШ;

$i_{пе}$  – энтальпия перегретого пара, кДж/кг;

$i_{п.в}$  – энтальпия питательной воды, кДж/кг;

$D_{пр}$  – расход воды на продувку (1 % от  $D_{п.к}$ ), кг/с;

$i'$  – энтальпия продувочной (кипящей) воды, кДж/кг;

4,19 – переводной коэффициент ккал/кг в кДж/кг.

5. Определяем условный расход топлива при уплотненном газоходе котла БКЗ–210–140ФЖШ при теплоте сгорания условного топлива  $Q_{у.т} = 7000 \text{ ккал/кг} = 29308 \text{ кДж/кг}$ :

$$B_{у.т. \text{ упл}} = B_{\text{упл}} Q_{н}^p / Q_{у.т} = 4,77 \cdot 33369,2 / 29308 = 5,43 \text{ кг/с.}$$

6. Определяем энтальпию уходящих газов при их температуре 120 °С для котла БКЗ–210–140ФЖШ с обычной обмуровкой (без обшивки стальным листом)

Коэффициент избытка воздуха в газоходе за воздухоподогревателем  $\alpha_{ух} = 1,5$  (берется по режимным картам котлов).

Энтальпия уходящих газов при

$$\begin{aligned} \alpha_{ух} = 1,5 H_{ух} &= H_{г}^0 + (\alpha_{ух} - 1) = \\ &= 1854 + (1,5 - 1)1583 = 2645,5 \text{ кДж/м}^3. \end{aligned}$$

Потери тепла с уходящими газами [4] (при  $q_4 = 0$ )

$$\begin{aligned} q_2 &= (H_{ух} - \alpha_{ух} H_{н.в}^0)(100 - q_4) / Q_p^p = \\ &= (2645,5 - 1,5 \cdot 395,7)(100 - 0) / 33369,2 = 6,15 \%. \end{aligned}$$

7. Коэффициент полезного действия для котла БКЗ–210–140ФЖШ с обычной неуплотненной обмуровкой (брутто)

$$\begin{aligned} \eta_{к.н} &= 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6 = \\ &= 100 - 6,15 - 0,5 - 0 - 0,5 - 0 = 92,85 \%. \end{aligned}$$

8. Полный расход газообразного топлива в котле БКЗ–210–140ФЖШ с обычной неуплотненной обмуровкой

$$\begin{aligned} B_{н} &= Q_{п.к} \cdot 100 / (Q_p^p \cdot \eta_{к.н}) = \\ &= 149862,3 \cdot 100 / (33369,2 \cdot 92,85) = 4,84 \text{ м}^3 / \text{с.} \end{aligned}$$

Расход условного топлива

$$B_{у.т.н} = B_{н} Q_{н}^p / Q_{у.т} = 4,84 \cdot 33369,2 / 29308 = 5,51 \text{ кг/с.}$$

9. Превышение расхода условного топлива в котле БКЗ–210–140ФЖШ с неуплотненным газоходом

$$\Delta B_{y.t.н} = B_{y.t.упл} - B_{y.t.н} = 5,51 - 5,43 = 0,08 \text{ кг/с.}$$

В процентном выражении

$$\begin{aligned} \Delta B_{н} &= (B_{y.t.н} - B_{y.t.упл})100 / B_{y.t.упл} = \\ &= (5,51 - 5,43)100 / 5,43 = 1,47 \%. \end{aligned}$$

**Задача 3.2.** Рассчитать экономический эффект от снижения потерь тепла с продувочной водой в газоплотном котле БКЗ–210–140ФЖШ. Существующий расход воды на продувку составляет 1 % от производительности котла. Нормативный расход воды на продувку котлов БКЗ–210–140ФЖШ составляет 0,5 % от производительности котла. Исходные данные для расчета взять из [3].

**Решение.** 1. Определяем полезное удельное тепловосприятие котла с существующей продувкой в 1 % от производительности

$$\begin{aligned} Q_{пол1}^{уд} &= Q_{п.к} / B_1 = D_{п.к}(i_{пе} - i_{п.в}) + D_{пр1}(i' - i_{п.в}) / B_1 = \\ &= (58,3(841,3 - 231,7) + 0,58(623,6 - 231,7))4,19 / 5,43 = \\ &= 27599 \text{ кДж/кг,} \end{aligned}$$

где  $Q_{п.к} = 58,3$  кг/с – производительность одного котла БКЗ–210–140ФЖШ;

$i_{пе} = 841,3$  ккал/кг – энтальпия перегретого пара;

4,19 – переводной коэффициент ккал в кДж;

$i_{п.в} = 231,7$  ккал/кг – энтальпия питательной воды;

$D_{пр1} = 0,58$  кг/с – расход воды на продувку;

$i' = 623,6$  ккал/кг – энтальпия кипящей воды;

$B_1 = 5,43$  кг/с – расход условного топлива для котла БКЗ–210–140ФЖШ в газоплотном исполнении.

2. Определяем тепловосприятие котла с продувкой в 0,5 % от паропроизводительности

$$\begin{aligned} Q_{пол2} &= D_{п.к}(i_{пе} - i_{п.в}) + D_{пр2}(i' - i_{п.в}) = (58,3(841,3 - \\ &- 231,7) + 0,29(623,6 - 231,7) 4,19 = 149386 \text{ кДж/с,} \end{aligned}$$

где  $D_{пр2} = 0,29$  кг/с – расход воды на продувку по нормативу.

Расход топлива при продувке в 0,5 % от паропроизводительности

$$B_2 = Q_{пол2} / Q_{пол1}^{уд} = 149386 / 27599 = 5,41 \text{ кг/с.}$$

Экономия расхода топлива в котле при снижении расхода воды на продувку до 0,5 % от паропроизводительности составляет

$$\Delta B_{\text{у.т. прод}} = B_1 - B_2 = 5,43 - 5,41 = 0,02 \text{ кг/с или } 0,37 \text{ \%}.$$

**Задача 3.3.** Рассчитать экономию топлива за счет снижения температуры уходящих газов в котле БКЗ–210–140ФЖШ со 170 °С до 125 °С. Расчет произвести при  $\alpha_{\text{ух}} = 1,15$ .

Энтальпия теоретически необходимого объема продуктов сгорания при 200 °С равна 3010 кДж/м<sup>3</sup>. Энтальпия теоретически необходимого объема воздуха при 200 °С равна 2566 кДж/м<sup>3</sup>.

Энтальпия холодного воздуха равна 395,7 кДж/м<sup>3</sup>. Располагаемая теплота топлива равна 33369,2 кДж/м<sup>3</sup>.

*Ответ:* Экономия топлива составляет 0,144 кг/с или 2,94 %.

**Задача 3.4.** Рассчитать экономию топлива за счет повышения температуры питательной воды в котле БКЗ–210–140ФЖШ с 200 °С до 225 °С. Расчет произвести при  $\alpha_{\text{ух}} = 1,15$ . Энтальпия питательной воды при 200 °С и давлении в барабане  $p_6 = 110$  атм составляет 204,5 ккал/кг, а при 225 °С – 233 ккал/кг. Энтальпия перегретого пара при 510 °С и давлении в магистрали  $p_m = 105$  атм составляет 811,2 ккал/кг

*Ответ:* Экономия топлива составляет 0,26 кг/с или 4,8 %

## Глава 4. РАСЧЕТЫ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА

В топках паровых котлов при горении топлива образуются оксиды азота двух типов – оксид NO и диоксид NO<sub>2</sub>, причем на выходе из дымовых труб оксид NO составляет до 95 % суммы оксидов NO<sub>x</sub> = NO + NO<sub>2</sub>. Доокисление NO до NO<sub>2</sub> происходит в атмосфере в процессе распространения дымового факела свободным кислородом (озоном) воздуха. Поэтому массовый выброс оксидов азота из котлов рассчитывается по NO<sub>2</sub>. В газовых выбросах ТЭС их концентрация составляет 0,2–1,2 г/м<sup>3</sup>.

Оксиды азота образуются при сгорании топлива в ядре факела тремя возможными путями:

– *топливные* – образуются при температуре газовой среды 800–2100 К за счет азота, входящего в топливо (N<sub>p</sub>);

– *термические* – образуются при высоких температурах факела (более 1600 К) за счет окисления азота воздуха;

– *быстрые* – образуются при контакте промежуточных углеводородных соединений топлива (при сжигании газа и мазута) с азотом поступающего в горелки воздуха в начальной зоне горения факела при температурах выше 1000 К.

### 4.1. Образование термических оксидов азота.

Определяющими характеристиками при образовании термических оксидов являются максимальная температура факела  $T_M$  и температурный интервал реакции  $\Delta T_p$ . Расчетное значение  $T_M$  зависит от условной адиабатной температуры в зоне горения  $T'_a$ :

$$T'_a = \frac{Q_T'}{\Gamma_G^O c_G + 1,016(\alpha_{\text{зоп}} - 1)V_B^O c_B} + 273, \quad (4.1)$$

где  $Q_T' = Q_H^p \cdot 103 + Q_{Г.в} + Q$  – тепловыделение в зоне горения, кДж/кг;

$Q_H^p$  – теплота сгорания, МДж/кг;

$c_G$  и  $c_B$  – теплоемкости газа и воздуха, полученные при огибаемой адиабатной температуре, кДж/(м<sup>3</sup>·К);



$\alpha_{гор}$  – избыток воздуха в зоне горения; принимается при наличии присосов воздуха в топку  $\Delta\alpha_T$  следующим:

$$\alpha_{гор} = \alpha_T - 0,5\Delta\alpha_T, \text{ для газоплотных котлов } \alpha_{гор} = \alpha_T.$$

Эффект рециркуляции газов на температурный уровень учитывается при расчете максимальной температуры факела  $T_m$ .

Средняя теплоемкость продуктов сгорания и воздуха определяется по формулам:

– при сжигании твердого топлива

$$c_T = (1,59 + 0,004W^п) + 0,14k_t; \quad (4.2a)$$

– при сжигании природного газа

$$c_T = 1,57 + 0,134k_t; \quad (4.2б)$$

– при сжигании мазута

$$c_T = 1,58 + 0,122 k_t, \quad (4.2в)$$

где  $W^п = W^p / Q_{н\ p}$  – приведенная влажность топлива, % кг/МДж;

$k_t = (t_a - 1200)/1000$  – температурный коэффициент изменения теплоемкости;

$t_a$  – ожидаемая адиабатная температура, °С.

Теплоемкость воздуха при высоких температурах

$$c_B = 1,46 + 0,092k_t, \quad (4.3)$$

Ожидаемую адиабатную температуру для расчета теплоемкостей находят по формулам:

– для твердого топлива

$$t_a = \frac{1800}{\alpha_{гор}} (1 + 10^{-5} Q'_m), \quad (4.4a)$$

– для мазута и природного газа

$$t_a = \frac{1950}{\alpha_{гор}} (1 + 0,36^{-5} Q'_m), \quad (4.4б)$$

Допустимое расхождение между предварительно принятой  $t_a$  и полученным по (4.1) значением  $(T'_a - 273)$  не должно превышать 50 °С, иначе необходимо принять новое  $t_a = T'_a - 273$  и уточнить значения  $c_T$  и  $c_B$ . Максимальную температуру зоны горения находят по формуле с учетом отвода теплоты к экранам, степени выгорания топлива и влияния рециркуляции газов:

$$T_M = \beta_{\text{сг}} T'_a (1 - \psi_{3,\Gamma})^{0,25} (1 - r^{1+nr}) m_\Gamma, \quad (4.5)$$

где  $\beta_{\text{сг}}$  – доля сгоревшего топлива на участке от выхода из горелки до завершения интенсивного высокотемпературного горения;

значения  $\beta_{\text{сг}}$  принимать: для твердых топлив 0,95–0,97 (большие значения для реакционных топлив), для природного газа и мазута 0,97–0,99;

$\psi_{3,\Gamma}$  – коэффициент тепловой эффективности экранов в зоне ядра факела, при необходимости усреднения тепловосприятости экранов принимать верхнюю границу зоны горения на 1,5 м выше верхнего яруса горелок;

$r$  – доля рециркуляции газов в зону горения;

$n$  – коэффициент, учитывающий способ ввода рециркулирующих газов в топку:  $n = 6,5$  – при вводе через сопла под горелкам,  $n = 5,0$  – при вводе через кольцевой канал вокруг горелки  $n = 3,0$  – при смешении газов с горячим воздухом до горелки либо вводе между центральным и периферийным каналами горелки;

$m_\Gamma$  – коэффициент, учитывающий тип горелки:  $m_\Gamma = 1$  – для вихревых настенных горелок;

$m_\Gamma = 0,95(25 / w_B) 0,2$  – для прямоточных настенных горелок, где  $w_B$  – скорость воздуха на выходе из горелки, м/с;

$m_\Gamma = 0,985$  – для подовых горелок с прямоточно-вихревой подачей воздуха.

Теоретическое время достижения равновесной концентрации оксида азота NO при температуре реакции  $T_M$

$$\tau_0 = 0,024 \exp(54290 / T_M - 23), \quad (4.6)$$

Расчетное время реакции образования оксидов азота в топке

$$\tau_P = \frac{\Delta T_P}{T'_a - T''} \left( \frac{q_f \Pi}{300} \right)^{0,5} \tau_{\text{преб}}, \quad (4.7)$$

где  $\Delta T_P$  – температурный интервал активной реакции образования оксидов азота.  $K$ , зависит от значения  $T_M$  и определяется из выражения;

$$\Delta T_p = \frac{T_M^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + T_M \cdot 10^{-5}}, \quad (4.8)$$

$q_f = \frac{BQ_H^P}{a_T b_T}$  – среднее тепловое напряжение сечения топочной камеры, МВт / м<sup>2</sup> ;

$\Pi = 2a_T + 2b_T$  – расчетный периметр стен призматической топочной камеры, м (при наличии двусветного экрана добавляется его удвоенная ширина);

$T_T''$  – абсолютная температура газов на выходе из топки. К, берется из теплового расчета котла;

$\tau_{\text{преб}}$  – время пребывания газов в топочной камере, с:

$$\Delta T_p = \frac{T_M^2 \cdot 10^{-5}}{q_v T_T v_T^{\Pi} \alpha_T (1+r)}, \quad (4.9)$$

где  $q_v = \frac{BQ_H^P}{V_T}$  – тепловое напряжение топочного объема, МВт/м<sup>3</sup> ;

$T_\tau = 0,84[(T_M)^4 + (T_\tau'')^4]^{0,25}$  – средняя расчетная температура газов в топочном объеме, К;

$v_T^{\Pi}$  – удельный приведенный объем газов при  $\alpha = 1$ , м<sup>3</sup> /МДж, в расчетах следует принимать для антрацита и полуантрацит  $v_T^{\Pi} = 0,273$  м<sup>3</sup>/МДж, для остальных твердых топлив  $v_T^{\Pi} = 0,278 + 0,001 W^{11}$ , для мазута 0,281 м<sup>3</sup>/МДж, для природного газа 0,3 м<sup>3</sup>/МДж;

$\xi$  – коэффициент заполнения сечения топки восходящим потоком газов, при встречных вихревых грелках  $\xi = 0,8$ , то же для однофронтального расположения – 0,75, для тангенциального расположения прямооточных горелок – 0,70, для подовых горелок – 0,90.

Концентрация оксидов азота, образующихся за счет термической реакции в зоне ядра факела, в пересчете на диоксид азота NO<sup>тр</sup><sub>2</sub>, г/м<sup>3</sup>, определяется по формуле

$$NO_2^{mp} = 7,03 \cdot 10^3 C_{O_2}^{0,5} \exp(-10860 / T_M) \frac{\tau_P}{\tau_O}, \quad (4.10)$$

где  $C_{O_2}$  – концентрация остаточного (избыточного) кислорода в зоне реакции, кг/м<sup>3</sup>, определяется по формуле

$$C_{O_2} = \frac{0,21V_B^O[(\alpha_{зоп} - 1) + r(\alpha_{рц} - \alpha_{зоп})]\rho_{O_2}}{[V_\Gamma^O + (\alpha_{зоп} - 1)V_B^O](1+r)}, \quad (4.11)$$

где  $\alpha_{рц}$  – избыток воздуха в газах рециркуляции;  
 $\rho_{O_2} = 1,428$  кг/м<sup>3</sup> – плотность кислорода при атмосферном давлении.

В случаях, когда значение  $\alpha_{гор} - 1$  – окажется меньше 0,02, условно принимать его постоянным и равным 0,02.

## 4.2. Концентрации топливных и быстрых оксидов азота.

Суммарная концентрация оксидов в газах Образование этого вида оксидов происходит в диапазоне температур 800–2100 К и наибольшую интенсивность - имеет в области 1850 К. Выход топливных оксидов  $NO^{ТЛ}_2$  в этой зоне сильно зависит от избытка воздуха (в степени 2), слабо от температуры (степень 0,33) и содержания азота в топливе  $N_p$ .

Расчетные формулы для двух температурных зон имеют следующий вид:

– при значениях температуры  $2100 > T_M \geq 1850$  К

$$NO_2^{ТЛ} = (0,40 - 0,1N^P)N^P \left( \frac{\alpha_{зоп} + r}{1+r} \right)^2 \left( \frac{2100 - T_M}{125} \right)^{0,33}, \quad (4.12)$$

– при значениях температуры  $1850 > T_M \geq 800$  К .

$$NO_2^{ТЛ} = 1,25(0,40 - 0,1N^P)N^P \left( \frac{\alpha_{зоп} + r}{1+r} \right)^2 \left( \frac{T_M - 800}{1000} \right)^{0,33}, \quad (4.13)$$

Формулы (4.12) и (4.13) учитывают одновременно и образование быстрых оксидов азота. В итоге максимальная

суммарная концентрация оксидов азота при номинальной нагрузке котла составляет

$$NO_2^0 = NO_2^{TP} + NO_2^{TL}, \quad (4.14)$$

При любой сниженной нагрузке парового котла суммарный выход оксидов азота определяется по формуле

$$NO_2 = NO_2^{TP} (D/D_{ном}) + NO_2^{TL} (D/D_{ном})^{0,5}, \quad (4.15)$$

Здесь  $D/D_{ном}$  – отношение расчетной нагрузки котла к номинальной.

При переходе на двухступенчатое (нестехиометрическое) сжигание топлива расчет максимальной температуры факела  $T_m$  производится по формуле (4.5) для первой (нижней) зоны горения топлива. Избыток воздуха в горелках первой зоны определяется заданным распределением поступления воздуха по зонам и аналогичным распределением топлива и определяется по формуле,

$$\alpha_{гор}^I = \frac{\alpha_T - 0,5\Delta\alpha_T - \beta_{II}}{\beta_I}, \quad (4.16)$$

где  $\beta_{II}$  – доля воздуха, поступающего во вторую ступень горения:

$V_I = V_I / V$  – доля топлива, поступающего в первую зону.

При наличии сбросных горелок с учетом КПД циклона  $V_I = 0,88 \div 0,94$ . Расчетный избыток воздуха в горелках второй зоны горения 0,5.

$$\alpha_{гор}^{II} = \beta_{II} + \Delta\alpha_T \quad (4.17)$$

Доля топлива, сгоревшего в первой (нижней) зоне горения определяется относительным количеством воздуха в первой зоне с учетом неизбежной неполноты сгорания:

$$\beta_{ср}^I = 0,95 \alpha_{гор}^I \quad (4.18)$$

Расчет температуры  $T_m$  осуществляют по (4.5) для значения  $\beta_{ср}^I$ . Адиабатная температура горения определяется по (4.1) для полного избытка воздуха на выходе из верхней области горения, т.е. по  $\alpha_{гор} = \alpha_T - 0,5\Delta\alpha_T$  независимо от ступенчатой организации сжигания. В остальном расчет совпадает с изложенным ранее.

### 4.3. Особенности расчета оксидов азота при сжигании природного газа

Сжигание природного газа характеризуется более быстрым протеканием реакций горения.

В результате сокращается зона активного горения и растет максимальная температура.

Поэтому в большинстве случаев (при других равных условиях) концентрация оксидов азота получается несколько выше, чем при сжигании мазута (приблизительно  $NO_{2}^{газ} = 1,3NO_{2}^{маз}$ ).

Ввиду отсутствия в природном газе топливного азота, входящего в радикалы, но при наличии углеводородных соединений при сгорании газа могут образовываться только быстрые оксиды азота  $NO^b_2$ .

При расчете термических оксидов азота следует исходить из методики, изложенной в п. 4.1.

Расчет максимальной температуры производится по (4.5), но для учета повышенной скорости реакций горения вводится поправка и расчетная температура принимается

$$T'_M = 1,01 T_M, \quad (4.19)$$

где  $T_M$  – максимальная температура по (4.5), К.

Расчет быстрых оксидов азота осуществляется по формуле

$$NO^b_2 = 0,1 \left( \frac{\alpha_{зоп} + r}{1 + r} \right)^2 \left( \frac{T'_M - 800}{1000} \right)^{0,33} \quad (4.20)$$

Ввиду высокой реакционной способности газового топлива рециркуляция газов  $r$  не учитывается в формуле (4.5) при вводе газов через щлицы. Суммарная концентрация оксидов азота составит

$$NO^0_2 = NO^{тр}_2 + NO^b_2 \quad (4.21)$$

**Задача 4.1.** Определить ожидаемый выход оксидов азота из котла Пп–1000–25–545 К (ТПП–312А) при сжигании донецкого ГСШ с жидким шлакоудалением и природного газа. Температура плавления шлака  $t_{шл}^3 = 1230$  °С. При расчете принять следующие исходные данные (табл. 4.1).

**Решение.** По исходным данным из табл. 1 и 2 [4. с. 152–169] находим: для твердого топлива  $V_{\Gamma}^0 = 6,28 \text{ м}^3 / \text{кг}$ ,  $V^0 = 5,83 \text{ м}^3 / \text{кг}$ ; для природного газа  $V_{\Gamma}^0 = 11,16 \text{ м}^3 / \text{м}^3$ ,  $V^0 = 9,96 \text{ м}^3 / \text{м}^3$ ;

1. Определяем энтальпии горячего воздуха. Для твердого топлива  $Q_{\Gamma.в} = 0,95 \cdot 3030,7 = 2879 \text{ кДж/кг}$ , при этом принят присос холодного воздуха в пылесистеме  $\Delta\alpha_{пл} = 0,1$ , тогда избыток горячего воздуха составит  $\alpha_{\Gamma.в} = 1,15 - 0,1 - 0,1 = 0,95$ .

Для природного газа  $Q_{\Gamma.в} = 1,0 \cdot 4992 = 4992 \text{ кДж/м}^3$ ; физическую теплоту топлива не учитываем из-за ее незначительности.

Таблица 4.1

Исходные данные по параметрам продуктов сгорания для расчетов задачи 4.1

Параметр	Донецкий ГСШ	Природный газ
Теплота сгорания	$Q_{н^p} = 20,47 \text{ МДж/кг}$	$Q_{н^p} = 37,3 \text{ МДж/м}^3$
Температура горячего воздуха	384 °С	370 °С
Доля рециркуляции газов	–	0,1
Избыток воздуха на выходе из топki	1,15	1,10
То же в газах рециркуляции	–	1,17
Температура газов на выходе из топki	1190 °С	1210 °С
Тепловое напряжение сечения	–	$qf = 4,86 \text{ МВт/м}^2$
Периметр топочной камеры	–	$\Pi = 51,9 \text{ м}$
Присос холодного воздуха в топку	–	$\Delta\alpha_{т} = 0,1$

2. Рассчитываем содержание оксидов азота при сжигании донецкого ГСШ:

тепловыделение:

$Q'_T = Q_{H^P} + Q_{Г.В} = 20,47 \cdot 103 + 2879 = 23349$  кДж/кг;  
 ожидаемая адиабатная температура горения топлива по  
 (4.4а)

$$t_a = \frac{1800}{\alpha_{зоп}} (1 + Q'_T) = \frac{1800}{1,1} (1 + 0,2335) = 2018^\circ C$$

теплоемкости газов и воздуха при  $k_t = (t_a - 1200) / 1000 = (2018 - 1200) / 1000 = 0,818$ ;

влажности топлива  $W^P = W^P / Q_{H^P} = 8\%$  и приведенной влажности топлива  $W_{II} = 8 / 20,47 = 0,39$ :

$$c_{Г} = (1,59 + 0,004 \cdot W_{II}) + 0,14 \cdot k_t = (1,59 + 0,004 \cdot 0,39) + 0,14 \cdot 0,818 = 1,706 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К});$$

$$c_{В} = 1,46 + 0,092 \cdot k_t = 1,46 + 0,092 \cdot 0,818 = 1,535 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К});$$

расчетная адиабатная температура

$$T'_a = \frac{Q'_T}{V_{Г}^0 \cdot c_{Г} + 1,016(\alpha_{зоп} - 1) \cdot V^0 \cdot c_{В}} + 273 =$$

$$= \frac{23349}{6,28 \cdot 1,706 + 1,016(1,1 - 1) \cdot 5,83 \cdot 1,535} + 273 = 2010 + 273 = 2283 \text{ К}.$$

Максимальная температура в зоне горения принимается при  $\beta_{сг} = 0,965$ , поскольку топка с жидким шлакоудалением, экраны топки в зоне горения на высоту 5,5 м футерованы карборундовой массой. поверхность фронтальной стены топки:

$$F_{сг} = \Pi + H = 51,9 + 5,5 \approx 285,5 \text{ м}^2 ;$$

$$H_{в.я.} = H + 1,5 = 5,5 + 1,5 = 7 \text{ м};$$

$$F_{в.я.} = 0,5 (\Pi \cdot H_{в.я.}) = 0,5 (51,9 \cdot 7) = 142,7.$$

Условный коэффициент загрязнения футерованной части экранов:

$$\xi_{\phi} = 0,53 - 0,25 \frac{t_3^{III}}{1000} = 0,53 - 0,25 \frac{1230}{1000} = 0,22$$

– расчетная эффективность зоны горения:



$$\psi_{3.Г} = \frac{\xi_{\phi} * F_{ст} + F_{в.я} (\xi_{\phi} - \xi)}{F_{ст} + F_{в.я}} =$$

$$= \frac{0,22 * 285,5 + 142,7(0,2 + 0,45)}{285,5 + 2 * 142,7} = 0,265$$

– максимальная температура зоны горения:

$$T_M = \beta_{сг} \cdot T'_a (1 - \psi_{3.Г})^{0,25} =$$

$$= 0,965 \cdot 2283 (1 - 0,265)^{0,25} \approx 2030 \text{ К};$$

температурный интервал реакции образования оксидов азота

$$\Delta T_P = \frac{T_M^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + T_M \cdot 10^{-5}} = \frac{2030^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + 0,0203} = 64,9^\circ \text{C}$$

расчетное время реакции в топке

$$\tau_{преб} = \frac{273 \cdot \xi}{0,155 \cdot T_{Г} \cdot 0,2784 \cdot 1,15} = \frac{273 \cdot 0,8}{0,155 \cdot 1810 \cdot 0,2784 \cdot 1,15} = 2,3 \text{ с}$$

1,15 – избыток воздуха на выходе из топки для Донецкого ГСШ, из таблицы; средняя температура газов в топке

$$T_{Г} = 0,84 (T_M^4 + 14634) 0,25 =$$

$$= 0,84(2030^4 + 14634) 0,25 = 1810 \text{ К}.$$

Тогда расчетное время реакции образования оксидов азота в топке

$$\tau_P = \frac{\Delta T_P}{T'_a - 1463} \left( \frac{q_f \cdot \Pi}{300} \right)^{0,5} \tau_{преб} = \frac{64,9}{2283 - 1463} \left( \frac{4,86 \cdot 51,9}{300} \right)^{0,5} 2,3 = 0,164 \text{ с}$$

теоретическое время достижения равновесия

$$\tau_0 = 0,024 \exp(54290 / T_M - \tau_{преб} \cdot 10) =$$

$$= 0,024 \exp(54290 / 2030 - 23) = 1,01 \text{ с};$$

концентрация термических оксидов азота при

$$C_{O_2} = \frac{0,21 V_B^0 [(\alpha_{зоп} - 1) + r(\alpha_{РЦ} - \alpha_{зоп})] \rho_{O_2}}{[V_{Г}^0 + (\alpha_{зоп} - 1) V_B^0] (1 + r)} =$$

$$= \frac{0,21 \cdot 5,83 \cdot 0,1 \cdot 1,428}{6,28 + 0,1 \cdot 5,83} = 0,025 \text{ кг/м}^3;$$

$$NO_2^{mp} = 7030 C_{O_2}^{0,5} \exp(-10860 / T_M) \frac{\tau_P}{\tau_O} =$$

$$= 7030 \cdot 0,025^{0,5} \exp(-10860 / 2030) \frac{0,164}{0,01} = 0,84 \text{ г/м}^3;$$

топливные и быстрые оксиды азота при содержании азота в топливе  $N^P = 1 \%$ :

$$NO_2^{тл} = (0,40 - 0,1N^P) N^P (1,1)^2 \left( \frac{2100 - T_M}{125} \right)^{0,33}$$

$$= (0,40 - 0,1 \cdot 1) \cdot 1 \cdot (1,1)^2 \left( \frac{2100 - 2030}{125} \right)^{0,33} = 0,30 \text{ г/м}^3;$$

– избыток воздуха на выходе из топки для природного газа, из таблицы; суммарный выход оксидов азота при жидком шлакоудалении

$$NO_2^0 = NO_{гp_2} + NO_{тл_2} = 0,84 + 0,30 = 1,14 \text{ г/м}^3.$$

3. Расчет выхода оксидов азота при сжигании природного газа:

- тепловыделение

$$Q'_T = Q_H \cdot 103 + Q_{г.в} = 37,3 \cdot 103 + 4992 = 42292 \text{ кДж/м}^3;$$

$$\alpha_{гор} = \alpha_T - 0,5\Delta\alpha_T = 1,1 - 0,5 \cdot 0,1 = 1,05;$$

1,1 – избыток воздуха на выходе из топки для природного газа, из таблицы;

0,1 – доля рециркуляции газов для природного газа, из таблицы;

Ожидаемая адиабатная температура горения (без учета рециркуляции газов):

$$t_a = \frac{1950}{\alpha_{гор}} (1 + 0,36 \cdot 10^{-5} Q'_m) = \frac{1950}{1,05} (1 + 0,36 \cdot 0,423) = 2135^\circ C$$

- температурный коэффициент изменения теплоемкости и теплоемкости газов и воздуха

$$k_t = \frac{t_a - 1200}{1000} = \frac{2135 - 1200}{1000} = 0,935;$$

$$c_{гT} = 1,57 + 0,134 \cdot k_t = 1,57 + 0,134 \cdot 0,935 = 1,695 \text{ кДж/(м}^3 \cdot K);$$

$$c_B = 1,46 + 0,092 \cdot k_t = 1,46 + 0,092 \cdot 0,935 = 1,546 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К});$$

- расчетная адиабатная температура

$$T'_a = \frac{Q'_T}{V_\Gamma^O \cdot c_\Gamma + 1,016(\alpha_{\text{гор}} - 1) \cdot V^O \cdot c_B} + 273 =$$

$$= \frac{42292}{11,16 \cdot 1,695 + 1,016(1,05 - 1) \cdot 9,96 \cdot 1,546} + 273 = 2147 + 273 = 2420 \text{ К}.$$

Максимальная температура в зоне горения – по (4.5). При сжигании природного газа происходит некоторое выгорание футеровки стен. Принимается тепловая эффективность стен в зоне футерования  $\psi_{\text{ст}} = 0,3$ , тогда

– расчетная эффективность зоны горения

$$\psi_{3.\Gamma} = \frac{\xi_\phi \cdot F_{\text{ст}} + F_{\text{в.я}} (\xi_\phi - \xi)}{F_{\text{ст}} + F_{\text{в.я}}} = \frac{0,3 \cdot 285,5 + 149,6(0,2 + 0,45)}{584,7} = 0,313;$$

– максимальная температура зоны горения

$$T_M = 0,97 \cdot T'_a (1 - \psi_{3.\Gamma})^{0,25} = 0,97 \cdot 2420(1 - 0,313)^{0,25} = 2030 \text{ К};$$

– расчетная температура

$$T'_M = \tau_0 \cdot T_M = 1,01 \cdot 2030 = 2050 \text{ К};$$

– температурный интервал реакции образования оксидов азота

$$\Delta T_P = \frac{T_M'^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + T_M'^2 \cdot 10^{-5}} = \frac{2050^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + 0,0205} = 66,3 \text{ К};$$

– средняя температура газов в топке

$$T_\Gamma = N^{\text{пр}_2} (T'_M{}^4 + 1483^4)^{0,25} = 0,84(2050^4 + 1483^4)^{0,25} = 1814 \text{ К};$$

– расчетное время реакции в топке

$$\tau_{\text{преб}} = \frac{273 \cdot 0,8}{0,155 \cdot \Delta T_P \cdot \psi_{\text{ст}} \cdot 1,1(1 + 0,1)} = \frac{273 \cdot 0,8}{0,155 \cdot 1814_P \cdot 0,3 \cdot 1,1(1 + 0,1)} = 2,15 \text{ с}$$

– расчетное время реакции образования оксидов азота в топке:

$$\tau_P = \frac{\Delta T_P}{T'_a - 1463} \left( \frac{q_f \cdot \Pi}{300} \right)^{0,5} \tau_{\text{проб}} = \frac{66,3}{2420 - 1463} \left( \frac{4,86 \cdot 51,9}{300} \right)^{0,5} 2,15 = 0,138 \text{ с}$$

– теоретическое время достижения равновесия

$$\begin{aligned} \tau_0 &= 0,024 \exp(54290 / T_M - 23) = \\ &= 0,024 \exp(54290/2050 - 23) = 0,78 \text{ с;} \end{aligned}$$

– концентрация термических оксидов азота при

$$\begin{aligned} C_{O_2} &= \frac{0,21 V_B^O [(\alpha_{\text{зоп}} - 1) + r(\alpha_{\text{ПЦ}} - \alpha_{\text{зоп}})] \rho_{O_2}}{[V_\Gamma^O + (\alpha_{\text{зоп}} - 1) V_B^O] (1 + r)} = \\ &= \frac{0,21 \cdot 9,96 \cdot (0,05 + 0,1 \cdot 0,12) \cdot 1,428}{(11,16 + 0,05 \cdot 9,36) \cdot 1,1} = 0,0144 \text{ кг/м}^3; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} NO_2^{mp} &= 7030 C_{O_2}^{0,5} \exp(-10860 / T_M) \frac{\tau_P}{\tau_0} = \\ &= 7030 \cdot 0,0144^{0,5} \exp(-10860 / 2050) \frac{0,138}{0,78} = 0,735 \text{ г/м}^3; \end{aligned}$$

– быстрые оксиды азота

$$\begin{aligned} NO_2^\delta &= 0,1 \left( \frac{\alpha_{\text{зоп}} + r}{1 + r} \right)^2 \left( \frac{T'_M - 800}{1000} \right)^{0,33} = \\ &= 0,1 \left( \frac{1,05 + 0,1}{1,1} \right)^2 \left( \frac{2500 - 800}{1000} \right)^{0,33} = 0,118 \text{ г/м}^3; \end{aligned}$$

– суммарный выход оксидов азота при сжигании природного газа с рециркуляцией

$$NO_2^0 = NO_2^{тр} + NO_2^\delta = 0,735 + 0,118 = 0,853 \text{ г/м}^3$$

## ГЛОССАРИЙ

**Газообразное топливо (газ)** - представляет смесь различных простых горючих и балластных газов. Горючие газы бывают искусственные и природные. К искусственным относят газы, вырабатываемые на газовых заводах в процессе термической переработки твердых и жидких топлив, а также выделяющиеся в качестве вторичных продуктов некоторых производств, например, в доменном процессе, при получении кокса, переработке нефти и др.

**Коэффициент пересчета** - указывает количество базовых единиц измерения в рецептурной единице измерения (например, 0,001 кг в 1 грамме).

**Зольность** - массовая доля золы, содержание в процентах негорючего (на безводную массу) остатка, который создается из минеральных примесей топлива при его полном сгорании. Обозначается символом  $A$ . Для практических целей значение зольности, определенное по аналитической пробе ( $A^a$ ), обычно пересчитывается на сухую массу  $A^c$  или рабочее  $A^p$  состояние топлива.

**Теплота сгорания** - количество выделившейся теплоты при полном сгорании массовой (для твердых и жидких веществ) или объёмной (для газообразных) единицы вещества. Измеряется в джоулях или калориях. **Теплота сгорания**, отнесенная к единице массы или объёма топлива, называется удельной теплотой сгорания. В системе СИ: Дж/кг. Также довольно часто используются внесистемные единицы измерения: кДж/кг, МДж/кг и ккал/кг.

**Условное топливо** - принятая при расчетах единица учёта органического топлива, то есть нефти и её производных, природного и специально получаемого при перегонке сланцев и

каменного угля, газа, торфа – которая используется для счисления полезного действия различных видов **топлива** в их суммарном учёте. Основным показателем **топлива** — удельная теплота сгорания. Для целей сравнения видов **топлива** введено понятие **условного топлива**.

**Влажность (содержание влаги) топлива** снижает его теплоту сгорания, так как увеличивается расход теплоты на испарение влаги и увеличивается объём продуктов сгорания (из-за наличия водяного пара).

**Сернистость - Сернистые соединения нефти** - сложные смеси, состоящие из меркаптанов, сульфидов, а также дисульфидов и гетероциклических соединений. **Сера** является самым распространённым из гетероатомов в нефти и нефтепродуктах. Её **содержание** в нефти составляет от сотых долей процента (бакинские, туркменские, сахалинские нефти) до 5—6 % (нефти Урало-Поволжья и Сибири), реже до 14 % (месторождение Пойнт, США).

**Продукты сгорания** - представляют собой смесь следующих газов: углекислого газа  $CO_2$ , сернистого ангидрида  $SO_2$ , водяных паров  $H_2O$ , азота  $N_2$ , не использованного при **горении** (избыточного и не участвовавшего в процессе полного окисления углерода) кислорода  $O_2$ , оксида углерода  $CO$  и других **продуктов неполного сгорания**, которыми мы пренебрегаем.

**Коэффициент избытка воздуха** - это отношение фактически подаваемого количества **воздуха** к теоретически необходимому.

**Энтальпия** - функция состояния термодинамической системы, определяемая как сумма внутренней энергии. и произведения давления. на объём.

**Энтальпия продуктов сгорания** - количество теплоты, которое надо сообщить этим **продуктам**, чтобы нагреть их при постоянном давлении от 0 до  $h^\circ C$ . Соответственно, если **продукты сгорания** охладить, то они отдадут теплоту.

**Тепловой баланс котельного агрегата** - устанавливает равенство между поступающим в **агрегат** количеством теплоты

и его расходом. На основании **теплового баланса котельного агрегата** определяют расход топлива и вычисляют коэффициент полезного действия, который является важнейшей характеристикой энергетической эффективности работы котла.

**Располагаемая теплота** топлива - полное количество **теплоты**, которое может выделиться в топке (кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>).

**КПД брутто котельного агрегата** - характеризует степень его технического совершенства.

**КПД нетто** - характеризует коммерческую экономичность.

**Характеристики топок** - к основным относятся мощность топки, форсировка **топочного устройства**, удельная нагрузка **топочного объема**.

**Тепловая мощность топки** - это количество теплоты, выделяемой при сжигании топлива в топке в единицу времени.

**Лучевоспринимающая поверхность топки** — обеспечивает охлаждение продуктов сгорания до температуры принятой по условиям оптимального теплового режима работы топки, и её габаритов. Нижний предел температуры установлен из условий устойчивого горения топлива (800 — 900 °С).

**Полезное тепловыделение  $Q_T$**  - это доля теплоты, воспринятой в топке от сгоревшего топлива, включая дополнительные потоки вносимой теплоты и исключая все теплопотери.

**Теоретическая температура горения топлива в топке** - представляет собой температуру, до которой нагрелись бы продукты сгорания, если бы на их нагрев пошла вся теплота, введенная в топку, за вычетом потерь теплоты от химической неполноты сгорания топлива и физической теплоты шлака

**Пароперегреватель** - устройство, предназначенное для получения, перегретого пара с температурой выше, чем температура насыщения в барабане котла при том же давлении, что и в котле.

**Экономайзер** - прибор для нагревания воды или воздуха в котельной установке с помощью тепла уходящих из котла дымовых газов, дающий возможность достигнуть значительной экономии топлива.

**Воздухоподогреватель** - аппарат для теплопередачи, через который воздух для горения проходит и нагревается теплоносителем, таким как продукты сгорания, пар или другая среда.

**Золовой износ** - разрушение металлических стенок поверхности нагрева котла твёрдыми частицами, уносимыми газовым потоком

**Низкотемпературная коррозия** наружных поверхностей нагрева возникает при конденсации на поверхности нагрева водяных паров и образовании жидкой пленки, являющейся электролитом. Конденсация водяных паров возникает при температуре поверхности нагрева ниже точки росы, которая определяется парциальным давлением водяных паров в продуктах сгорания, увеличивающимся с повышением влажности топлива и содержания в нем водорода.

**Дутьевые вентиляторы** - это специальный вид промышленных **вентиляторов**, называемый ещё тягодутьевыми машинами, применяемый в тепловой промышленности и предназначенный для подачи свежего, чистого воздуха в топку различных котлов или других технологических промышленных устройств, например, таких как котельные, тепловые электростанции, пылеугольные и газомазутные котлы, печи.

**Дымосос** - тягодутьевая машина (как правило, центробежного типа), которая служит для удаления дымовых газов — продуктов сгорания топлива. Предназначен для применения в теплоэнергетике (устанавливается после котла) или для противопожарных мероприятий. Устаревшее название — эксгаустер.

**Дымовая труба́ (дымоход)** — инженерная система жизнеобеспечения зданий и сооружений, предназначенная для отведения продуктов сгорания от работающих теплогенерирующих аппаратов в атмосферу, посредством естественного или принудительного побуждения тяги, на безопасную высоту (удалённость) для людей и зданий. Промышленные **дымовые трубы** выполняются преимущественно вертикальными и цилиндрическими, могут достигать до нескольких сотен метров в высоту.



**Теплообменные аппараты** - устройства для передачи теплоты от одного теплоносителя (теплоотдающего) к другому (тепловоспринимающему).

**Питательные устройства** предназначены для подачи питательной воды в котел. Они являются ответственными элементами всей установки, обеспечивая безопасность ее эксплуатации.

**Непрерывная продувка** – это **непрерывный** отвод части котловой воды из выносных циклонов солевого отсека для удаления примесей и поддержания оптимальных норм качества котловой воды.

**Оксид азота**  $N_2O_5$  (пентаоксид азота, азотный ангидрид) – бесцветное кристаллическое вещество, легко разлагается на  $NO_2$  и  $O_2$ . Сильный окислитель. В воде легко растворяется с образованием азотной кислоты  $HNO_3$ .

## ПРИЛОЖЕНИЕ

**Таблица 1. Энтальпия 1 м<sup>3</sup> газов и влажного воздуха  
(кДж/м<sup>3</sup>) и 1 кг золы (кДж/кг)**

$\theta, ^\circ\text{C}$	$(c\theta)_{\text{CO}_2}$	$(c\theta)_{\text{N}_2}$	$(c\theta)_{\text{O}_2}$	$(c\theta)_{\text{H}_2\text{O}}$	$(c\theta)_\text{в}$	$(c\theta)_\text{з}$
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
100	169	130	132	151	132	80,8
200	357	260	267	304	266	169,1
300	559	392	407	463	403	263,7
400	772	527	552	626	542	360,0
500	996	664	699	794	684	458,5
600	1222	804	850	967	830	560,6
700	1461	946	1005	1147	979	662,9
800	1704	1093	1160	1335	1130	767,6
900	1951	1243	1319	1524	1281	874,0
1000	2202	1394	1478	1725	1436	984,0
1100	2457	1545	1637	1926	1595	1096,0
1200	2717	1695	1800	2131	1754	1206,0
1300	2976	1850	1963	2344	1913	
1400	3240	2009	2127	2558	2076	
1500	3504	2164	2294	2779	2239	
1600	3767	2323	2461	3001	2403	
1700	4035	2482	2629	3227	2566	
1800	4303	2642	2796	3458	2729	
1900	4571	2805	2968	3688	2897	
2000	4843	2964	3139	3926	3064	
2100	5115	3127	3307	4161	3232	
2200	5387	3290	3483	4399	3399	

*Примечание.* Энтальпия влажного воздуха  $(c\theta)_\text{в}$ , приведена при влагосодержании  $d_r=10\text{г/м}^3$ .

**Таблица 2. Параметры сухого насыщенного пара и воды на кривые насыщения (по давлениям)**

$p$ , МПа	$t_H$ , °С	$v'$ , м <sup>3</sup> /кг	$v''$ , м <sup>3</sup> /кг	$i'$ , кДж/кг	$i''$ , кДж/кг	$S'$ , кДж/ (кг·К)	$S''$ , кДж/ (кг·К)
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
0,0010	6,936	0,0010001	130,04	29,18	2513,4	0,1053	8,9749
0,0015	13,001	0,0010007	88,38	54,61	2524,7	0,1952	8,8268
0,0020	17,486	0,0010014	67,24	73,40	2533,1	0,2603	8,7227
0,0025	21,071	0,0010021	54,42	88,36	2539,5	0,3119	8,6424
0,0030	24,078	0,0010028	45,77	100,93	2545,3	0,3547	8,5784
0,0035	26,674	0,0010035	39,56	111,81	2549,9	0,3912	8,5222
0,0040	28,95	0,0010042	34,93	121,33	2553,7	0,4225	8,4737
0,005	32,89	0,0010054	28,24	137,79	2560,9	0,4764	8,3943
0,010	45,82	0,0010102	14,70	191,84	2583,9	0,6496	8,1494
0,020	60,08	0,0010171	7,652	251,48	2609,2	0,8324	7,9075
0,025	64,99	0,0010198	6,201	272,03	2617,6	0,8934	7,8300
0,030	69,12	0,0010223	5,232	289,30	2624,6	0,9441	7,7673
0,04	75,87	0,0010264	3,999	317,62	2636,3	1,0261	7,6710
0,05	81,33	0,0010299	3,243	340,53	2645,2	1,0912	7,5923
0,10	99,62	0,0010432	1,696	417,47	2674,9	1,3026	7,3579
0,20	120,23	0,0010606	0,8860	504,74	2706,8	1,5306	7,1279
0,30	133,54	0,0010733	0,6055	561,7	2725,5	1,6716	6,9922
0,5	151,84	0,0010927	0,3749	640,1	2748,8	1,8605	6,8221
0,6	158,84	0,0011009	0,3156	670,6	2756,9	1,9311	6,7609
0,7	164,96	0,0011081	0,2728	697,2	2763,7	1,9923	6,7090
0,8	170,41	0,0011149	0,2403	720,9	2769,0	2,0461	6,6630
0,9	175,36	0,0011213	0,2149	742,7	2773,7	2,0945	6,6223
1,0	179,88	0,0011273	0,1945	762,4	2777,8	2,1383	6,5867
1,5	198,28	0,0011538	0,1317	844,5	2791,8	2,3148	6,4458
2,0	212,37	0,0011768	0,09961	908,6	2799,2	2,4471	6,3411
3,0	233,83	0,0012164	0,06663	1008,4	2803,1	2,6455	6,1859
4,0	250,33	0,0012520	0,04977	1087,5	2800,6	2,7965	6,0689
5,0	263,91	0,0012858	0,03943	1154,2	2793,9	2,9210	5,9739
6,0	275,56	0,0013185	0,03243	1213,9	2784,4	3,0276	5,8894
7,0	285,80	0,0013510	0,02738	1267,6	2772,3	3,1221	5,8143
8,0	294,98	0,0013838	0,02352	1317,3	2758,6	3,2079	5,7448
9,0	303,31	0,0014174	0,02049	1363,9	2742,6	3,2866	5,6783
10,0	310,96	0,0014522	0,01803	1407,9	2724,8	3,3601	5,6147
12,0	324,64	0,001527	0,01426	1491,1	2684,6	3,4966	5,4930

14,0	336,63	0,001611	0,01149	1570,8	2637,9	3,6233	5,3731
16,0	347,32	0,001710	0,009319	1649,6	2581,7	3,7456	5,2478
18,0	356,96	0,001839	0,007505	1732,2	2510,6	3,8708	5,1054
20,0	365,72	0,00203	0,00586	1826,8	2410,3	4,0147	4,9280
22,0	373,71	0,00269	0,00378	2009,7	2195,6	4,2943	4,5815

**Таблица 3. Параметры сухого насыщенного пара и воды на кривые насыщения (по температурам)**

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{МПа}$	$v', \text{м}^3/\text{кг}$	$v'', \text{м}^3/\text{кг}$	$i', \text{кДж/кг}$	$i'', \text{кДж/кг}$	$S', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$S'', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
0	0,0006108	0,0010002	206,3	0,000	2500,8	0	9,1544
5	0,0008718	0,0010001	147,2	21,06	2510,0	0,0762	9,0242
10	0,0012271	0,0010004	106,42	42,04	2519,2	0,1511	8,8995
15	0,001704	0,0010010	77,97	62,97	2528,4	0,2244	8,7806
20	0,002337	0,0010018	57,84	83,90	2537,2	0,2964	8,6663
25	0,003167	0,0010030	43,40	104,80	2546,4	0,3672	8,5570
30	0,004241	0,0010044	32,93	125,69	2555,6	0,4367	8,4523
35	0,005622	0,0010060	25,25	146,58	2564,8	0,5049	8,3518
40	0,007375	0,0010079	19,55	167,51	2573,6	0,5723	8,2560
45	0,009582	0,0010099	15,28	188,41	2582,4	0,6385	8,1638
50	0,012335	0,0010121	12,05	209,30	2591,6	0,7038	8,0751
55	0,015741	0,0010145	9,578	230,19	2600,4	0,7679	7,9901
60	0,01992	0,0010171	7,678	251,12	2609,2	0,8311	7,9084
65	0,02501	0,0010199	6,201	272,06	2617,6	0,8935	7,8297
70	0,03116	0,0010228	5,045	292,99	2626,4	0,9550	7,7544
75	0,03855	0,0010258	4,13,1	313,97	2634,8	1,0157	7,6819
80	0,04736	0,0010290	3,409	334,94	2643,1	1,0752	7,6116
85	0,05780	0,0010324	2,828	355,96	2651,5	1,1342	7,5438
90	0,07011	0,0010359	2,361	376,98	2659,5	1,1924	7,4785
95	0,08452	0,0010396	1,982	398,04	2667,8	1,2502	7,4157
100	0,10132	0,0010435	1,673	419,10	2675,8	1,3071	7,3545
105	0,12080	0,0010474	1,419	440,20	2683,3	1,3632	7,2959
100	0,14327	0,0010513	1,210	461,34	2691,3	1,4185	7,2386
115	0,16906	0,0010558	1,037	482,53	2698,8	1,4725	7,1833
120	0,19854	0,0010603	0,8417	503,7	2706,3	1,5278	7,1289
125	0,23208	0,0010649	0,7704	525,0	2713,5	1,5814	7,0778
130	0,27011	0,0010697	0,6683	546,4	2720,6	1,6345	7,0271

135	0,3130	0,0010747	0,5820	567,7	2727,3	1,6869	6,9781
140	0,3614	0,0010798	0,5087	589,1	2734,0	1,7392	6,9304
145	0,4155	0,0010851	0,4461	610,4	2740,3	1,7907	6,8839
150	0,4760	0,0010906	0,3926	632,2	2746,5	1,8418	6,8383
155	0,5433	0,0010962	0,3465	653,6	2752,4	1,8924	6,7939
160	0,6180	0,0011021	0,3068	675,3	2757,8	1,9427	6,7508
165	0,7008	0,0011081	0,2725	697,5	2763,7	1,9925	6,7081
170	0,7920	0,0011144	0,2426	719,3	2768,7	2,0419	6,6666
175	0,8925	0,0011208	0,2166	741,1	2773,3	2,0909	6,6256
180	1,0027	0,0011275	0,1939	763,3	2778,4	2,1395	6,5858
185	1,1234	0,0011344	0,1739	785,4	2782,5	2,1876	6,5465
190	1,2553	0,0011415	0,1564	807,6	2786,3	2,2358	6,5075
195	1,3989	0,0011489	0,1409	829,8	2789,7	2,2835	6,4699
200	1,5550	0,0011565	0,1272	852,4	2793,0	2,3308	6,4318
205	1,7245	0,0011644	0,1150	875,0	2795,5	2,3777	6,3945
210	1,9080	0,0011726	0,1044	897,6	2798,0	2,4246	6,3577

*Продолжение табл. 3*

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{МПа}$	$\nu', \text{м}^3/\text{кг}$	$\nu'', \text{м}^3/\text{кг}$	$i', \text{кДж/кг}$	$i'', \text{кДж/кг}$	$S', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$S'', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
215	2,1062	0,0011812	0,09465	920,7	2800,1	2,4715	6,3212
220	2,3202	0,0011900	0,08606	943,7	2801,4	2,5179	6,2848
225	2,5504	0,0011992	0,07837	967,2	2802,6	2,5640	6,2488
230	2,7979	0,0012087	0,07147	990,2	2803,1	2,6101	6,2132
235	3,0635	0,0012187	0,06527	1014,0	2803,4	2,6561	6,1780
240	3,3480	0,0012291	0,05967	1037,5	2803,1	2,7022	6,1425
245	3,6524	0,0012399	0,05462	1061,8	2802,6	2,7478	6,1073
250	3,978	0,0012512	0,05005	1086,1	2801,0	2,7934	6,0721
255	4,325	0,0012631	0,04591	1110,3	2788,9	2,8395	6,0365
260	4,694	0,0012755	0,04215	1135,0	2796,4	2,8851	6,0014
265	5,088	0,0012886	0,03872	1160,2	2793,4	2,9308	5,9658
270	5,505	0,0013023	0,03560	1185,3	2789,7	2,9764	5,9298
275	5,949	0,0013168	0,03275	1210,8	2785,1	3,0225	5,8938
280	6,419	0,0013321	0,03013	1236,8	2779,6	3,0685	5,8573
285	6,918	0,0013483	0,02774	1263,2	2773,3	3,1146	5,8201
290	7,445	0,0013655	0,02553	1290,0	2766,2	3,1610	5,7824
295	8,002	0,0013839	0,02351	1317,2	2758,3	3,2079	5,7443
300	8,592	0,0014036	0,02164	1344,8	2749,1	3,2548	5,7049

305	9,213	0,001425	0,01992	1373,3	2739,0	3,3025	5,6647
310	9,869	0,001447	0,01831	1402,2	2727,3	3,3507	5,6233
315	10,561	0,001472	0,01683	1431,9	2714,3	3,3997	5,5802
320	11,290	0,001499	0,01545	1462,0	2699,6	3,4495	5,5354
325	12,057	0,001529	0,01417	1493,4	2683,3	3,5002	5,4893
330	12,864	0,001562	0,01297	1526,1	2665,7	3,5521	5,4412
335	13,715	0,001599	0,01184	1559,6	2645,2	3,6057	5,3905
340	14,608	0,001639	0,01078	1594,8	2621,8	3,6605	5,3361
345	15,547	0,001686	0,09771	1632,0	2595,4	3,7183	5,2770
350	16,537	0,001741	0,08805	1671,4	2564,4	3,7786	5,2117
355	17,577	0,001807	0,007869	1714,1	2527,2	3,8439	5,1385
360	18,674	0,001894	0,006943	1761,4	2481,1	3,9163	5,0530
365	19,830	0,00202	0,00600	1817,5	2420,8	4,0009	4,9463
370	21,053	0,00222	0,00493	1892,4	2330,8	4,1135	4,7951
375	22,087	0,00280	0,00361	2031,9	2171,7	4,3258	4,5418

**Таблица 4. Термодинамические свойства фреона-12 на линии насыщения**

$t$ , °C	$p$ , МПа	$v_g$ , м <sup>3</sup> /кг	$v_l$ , м <sup>3</sup> /кг	$i_g$ , кДж/кг	$i_l$ , кДж/кг	$S_g$ , кДж/(кг·К)	$S_l$ , кДж/(кг·К)
-39	0,06730	0,0006605	0,2337	384,06	554,63	4,0513	4,7797
-35	0,08076	0,0006658	0,1973	387,46	556,59	4,0655	4,7759
-30	0,10044	0,0006723	0,1613	391,73	559,06	4,0832	4,7716
-25	0,12369	0,0006793	0,1331	396,07	561,54	4,1007	4,7675
-20	0,15094	0,0006861	0,1107	400,44	563,96	4,1180	4,7642
-15	0,18257	0,0006940	0,04268	404,92	566,39	4,1353	4,7610
-10	0,21904	0,0007018	0,08713	409,44	568,82	4,1525	4,7583
-5	0,16080	0,0007092	0,06635	414,00	571,16	4,1695	4,7558
0	0,30848	0,0007173	0,01667	418,65	573,51	4,1865	4,7536
+5	0,36234	0,0007257	0,04863	423,34	578,81	4,2033	4,7515
+10	0,42289	0,0007342	0,04204	428,11	578,07	4,2201	4,7498
+15	0,49094	0,0007435	0,03648	432,97	580,29	4,2368	4,7481
+20	0,56653	0,0007124	0,01171	437,87	582,42	4,2534	4,7466
+25	0,65062	0,0007628	0,02773	442,81	584,48	4,2699	4,7451
+30	0,74324	0,0007734	0,02433	447,83	586,44	4,2864	4,7437

**Таблица 5. Термодинамические свойства аммиака на линии насыщения**

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{МПа}$	$v_4, \text{м}^3/\text{кг}$	$v_l, \text{м}^3/\text{кг}$	$i_4, \text{кДж/кг}$	$i_l, \text{кДж/кг}$	$S_4, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$S_l, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
-50	0,0409	0,001425	2,623	193,4	1608,1	3,3000	9,6204
-45	0,0546	0,001437	2,007	215,6	1616,5	3,3767	9,5199
-40	0,0718	0,001449	1,550	237,8	1624,9	3,4730	9,4245
-35	0,0932	0,001462	1,215	260,0	1632,8	3,5672	9,3341
-30	0,1195	0,001476	0,963	282,2	1640,8	3,6601	9,2486
-25	0,1516	0,001490	0,771	304,4	1648,3	3,7514	9,1674
-20	0,1902	0,001504	0,624	327,4	1655,4	3,8410	9,0895
-15	0,2363	0,001519	0,509	330,0	1662,6	3,9293	9,0150
-10	0,2909	0,001534	0,418	372,6	1669,3	4,0164	8,9438
-5	0,3549	0,001550	0,347	395,6	1675,1	4,1022	8,8756
0	0,4294	0,001566	0,290	418,7	1681,0	4,1868	8,8094
5	0,5517	0,001583	0,244	441,7	1686,4	4,2705	8,7458
10	0,6150	0,001601	0,206	465,2	1691,0	4,3530	8,6838
15	0,7283	0,001619	0,175	488,6	1695,6	4,4346	8,6240
20	0,8572	0,001639	0,149	512,5	1699,4	4,5155	8,5658
25	1,0027	0,001659	0,128	536,3	1703,2	4,5954	8,5092
30	1,1665	0,001680	0,111	581,1	1705,7	4,6746	8,4536
35	1,3499	0,001702	0,096	584,9	1708,2	4,7528	8,3991
40	1,5544	0,001726	0,083	609,2	1709,9	4,8307	8,3455
45	1,7814	0,001750	0,073	633,9	1710,7	4,9078	8,2928
50	2,0326	0,001777	0,064	659,0	1711,1	4,9840	8,2400

**. Средняя массовая теплоемкость газов при постоянном давления  $C_{pm}, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$**

$t, ^\circ\text{C}$	$\text{O}_2$	$\text{N}_2$	$\text{CO}$	$\text{CO}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{SO}_2$	Воздух (абсолютно сухой)
0	0,9148	1,0304	1,0396	0,8148	1,8594	0,607	1,0036
100	0,9232	1,0316	1,0417	0,8658	1,8728	0,636	1,0061
200	0,9353	1,0346	1,0463	0,9102	1,8937	0,662	1,0115
300	0,9500	1,0400	1,0538	0,9487	1,9192	0,687	1,0191
400	0,9651	1,0475	1,0634	0,9826	1,9477	0,708	1,0283
500	0,9793	1,0567	1,0748	1,0128	1,9778	0,724	1,0387

600	0,9927	1,0668	1,0861	1,0396	2,0092	0,737	1,0496
700	1,0048	1,0777	1,0978	1,0639	2,0419	0,754	1,0605
800	1,0157	1,0881	1,1091	1,0852	2,0754	0,762	1,0710
900	1,0258	1,0982	1,1200	1,1045	2,1097	0,775	1,0815
1000	1,0350	1,1078	1,1304	1,1225	2,1436	0,783	1,0907
1100	1,0434	1,1170	1,1401	1,1384	2,1771	0,791	1,0999
1200	1,0509	1,1258	1,4493	1,1530	2,2106	0,795	1,1082
1300	1,0580	1,1342	1,1577	1,1660	2,2429	—	1,1166
1400	1,0647	1,1422	1,1656	1,1782	2,2743	—	1,1242
1500	1,0714	1,1497	1,1731	1,1895	2,3048	—	1,1313
1600	1,0773	1,1564	1,1798	1,1995	2,3346	—	1,1380
1700	1,0831	1,1631	1,1865	1,2091	2,3630	—	1,1443
1800	1,0886	1,1690	1,1924	1,2179	2,3907	—	1,1501
1900	1,0940	1,1748	1,1983	1,2259	2,4166	—	1,1560
2000	1,0990	1,1803	1,2033	1,2334	2,4422	—	1,1610

**Таблица 7. Средняя массовая теплоемкость газов при постоянном объеме  $C_{vm}$ , кДж/(кг·К)**

$t, ^\circ\text{C}$	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> (атмосферный)	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Воздух (абсолютно сухой)
0	0,6548	0,7352	0,7427	0,6259	1,3980	0,447	0,7164
100	0,6632	0,7365	0,7448	0,6770	1,4114	0,507	0,7193
200	0,6753	0,7394	0,7494	0,7214	1,4323	0,532	0,7243
300	0,6900	0,7448	0,7570	0,7599	1,4574	0,557	0,7319
400	0,7051	0,7524	0,7666	0,7938	1,4863	0,578	0,7415
500	0,7193	0,7616	0,7775	0,8240	1,5160	0,595	0,7519
600	0,7327	0,7716	0,7892	0,8508	1,5474	0,607	0,7624
700	0,7448	0,7821	0,8009	0,8746	1,5805	0,624	0,7733
800	0,7557	0,7926	0,8122	0,8964	1,6140	0,632	0,7842
900	0,7658	0,8030	0,8231	0,9157	1,6483	0,645	0,7942
1000	0,7750	0,8127	0,8336	0,9332	1,6823	0,653	0,8039
1100	0,7834	0,8219	0,8432	0,9496	1,7158	0,662	0,8127
1200	0,7913	0,8307	0,8566	0,9638	1,7488	0,666	0,8215
1300	0,7984	0,8390	0,8608	0,9772	1,7815	—	0,8294
1400	0,8051	0,8470	0,8688	0,9893	1,8129	—	0,8369



**Таблица 8. Средняя объемная теплоемкость газов  
в постоянном давлении  $C_{pm}$ , кДж/(м<sup>3</sup>·К)**

$t, ^\circ\text{C}$	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Воздух (аб- солютно сухой)
0	1,3059	1,2946	1,2992	1,5998	1,493	1,733	1,2971
100	1,3176	1,2958	1,3017	1,7003	1,502	1,813	1,3004
200	1,3352	1,2996	1,3071	1,7873	1,5223	1,888	1,3071
300	1,3561	1,3067	1,3167	1,8627	1,5424	1,955	1,3172
400	1,3775	1,3163	1,3289	1,9297	1,5654	2,018	1,3289
500	1,3980	1,3276	1,3427	1,9887	1,5897	2,068	1,3427
600	1,4168	1,3402	1,3574	2,0411	1,6148	2,114	1,3565
700	1,4344	1,3536	1,3720	2,0884	1,6412	2,152	1,3708
800	1,4499	1,3670	1,3862	2,1311	1,6680	2,181	1,3842
900	1,4645	1,3796	1,3396	2,1692	1,6957	2,215	1,3976
1000	1,4775	1,3917	1,4126	2,2033	1,7229	2,236	1,4097
1100	1,4892	1,4034	1,4248	2,2349	1,7501	2,261	1,4214
1200	1,5005	1,4143	1,4361	2,2638	1,7769	2,278	1,4327
1300	1,5106	1,4252	1,4465	2,2898	1,8028	—	1,4432
1400	1,5202	1,4348	1,4566	2,3136	1,8280	—	1,4528
1500	1,5294	1,4440	1,4658	2,3354	1,8527	—	1,4620
1600	1,5378	1,4528	1,4746	2,3555	1,8761	—	1,4708
1700	1,5462	1,4612	1,4825	2,3743	1,8996	—	1,4867
1800	1,5541	1,4687	1,4901	2,3915	1,9213	—	1,4867
1900	1,5617	1,4758	1,4972	2,4074	1,9423	—	1,4939
2000	1,5692	1,4825	1,5039	2,4221	1,9628	—	1,5010

**Таблица 9. Средняя объемная теплоемкость газов  
при постоянном давлении  $C_{vm}$ , кДж/(м<sup>3</sup>·К)**

$t, ^\circ\text{C}$	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Воздух (абсолютно сухой)
0	0,9349	0,9236	0,9282	1,2288	1,1237	1,361	0,9261
100	0,9466	0,9249	0,9307	1,3293	1,1342	1,440	0,9295
200	0,9642	0,9286	0,9363	1,4164	1,1514	1,516	0,9362
300	0,9852	0,9357	0,9458	1,4918	1,1715	1,587	0,9462
400	1,0065	0,9454	0,9579	1,5587	1,1945	1,645	0,9579
500	1,0270	0,9567	0,9718	1,6178	1,2188	1,700	0,9718
600	1,0459	0,9692	0,9864	1,6701	1,2439	1,742	0,9856
700	1,0634	0,9826	1,0011	1,7174	1,2703	1,779	0,9998
800	1,0789	0,9960	1,0153	1,7601	1,2971	1,813	1,0132
900	1,0936	1,0086	1,0287	1,7982	1,3247	1,842	1,0262
1000	1,1066	1,0207	1,0417	1,8326	1,3519	1,867	1,0387
1100	1,1183	1,0325	1,0538	1,8640	1,3791	1,888	1,0505
1200	1,1296	1,0434	1,0651	1,8929	1,4059	1,905	1,0618
1300	1,1396	1,0542	1,0756	1,9188	1,4319	—	1,0722
1400	1,1493	1,0639	1,0856	1,9427	1,4570	—	1,0819
1500	1,1585	1,0731	1,0948	1,9644	1,4817	—	1,0911
1600	1,1669	1,0819	1,1036	1,9845	1,5052	—	1,0999
1700	1,1752	1,0902	1,1116	2,0034	1,5286	—	1,1078
1800	1,1832	1,0978	1,1191	2,0205	1,5504	—	1,1158
1900	1,1907	1,1049	1,1262	2,0365	1,5713	—	1,1229
2000	1,1978	1,1116	1,1329	2,0511	1,5918	—	1,1296

**Таблица 10. Средняя молярная теплоемкость газов при  
постоянном давлении  $C_{pm}$ , кДж/(моль·К)**

$t, ^\circ\text{C}$	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Воздух (абсолютно сухой)
0	29,274	29,019	29,123	35,860	33,499	38,85	29,073
100	29,538	29,048	29,178	38,112	33,741	40,65	29,152

200	29,931	29,132	29,303	40,059	34,118	42,33	29,299
300	30,400	29,287	29,517	41,755	34,575	43,88	29,521
400	30,878	29,500	29,789	43,250	35,090	45,22	29,789
500	31,334	29,764	30,099	44,573	35,630	46,39	30,095
600	31,761	30,044	30,425	45,453	36,195	47,35	30,405
700	32,150	30,341	30,752	46,813	36,789	48,23	30,723
800	32,502	30,635	31,070	47,763	37,392	48,94	31,028
900	32,825	30,924	31,376	48,617	38,008	49,61	31,321
1000	33,118	31,196	31,665	49,392	38,619	50,16	31,598
1100	33,386	31,455	31,937	50,099	39,226	50,66	31,862
1200	33,633	31,707	32,192	50,740	39,825	51,08	32,109
1300	33,863	31,941	32,427	51,322	40,407	—	32,343
1400	34,076	32,163	32,653	51,858	40,976	—	32,575
1500	34,282	32,372	32,858	52,348	41,525	—	32,774
1600	34,474	32,565	33,051	52,800	42,056	—	32,967
1700	34,658	32,749	33,231	53,218	42,576	—	33,151
1800	34,834	32,917	33,402	53,504	43,070	—	33,319
1900	35,006	33,080	33,561	53,959	43,539	—	33,482
2000	35,169	33,231	33,708	54,290	43,995	—	33,641

**Таблица 11. Средняя молярная теплоемкость газов при постоянном давлении  $C_{вт}$ , кДж/(моль·К)**

$t, ^\circ\text{C}$	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Воздух (аб- солютно сухой)
0	20,959	20,704	20,808	27,545	25,184	30,52	20,758
100	21,223	20,733	20,863	29,797	25,426	32,52	20,838
200	21,616	20,800	20,988	31,744	25,803	34,00	20,984
300	22,085	20,972	21,202	33,440	26,260	35,55	21,206
400	22,563	21,185	21,474	34,935	26,775	36,89	21,474
500	23,019	21,449	21,784	36,258	27,315	38,06	21,780
600	23,446	21,729	22,110	37,438	27,880	39,02	22,090
700	23,835	22,027	22,437	38,498	28,474	39,90	22,408
800	24,187	22,320	22,755	39,448	29,077	40,61	22,713
900	24,510	22,609	23,061	40,302	29,693	42,28	23,006
1000	24,803	22,881	23,350	41,077	30,304	41,83	23,283
1100	25,071	23,140	23,622	41,784	30,911	42,33	23,547
1200	25,318	23,322	23,877	42,425	31,510	42,75	23,794

1300	25,548	23,626	24,112	43,007	32,092	—	24,028
1400	25,761	23,848	24,338	43,543	32,661	—	24,250
1500	25,967	24,057	24,543	44,033	33,210	—	24,459
1600	26,159	24,250	24,736	44,485	33,741	—	24,652
1700	26,343	24,434	24,916	44,903	34,261	—	24,836
1800	26,519	24,602	25,087	45,289	34,755	—	25,004
1900	26,691	24,765	25,246	45,644	35,224	—	25,167
2000	26,854	24,916	25,393	45,975	35,680	—	25,326

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Брюханов О. Н. Газифицированные котельные агрегаты [Электронный ресурс]: учебник / О. Н. Брюханов. - Москва: ИНФРА-М, 2013. - 392 с. - (Профессиональное образование). - ISBN 978-5-16-005373-8. - Режим доступа: <http://znanium.com/go.php?id=401008>.

2. Брюханов О. Н. Основы эксплуатации оборудования и систем газоснабжения [Электронный ресурс]: учебник / О. Н. Брюханов. - Москва: ИНФРА-М, 2014. - 256 с. (Профессиональное образование). - ISBN 978-5-16-009539-4. - Режим доступа: <http://znanium.com/go.php?id=446425>.

3. Кудинов А. А. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях [Электронный ресурс] / А. А. Кудинов, С. К. Зиганшина. - Москва: Машиностроение, 2011. - 374 с. - ISBN 978-5-94275-558-4. - Режим доступа: [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=2014](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=2014).

4. Фокин В.М. Теплогенерирующие установки систем теплоснабжения / В.М. Фокин. – М.: Машиностроение – 1, 2006.

5. Кудинов В. А. Техническая термодинамика и теплопередача [Текст]: учебник для бакалавров / В.А. Кудинов, Э. М. Карташов, Е. В. Стефанюк. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Юрайт, 2013. - 566 с.: схемы. - (Бакалавр. Базовый курс). - Библиогр.: с. 562-566. - Гриф МО. - В пер. - ISBN 978-5-9916-2066-6. 20 экз

6. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети / Е.Я. Соколов. – М.: Энергия, 2018.

7. Соколов Е.Я. Промышленные тепловые электростанции / Е.Я. Соколов. – М.: Энергия, 2015.

8. Костюк А.Г. Турбины тепловых и атомных электрических станций: Учебник / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухин. – М.: МЭИ, 2001.

9. Липов Ю.М. Котельные установки и парогенераторы / Ю.М. Липов, Ю.М. Третьяков. – 2-е изд. – М.: 2006.

10. Зыков А.К. Паровые и водогрейные котлы / А.К. Зыков. – М.: НПО ОБТ, 2006.

11.Фурсов И.Д. Конструирование и тепловой расчет паровых котлов / И.Д. Фурсов, В.В. Коновалов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Барнаул: Алт. гос.

техн. ун-т им. И.И. Ползунова, 2001.

12.Безгрешнов А.Н. Расчет паровых котлов в примерах и задачах /

А.Н. Безгрешнов. – М.: Энергоатомиздат, 2000.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>ГЛАВА 1. Твердые, жидкие и газообразные топлива</b>	<b>4</b>
1.1. Состав топлива	4
1.2. Характеристики топлива	10
1.3. Объем воздуха. объем и масса продуктов сгорания	18
1.4. Энтальпия продуктов сгорания и воздуха	31
<b>Глава 2. Котельные установки</b>	<b>38</b>
2.1. Тепловой баланс, коэффициент полезного действия и расход топлива котельного агрегата.	38
2.2. Характеристики топочных устройств	61
2.3. Расчёт теплообмена в топочных устройствах	65
2.4. Расчёт конвективных поверхностей нагрева котельного агрегата	84
2.5. Золовый износ и низкотемпературная коррозия	104
2.6. Дутьевые и тяготутьевые устройства	109
2.7. Расчёт дымовой трубы на рассеивание в атмосфере загрязняющих веществ	121
2.8. Теплообменные аппараты	125
2.9. Питательные устройства	129
2.10. Определение величины продувки и расчет расширителя (сепаратора) непрерывной продувки	132
<b>Глава 3. Повышение экономичности котель- ных установок</b>	<b>135</b>
<b>Глава 4. Расчеты образования оксидов азота</b>	<b>144</b>
4.1. Образование термических оксидов азота	144
4.2. Концентрации топливных и быстрых оксидов азота	148
4.3. Особенности расчета оксидов азота при сжигании природного газа	150
<b>Глоссарий</b>	<b>157</b>
<b>Приложение</b>	<b>162</b>
<b>Литература</b>	<b>175</b>

## MUNDARIJA

<b>KIRISH</b>	<b>3</b>
<b>1-BOB. QATTIQ, SUYUQ VA GAZSIMON YOQILG'I</b>	<b>4</b>
1.1. Yoqilg'i tarkibi	4
1.2. Yoqilg'i xususiyatlari	10
1.3. Havo hajmi. yonish mahsulotlarining hajmi va massasi	18
1.4. Yonish va havo mahsulotlarining entalpiyasi	31
<b>2-bob. Qozonxonalar</b>	<b>38</b>
2.1. Issiqlik balansi, samaradorlik darajasi va qozonxonaning yonilg'i iste'moli.	38
2.2. Yonish qurilmalarining xususiyatlari	61
2.3. Yonish qurilmalarida issiqlik almashinuvini hisoblash	65
2.4. Qozonxonani isitishning konvektiv yuzalarini hisoblash	84
2.5. Kul kiyish va past haroratli korroziya	104
2.6. Dazmollash va tortish qurilmalari	109
2.7. Ifloslantiruvchi atmosferani tarqatish uchun oyoq trubasini hisoblash	121
2.8. Issiqlik almashinuvi apparatlari	125
2.9. Oziqlantiruvchi qurilmalar	129
2.10. Uzluksiz puflashning ekspander (separator) ni tozalash va hisoblash qiymatini aniqlash	132
<b>3-bob. Qozonxonalar samaradorligini oshirish</b>	<b>135</b>
<b>4-bob. Azot oksidi hosil bo'lishini hisoblash</b>	<b>144</b>
4.1. Issiqlik azot oksidi shakllanishi	144
4.2. Yoqilg'i va tez azot oksidi konsentratsiyasi	148
4.3. Tabiiy gaz yoqilganda azot oksidi hisoblash xususiyatlari	150
<b>Lug'at</b>	<b>157</b>
<b>Ilova</b>	<b>162</b>
<b>Adabiyot</b>	<b>175</b>

## TABLE OF CONTENTS



<b>INTRODUCTION</b>	<b>3</b>
<b>CHAPTER 1. SOLID, LIQUID AND GASEOUS FUELS</b>	<b>4</b>
1.1. Fuel composition	4
1.2. Fuel characteristics	10
1.3. The volume of air. volume and mass of combustion products	18
1.4. Enthalpy of combustion products and air	31
<b>Chapter 2. Boiler installations</b>	<b>38</b>
2.1. Heat balance, efficiency and fuel consumption of the boiler unit.	38
2.2. Characteristics of furnace devices	61
2.3. Calculation of heat transfer in furnace devices	65
2.4. Calculation of convective heating surfaces of the boiler unit	84
2.5. Ash wear and low-temperature corrosion	104
2.6. Blast and gravity devices	109
2.7. Calculation of the chimney on the dispersion of pollutants in the atmosphere	121
2.8. Heat exchangers	125
2.9. Feeding devices	129
2.10. Determination of the purge value and calculation of the continuous purge expander (separator)	132
<b>Chapter 3. Increasing the efficiency of boiler installations</b>	<b>135</b>
<b>Chapter 4. Calculations of the formation of nitrogen oxides</b>	<b>144</b>
4.1. Formation of thermal nitrogen oxides	144
4.2. Concentrations of fuel and fast nitrogen oxides	148
4.3. Features of calculation of nitrogen oxides during natural gas combustion	150
<b>GLOSSARY</b>	<b>157</b>
<b>Application</b>	<b>162</b>
<b>Literature</b>	<b>175</b>



**И.В. СОТНИКОВА**

**КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ**  
**СБОРНИК ЗАДАЧ И РЕШЕНИЕ ПРИМЕРОВ**

**Ташкент – «Fan va texnologiyalar nashriyot-matbaa uyi» – 2022**

Редактор: Ш.Кушербаева  
Тех. редактор: Ш.Миркасимова  
Дизайнер: У.Ортиков  
Компьютерная  
вёрстка: Н.Рахматуллаева



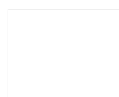
**E-mail: [tipografiyasnt@mail.ru](mailto:tipografiyasnt@mail.ru) Тел: 97-450-11-14, 93-381-22-07.**

**Разрешено в печать . .2022.**

**Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Гарнитура «Times New Roman».**

**Офсетная печать. Усл. печ.л. . Изд. печ.л. .**

**Тираж . Заказ № .**



**Отпечатано в типографии  
«Fan va texnologiyalar nashriyot-matbaa uyi»  
г. Ташкент, ул. Фозилтепа, 22 б.**

