

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

М. А. ТАЙМАРОВ

## ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ ПО КОТЕЛЬНЫМ УСТАНОВКАМ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ  
по дисциплине

«Котельные установки и парогенераторы»

3-е издание

Казань 2009

УДК 621.181

ББК 31.361

T14

*Рецензенты:*

доктор технических наук, профессор Казанского государственного технологического университета им. А.Н. Туполева *Б.Г. Мингазов*;  
доктор технических наук, профессор Казанского государственного архитектурно-строительного университета *Р.А. Садыков*

**Таймаров М. А.**

T14        Примеры и задачи по котельным установкам: Учеб. пособие / М.А. Таймаров. – 3-е изд. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2009. – 72 с.

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 направлению 140100 – «Теплоэнергетика» по специальностям 140104.65 – «Промышленная теплоэнергетика» и 140106.65 – «Энергообеспечение предприятий».

## ВВЕДЕНИЕ\*

Существующие в настоящее время учебники и учебные пособия по паровым котлам 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.

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке МОРФ. Грант № ТОО-1.2- 3226

# 1. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТОПЛИВ

## 1.1. Состав топлива

Элементарный состав твердых и жидких топлив записывается в виде суммы содержания в них углерода  $C$ , водорода  $H$ , кислорода  $O$ , серы  $S$ , азота  $N$ , золы  $A$  и влаги  $W$  (в процентах). В зависимости от того, какая масса топлива берется в расчет, каждому обозначению присваивается соответствующий надстрочный индекс:

– горючая масса

$$C^{\Gamma} + H^{\Gamma} + O^{\Gamma} + S^{\Gamma} + N^{\Gamma} = 100 \%;$$

– сухая масса

$$C^c + H^c + O^c + S^c + N^c + A^c = 100 \%;$$

– рабочая масса

$$C^p + H^p + O^p + S^p + N^p + A^p + W^p = 100 \%.$$

Пересчет элементарного состава одной массы топлива на другую производится при помощи коэффициентов, приведенных 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

При содержании карбонатов более 2 % коэффициент пересчета принимается с учетом разложения карбонатов. В этом случае за горючую массу принимают

$$\Gamma = (100 - W^p - A_{\text{испр}} - (CO_2)_k)/100, \quad (1.1)$$

где  $(CO_2)_k$  – содержание углекислоты карбонатов, %;  $A_{\text{испр}}$  – зольность топлива за вычетом сульфатов, образовавшихся при разложении карбонатов с поправкой на сгорание колчеданной серы:

$$A_{\text{испр}} = A^p - A_{\text{сульф}}(1 - W^p/100). \quad (1.2)$$

Поправку  $A_{\text{сульф}}$  принимают равной для эстонских и гдовских сланцев 2; кашпирских 4,1.

Пересчет элементного состава рабочей массы топлива с  $W_1^p$  на массу с зольностью  $W_2^p$  производится умножением исходных составляющих на множитель  $(100 - W_2^p) / (100 - W_1^p)$ .

Пересчет элементного состава рабочей массы топлива с зольностью  $A_1^p$  на массу с зольностью  $A_2^p$  производится умножением исходных составляющих на множитель  $(100 - A_2^p) / (100 - A_1^p)$ .

## ПРИМЕРЫ

**Пример 1.1.** При лабораторных исследованиях был получен следующий элементный состав кузнецкого угля марки СС на горючую массу:  $C^g = 84 \%$ ;  $H^g = 4,5 \%$ ;  $N^g = 2 \%$ ;  $O^g = 9 \%$ ;  $S^g = 0,5 \%$ . Влажность и зольность на рабочую массу равны  $W^p = 12 \%$  и  $A^p = 11,4 \%$ . Определить элементный состав на рабочую массу топлива.

**Решение.** Для пересчета с горючей массы на рабочую используем коэффициент пересчета

$$K = (100 - W^p - A^p) / 100 = (100 - 12 - 11,4) / 100 = 0,766.$$

Отсюда получаем:

$$C^p = C^g K = 84 \cdot 0,766 = 64,34 \%$$

$$H^p = H^g K = 4,5 \cdot 0,766 = 3,45 \%$$

$$N^p = N^g K = 2 \cdot 0,766 = 1,53 \%$$

$$O^p = O^g K = 9 \cdot 0,766 = 6,9 \%$$

$$S^p = S^g K = 0,5 \cdot 0,766 = 0,38 \%$$

Проверка: Суммарный элементный состав топлива на рабочую массу  $64,34 + 3,45 + 1,53 + 6,9 + 0,38 + 12 + 11,4 = 100 \%$ .

**Пример 1.2.** Задан следующий элементный состав на горючую массу кузнецкого угля марки СС пониженного качества:  $C^g = 80,2 \%$ ;  $H^g = 3,3 \%$ ;  $N^g = 2,1 \%$ ;  $O^g = 14 \%$ ;  $S^g = 0,4 \%$ . Известно, что зольность сухой массы  $A^c = 22,12 \%$ . Определить элементный состав топлива на рабочую массу при  $W^p = 15 \%$ .

**Решение.** В соответствии с табл. 1.1 коэффициент пересчета масс имеет вид  $(100 - W^p - A^p) / 100$ . Для его использования пересчитаем зольность с сухой массы на рабочую:

$$A^P = A^C(100 - W^P)/100 = 22,12(100 - 15)/100 = 18,8 \%$$

Отсюда получаем

$$K = (100 - W^P - A^P)/100 = (100 - 15 - 18,8)/100 = 0,662.$$

Определяем элементный состав на рабочую массу:

$$C^P = C^Г K = 80,2 \cdot 0,662 = 53,09 \%;$$

$$O^P = O^Г K = 14 \cdot 0,662 = 9,27 \%;$$

$$H^P = H^Г K = 3,3 \cdot 0,662 = 2,18 \%;$$

$$N^P = N^Г K = 2,1 \cdot 0,662 = 1,39 \%;$$

$$S^P = S^Г K = 0,4 \cdot 0,662 = 0,27 \%.$$

Проверяем полный элементный состав рабочей массы

$$53,09 + 2,18 + 9,27 + 1,39 + 0,27 + 18,8 + 15 = 100 \%$$

## ЗАДАЧИ

**Задача 1.1.** Сушка березовского угля с составом рабочей массы:  $W^P = 33 \%$ ;  $A^P = 4,7 \%$ ;  $S^P = 0,2 \%$ ;  $C^P = 44,3 \%$ ;  $H^P = 3 \%$ ;  $N^P = 0,4 \%$ ;  $O^P = 14,4 \%$  производится при разомкнутой схеме. Определить состав рабочей массы подсушенного до  $W^P = 10 \%$  топлива. (Пояснение. При разомкнутой схеме приготовления сушильные газы сбрасываются в атмосферу, а при замкнутой – в топку вместе с угольной пылью).

**Задача 1.2.** Содержание углерода в рабочей массе экибастузского угля составляет  $C^P = 43,4 \%$  при  $W^P = 7 \%$  и  $A^P = 38,1 \%$ . Определить содержание углерода в сухой массе при увеличении рабочей зольности топлива до  $A^P = 45 \%$ .

**Задача 1.3.** Определить состав горючей массы нерюнгринского угля, если известен состав рабочей массы:  $W^P = 9,5 \%$ ;  $A^P = 12,7 \%$ ;  $S^P = 0,2 \%$ ;  $C^P = 66,1 \%$ ;  $H^P = 3,3 \%$ ;  $N^P = 0,7 \%$ ;  $O^P = 7,5 \%$ .

**Задача 1.4.** Определить рабочий состав эстонских сланцев, если известен элементный состав горючей массы:  $S^Г = 5,25 \%$ ;  $C^Г = 72,13 \%$ ;  $H^Г = 10,16 \%$ ;  $N^Г = 0,33 \%$ ;  $O^Г = 12,13 \%$ . Рабочая масса имеет:  $W^P = 13 \%$ ;  $(CO_2)_K = 16,5 \%$ ;  $A^P = 40 \%$ . Коэффициент пересчета вычисляется по формуле (1.1).

## 1.2. Теплота сгорания топлива

Различают высшую  $Q_B$  и низшую  $Q_H$  теплоту сгорания топлива. Высшая теплота сгорания топлива  $Q_B$  определяется по величине теплоты сгорания в калориметрической бомбе  $Q_6$ , исправленной с учетом кислотообразования при сгорании, ккал/кг:

$$Q_B = Q_6 - 22,5S_6 - 0,0015Q_6,$$

где  $22,5S_6$  – теплота, выделяющаяся при окислении продуктов сгоревшей в бомбе серы  $S_6$ , %, от  $SO_2$  и растворении последней в воде;  $0,0015Q_6$  – теплота образования азотной кислоты в бомбе для каменных и бурых углей.

Высшая теплота отличается от низшей прибавкой теплоты, выделяемой при конденсации паров, входящих в состав дымовых газов. Все расчеты экономичности агрегата ведутся по низшей теплоте сгорания.

Низшая и высшая теплота сгорания, кДж/кг, связаны зависимостью

$$Q_H = Q_B - 25,1(9H + W). \quad (1.3)$$

Пересчет теплот сгорания топлива:

$$Q_H^p = Q_B^p - 25,1(9H^p + W^p); \quad (1.4)$$

$$Q_H^c = Q_B^c - 226 H^c; \quad (1.5)$$

$$Q_H^r = Q_B^r - 226 H^r; \quad (1.6)$$

$$Q_H^p = Q_H^c (100 - W^p)/100 - 25,1W^p; \quad (1.7)$$

$$Q_H^p = Q_H^r (100 - W^p - A^p)/100 - 25,1W^p. \quad (1.8)$$

Здесь верхние индексы «р», «с», «г» относятся к рабочей, сухой и горючей массам топлива.

При изменении влажности от  $W_1^p$  до  $W_2^p$  или зольности топлива от  $A_1^p$  до  $A_2^p$  для определения теплоты сгорания используются зависимости:

$$Q_{H2}^p = (Q_{H1}^p + 25,1 W_1^p)(100 - W_2^p)/(100 - W_1^p) - 25,1 W_2^p; \quad (1.9)$$

$$Q_{H2}^p = Q_{H1}^p (100 - A_2^p)/(100 - A_1^p). \quad (1.10)$$

При одновременном изменении влажности и зольности

$$Q_{H2}^p = (Q_{H1}^p + 25,1 W_1^p)(100 - W_2^p - A_2^p)/(100 - W_1^p - A_1^p) - 25,1 W_2^p \quad (1.11)$$

Для приближенных расчетов, а также для проверки элементного состава топлива низшую теплоту сгорания  $Q_H^p$ , кДж/кг, определяют по формуле Менделеева:

$$Q_H^p = 339C^p + 1030H^p - 109(O^p - S^p) - 25,1W^p; \quad (1.12)$$

$$Q_H^r = 339C^r + 1030H^r - 109(O^r - S^r). \quad (1.13)$$

Расхождение рассчитанной  $Q_H^r$  с величиной, полученной в калориметрической бомбе, не должно превышать  $\pm 628$  кДж/кг для топлив с зольностью менее 25 % и  $\pm 837$  кДж/кг – для других топлив.

Теплота сгорания газообразного топлива принимается по данным калориметрического анализа. При отсутствии таких данных теплота сгорания 1 м<sup>3</sup> газа при нормальных условиях подсчитывается по формуле

$$Q_H^c = 0,01[Q_{c.в}H_2S + Q_{o.y}CO + Q_{вод}H_2 + \Sigma(Q_{y.в}C_mH_n)], \quad (1.14)$$

где  $Q_{c.в}$ ,  $Q_{o.y}$  и т.д. – теплота сгорания отдельных составляющих, входящих в состав газообразного топлива, кДж/м<sup>3</sup>; последние должны приниматься по [4] либо по теплотехническим справочникам.

Вместо формулы (1.14), для определения теплоты сгорания 1 м<sup>3</sup> чистого сухого газа при нормальных условиях можно пользоваться следующим выражением, кДж/м<sup>3</sup> [5]:

$$Q_H^c = 126,4CO + 108,2H_2 + 358,5CH_4 + 592C_2H_4 + 638,5C_2H_6 + 859,8C_3H_8 + \\ + 913C_3H_9 + 1404C_6H_6 + 1134C_4H_8 + 1187C_4H_{10} + \\ + 1462 C_5H_{12} + 234,5H_2S.$$

При сжигании смеси двух твердых или жидких топлив, заданных массовыми долями ( $g_1$  – массовая доля одного из топлив в смеси), теплота сгорания 1 кг смеси подсчитывается по формуле

$$Q_H^p = Q_{H1}^p g_1 + Q_{H2}^p (1 - g_1). \quad (1.15)$$

Если же смесь задана в долях по тепловыделению каждого топлива ( $q_1$  – доля по тепловыделению одного из топлив), то для перехода к массовым долям используется зависимость

$$g_1 = q_1 Q_{H2}^p / [q_1 Q_{H2}^p + (1 - q_1) Q_{H1}^p]. \quad (1.16)$$

При сжигании смеси твердого или жидкого топлива с газообразным расчет ведется на 1 кг твердого или жидкого топлива с учетом количества газа  $x$  м<sup>3</sup>, приходящегося на 1 кг твердого или жидкого топлива:

$$Q_H^p = Q_{H1}^p + x Q_{H2}^p. \quad (1.17)$$

Если смесь задана в долях тепловыделения  $q_1$ , то количество газа, м<sup>3</sup>, приходящегося на 1 кг твердого или жидкого топлива, может быть найдено по зависимости

$$x = (1 - q_1) Q_{H1}^p / (q_1 Q_{H2}^p). \quad (1.18)$$



Жаропроизводительность топлива – это максимальная температура, развиваемая при полном сгорании топлива в теоретически необходимом объеме воздуха при температуре топлива и воздуха, равной 0 °С.

Условное топливо характеризуется низшей теплотой сгорания 7000 ккал/кг.

## ПРИМЕРЫ

**Пример 1.3.** Для кузнецкого угля (элементный состав см. в примере 1.1) определить  $Q_H^c$ ,  $Q_H^r$ ,  $Q_B^p$ , если низшая теплота сгорания рабочей массы равна  $Q_H^p = 23\,990$  кДж/кг.

**Решение.**

$$Q_B^p = Q_H^p + 25,1(W^p + 9H^p) = 23990 + 25,1(12 + 9 \cdot 3,45) = 25071 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_H^c = (Q_H^p + 25,1 W^p)100/(100 - W^p) - 226H^c = (23990 + 25,1 \cdot 12) - 226 \cdot 3,92 = 27604 - 886 = 26718 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_H^r = (Q_H^p + 25,1 W^p)100/(100 - W^p - A^p) - 226 H^r = (23990 + 25,1 \cdot 12)100/(100 - 12 - 11,4) - 226 \cdot 4,5 = 30695 \text{ кДж/кг}.$$

**Пример 1.4.** Насколько увеличивается высшая и низшая теплота сгорания рабочей массы угольной пыли назаровского угля ( $W^p = 39$  %,  $H^p = 2,6$  %) при переходе от замкнутой схемы сушки к разомкнутой с окончательной влажностью пыли  $W^{пл} = 10$  %. Исходная низшая теплота сгорания рабочей массы топлива равна  $Q_H^p = 13020$  кДж/кг.

**Решение.** Определяем низшую теплоту сгорания пыли:

$$Q_H^{пл} = (Q_H^p + 25,1 W^p)(100 - W^{пл})/(100 - W^p) - 25,1 W^{пл} = (13020 + 25,1 \cdot 39)(100 - 10)/(100 - 39) - 25,1 \cdot 10 = 20403 \text{ кДж/кг}.$$

Находим высшую теплоту сгорания исходного топлива и пыли:

$$Q_B^p = Q_H^p + 25,1(9H^p + W^p) = 13020 + 25,1(9 \cdot 2,6 + 39) = 14586 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_B^{пл} = Q_B^p (100 - W^{пл})/(100 - W^p) = 14586(100 - 10)/(100 - 39) = 21520 \text{ кДж/кг}.$$

**Пример 1.5.** Определить теплоту сгорания газообразного топлива, имеющего следующий состав: метан  $CH_4 = 94$  %; этан  $C_2H_6 = 2,8$  %; пропан  $C_3H_8 = 0,4$  %; бутан  $C_4H_{10} = 0,3$  %; пентан  $C_5H_{12} = 0,1$  %; азот  $N_2 = 2$  %; двуокись углерода  $CO_2 = 0,4$  %. Низшая теплота сгорания отдельных газовых составляющих имеет значения [2]: для метана  $35818$  кДж/м<sup>3</sup>; для этана

63248 кДж/м<sup>3</sup>; для пропана 91251 кДж/м<sup>3</sup>; для бутана 118646 кДж/м<sup>3</sup>; для пентана 146077 кДж/м<sup>3</sup>.

**Решение.** Определим теплоту сгорания газа по (1.14):

$$Q_H^c = 0,01 (0 + 0 + 0 + 35818 \cdot 94 + 63248 \cdot 2,8 + 91251 \cdot 0,4 + 118646 \cdot 0,3 + 146077 \cdot 0,1) = 36321 \text{ кДж/м}^3.$$

**Пример 1.6.** При работе на сниженных нагрузках в топке котла сжигается  $G_1 = 25$  т/ч твердого топлива с  $Q_{H1}^p = 20934$  кДж/кг и  $G_2 = 15 \cdot 10^3$  м<sup>3</sup>/ч газа с  $Q_{H2}^p = 40 \cdot 10^3$  кДж/кг. Определить условную теплоту сгорания смеси топлив  $Q_{H, \text{усл.}}^p$ .

**Решение.** При сжигании твердого или жидкого топлива в смеси с газообразным расчет ведется по условной теплоте сгорания, отнесенной к 1 кг твердого или жидкого топлива:

$$Q_{H, \text{усл.}}^p = Q_{H1}^p + x Q_{H2}^p,$$

где  $x$  – количество газа, м<sup>3</sup>, приходящегося на 1 кг твердого или жидкого топлива:

$$x = G_2 / G_1 = 15 \cdot 10^3 / 25 \cdot 10^3 = 0,6 \text{ м}^3.$$

$$\text{Тогда } Q_{H, \text{усл.}}^p = 20934 + 0,6 \cdot 40 \cdot 10^3 = 44934 \text{ кДж/кг.}$$

## ЗАДАЧИ

**Задача 1.5.** Проверить правильность определения элементного состава топлива, если известны данные лабораторных исследований:  $C^c = 62,17$  %;  $H^c = 4,1$  %;  $O^c = 5,17$  %;  $N^c = 1,29$  %;  $S^c = 3,27$ %, а также  $A^p = 22,1$  %;  $W^p = 7,9$  %;  $Q_H^p = 22776$  кДж/кг.

**Задача 1.6.** При открытом способе добычи экибастузского угля произошло увеличение его зольности с 38,1 до 48 % в рабочей массе и влажности с 7 до 11 %. Определить, насколько изменится низшая теплота сгорания угля, если ее исходное значение составляло при этом  $Q_H^p = 16747$  кДж/кг.

**Задача 1.7.** Определить теплоту сгорания смеси твердого топлива с низшей теплотой сгорания  $Q_{H1}^p = 13020$  кДж/кг и мазута с  $Q_{H2}^p = 38800$  кДж/кг при тепловой доле твердого топлива в смеси  $q_1 = 0,3$ .

**Задача 1.8.** На ТЭЦ сжигается доменный газ и мазут. Доля тепловыделения доменного газа  $q_2 = 0,6$ . Определить количество газа на 1 кг

мазута и теплоту сгорания смеси на 1 кг мазута. Мазут имеет  $Q_{н1}^P = 38870$  кДж/кг, а доменный газ  $Q_{н2}^P = 3710$  кДж/м<sup>3</sup>.

## 2. РАСЧЕТЫ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА

### 2.1. Теоретический расход воздуха

Для твердых и жидких топлив:

– объемный расход воздуха, м<sup>3</sup>/кг,

$$V^0 = 0,0889(C^P + 0,375S^P) + 0,265H^P - 0,0333O^P; \quad (2.1)$$

– массовый расход воздуха, кг/кг,

$$L^0 = 0,115(C^P + 0,375S^P) + 0,342H^P - 0,0431O^P. \quad (2.2)$$

При сжигании природного газа объемный расход, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>,

$$V^0 = 0,0476[\Sigma (m + n/4)C_mH_n + 0,5(CO + H_2) + 1,5H_2S - O_2] \quad (2.3)$$

Значения объема воздуха, м<sup>3</sup>, рассчитываются при нормальных условиях, т.е. при 0 °С и 760 мм рт. ст.

Для смеси двух однородных топлив (твердых, жидких или газообразных) объемы воздуха определяются по формуле

$$V^0 = g'V^{0'} + (1 - g')V^{0''}, \quad (2.4)$$

где  $g'$  – массовая доля первого топлива в смеси;  $V^{0'}$ ,  $V^{0''}$  – соответственно объемные расходы воздуха для первого и второго топлив.

Для смеси твердого или жидкого топлива с газообразным

$$V^0 = V^{0'} + xV^{0''}, \quad (2.5)$$

где  $x$  – количество газа на 1 кг твердого или жидкого топлива.

### ПРИМЕРЫ

**Пример 2.1.** Определить объемный и массовый расход воздуха для топлива, приведенного в примере 1.1.

**Решение.** Определяем теоретическое количество сухого воздуха, необходимого для полного сжигания топлива ( $\alpha = 1$ ) по (2.1) и (2.2). Находим

$$V^0 = 0,0889(64,34 + 0,375 \cdot 0,38) + 0,265 \cdot 3,45 - 0,0333 \cdot 6,9 = 6,42 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$L^0 = 0,115(64,34 + 0,375 \cdot 0,38) + 0,342 \cdot 3,45 - 0,0431 \cdot 6,9 = 8,3 \text{ кг/кг}.$$

**Пример 2.2.** Определить объемный расход воздуха для сжигания природного газа Бухарского месторождения, имеющего горючий состав: метан  $CH_4 = 94,9$  %; этан  $C_2H_6 = 3,2$  %; пропан  $C_3H_8 = 0,4$  %; бутан  $C_4H_{10} = 0,1$  %; пентан  $C_5H_{12} = 0,1$  %.

**Решение.** На основании состава топлива по (2.3) находим

$$V^0 = 0,0476[(1 + 4/4)94,9 + (2 + 6/4)3,2 + (3 + 8/4)0,4 + (4 + 10/4)0,1 + (5 + 12/4)0,1] = 9,73 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

**Пример 2.3.** Определить теоретически необходимое количество воздуха при сжигании смеси твердого и газообразного топлива (кузнецкого угля марки СС и бухарского природного газа), элементный состав которых приведен в примерах 1.1 и 2.2. Доля природного газа в общем тепловыделении  $q'' = 0,4$ , их низшие теплоты сгорания соответственно равны  $Q_{\text{H}}^{\text{P}'} = 27420 \text{ кДж/кг}$  и  $Q_{\text{H}}^{\text{P}''} = 36720 \text{ кДж/м}^3$ .

**Решение.** Для смеси твердого (или жидкого) и газообразного топлива теоретически необходимое для горения объемное количество воздуха определяется соотношением (2.4), а количество газа, приходящееся на 1 кг твердого топлива, находится по (1.18). Доля твердого топлива в тепловыделении смеси топлив

$$\begin{aligned} q' &= 1 - q'' = 1 - 0,4 = 0,6; \\ x &= (1 - 0,6)27420 / 0,6 \cdot 36720 = 0,498; \\ V^0 &= 6,417 + 0,498 \cdot 9,73 = 11,26 \text{ м}^3/\text{кг}. \end{aligned}$$

## ЗАДАЧИ

**Задача 2.1.** Определить, насколько изменится теоретически необходимый объем воздуха при переходе на сжигание сушонки ( $W^{\text{пл}} = 10 \%$ ). Исходное топливо – назаровский бурый уголь состава:  $W^{\text{P}} = 39 \%$ ;  $A^{\text{P}} = 7,3 \%$ ;  $S^{\text{P}} = 0,4 \%$ ;  $C^{\text{P}} = 37,6 \%$ ;  $H^{\text{P}} = 2,6 \%$ ;  $N^{\text{P}} = 0,4 \%$ ;  $O^{\text{P}} = 12,7 \%$ .

**Задача 2.2.** Определить, насколько изменится теоретически необходимый объем воздуха, если зольность угля марки АШ (состав:  $W^{\text{P}} = 8,5 \%$ ;  $A^{\text{P}} = 30,2 \%$ ;  $S^{\text{P}} = 1,6 \%$ ;  $C^{\text{P}} = 56,4 \%$ ;  $H^{\text{P}} = 3,6 \%$ ;  $N^{\text{P}} = 1,7 \%$ ;  $O^{\text{P}} = 5,9 \%$ ) увеличится до 35 %.

**Задача 2.3.** Определить, как изменится теоретически необходимый объем воздуха, если для условий примера 2.3 доля природного газа в общем тепловыделении увеличится до  $q'' = 0,6$ .

## 2.2. Состав и объем продуктов сгорания

При сжигании твердого и жидкого топлива образуются следующие объемы продуктов сгорания, м<sup>3</sup>/кг:

$$- \text{ для трехатомных газов: } V_{\text{RO}} = 0,01866 (C^{\text{P}} + 0,375S^{\text{P}}); \quad (2.6)$$

$$- \text{ для азота: } V_{\text{N}}^0 = 0,79V^0 + 0,008N^{\text{P}}; \quad (2.7)$$

- для паров воды:

$$V_{\text{HO}}^0 = 0,111H^{\text{P}} + 0,0124W^{\text{P}} + 0,0161V^0 + 1,24G_{\text{ф}}, \quad (2.8)$$

где  $G_{\text{ф}}$  – расход пара на распыл 1 кг мазута, кг/кг.

Объем дымовых газов (продуктов сгорания)

$$V_{\text{Г}}^0 = V_{\text{RO}} + V_{\text{N}}^0 + V_{\text{HO}}^0. \quad (2.9)$$

При сжигании сланцев объем трехатомных газов за счет карбонатной углекислоты составит

$$V_{\text{ROк}} = V_{\text{RO}} + 0,509(\text{CO}_2)_{\text{к}}/100, \quad (2.10)$$

где  $(\text{CO}_2)_{\text{к}}$  – двуокись углерода в карбонатах, %.

Тогда полный объем газов при  $\alpha = 1$

$$V_{\text{Г.к}}^0 = V_{\text{Г}}^0 + 0,509(\text{CO}_2)_{\text{к}}/100, \quad (2.11)$$

где  $V_{\text{Г}}^0$  определяется по (2.9).

При сжигании природного газа объем продуктов сгорания, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V_{\text{N}}^0 = 0,79 V^0 + 0,01N_2; \quad (2.12)$$

$$V_{\text{RO}} = 0,01(\Sigma m C_m H_n + \text{CO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{S}); \quad (2.13)$$

$$V_{\text{HO}}^0 = 0,01(\Sigma 0,5n C_m H_n + \text{H}_2\text{S} + \text{H}_2 + 0,124d_{\text{Г}} + 0,0161V^0).$$

где  $d_{\text{Г}}$  – влагосодержание газообразного топлива, которое в зависимости от температуры газа принимает значения:

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	0	10	20
$d_{\text{Г}}, \text{ г/м}^3$	5,0	10,1	19,4

Действительные объемы воздуха и продуктов сгорания, м<sup>3</sup>/кг, при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha$ :

$$V_{\text{В}} = \alpha V^0; \quad (2.14)$$

$$V_{\text{HO}} = V_{\text{HO}}^0 + 0,0161(\alpha - 1)V^0; \quad (2.15)$$

$$V_{\text{Г}} = V_{\text{Г}}^0 + 1,0161(\alpha - 1)V^0. \quad (2.16)$$

Масса продуктов сгорания, кг/кг, при сжигании твердого и жидкого топлива

$$G_{\Gamma} = 1 - A^P/100 + 1,306\alpha V^0. \quad (2.17)$$

Плотность продуктов сгорания при сжигании газообразного топлива, кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho_{\Gamma, \text{тл}}^c = 0,01[1,96\text{CO}_2 + 1,52\text{H}_2\text{S} + 1,25\text{N}_2 + 1,43\text{O}_2 + 1,25\text{CO} + 0,0899\text{H}_2 + \Sigma (0,536m + 0,045n)\text{C}_m\text{H}_n]; \quad (2.18)$$

$$G_{\Gamma} = \rho_{\Gamma, \text{тл}}^c + d_{\Gamma} \cdot 10^{-3} + 1,306 \alpha V^0. \quad (2.19)$$

Объемные доли трехатомных газов, водяного пара и безразмерная концентрация золы в продуктах сгорания:

$$R_{\text{RO}} = V_{\text{RO}}/V_{\Gamma}; \quad (2.20)$$

$$R_{\text{HO}} = V_{\text{HO}}/V_{\Gamma}; \quad (2.21)$$

$$\mu_{\text{зл}} = A^P \cdot a_{\text{ун}}/(G_{\Gamma} \cdot 100), \quad (2.22)$$

где  $a_{\text{ун}}$  – доля золы, уносимой продуктами сгорания. Для твердого шлакоудаления  $a_{\text{ун}} = 0,95$ .

Объем продуктов сгорания при рециркуляции газов, м<sup>3</sup>/кг,

$$V_{\Gamma, \text{рц}} = V_{\Gamma} + rV_{\Gamma, \text{отб}}, \quad (2.23)$$

где  $V_{\Gamma, \text{отб}}$  – объем продуктов сгорания в сечении за местом отбора;  $r$  – доля отбираемых газов на рециркуляцию.

Избытки воздуха в газовом тракте при известном значении избытка на выходе из топки  $\alpha_{\Gamma}$  составляют: в объеме топке в зоне горелок  $\alpha_{\text{гор}} = \alpha_{\Gamma} - \Delta\alpha_{\Gamma}$ ; в газоходе за топкой  $\alpha_i = \alpha_{\Gamma} + \Sigma\Delta\alpha_i$ , где  $\Delta\alpha_{\Gamma}$ ,  $\Delta\alpha_i$  – присосы воздуха в топке и в поверхностях за топкой. Относительный избыток горячего воздуха в горелке при сжигании твердого топлива составляет

$$\beta_{\text{гор}} = \alpha_{\text{гор}} - \Delta\alpha_{\text{пл}},$$

где  $\Delta\alpha_{\text{пл}}$  – присосы воздуха в пылеприготовительной установке.

Переход к объему газа при нормальных условиях  $V_{\text{н}}$  производится по формуле

$$V_{\text{н}} = VpT_{\text{н}}/Tp_{\text{н}},$$

где  $V$ ,  $p$ ,  $T$  – соответственно объем, давление и температура при заданных (рабочих) условиях;  $T_{\text{н}}$ ,  $p_{\text{н}}$  – температура 273 К и давление 1 кгс/см<sup>2</sup> для нормальных условий.

## ПРИМЕРЫ

**Пример 2.4.** Определить объемы продуктов сгорания для кузнецкого угля марки СС, приведенного в примере 1.1.

**Решение.** Определяем составляющие продуктов сгорания по (2.6)–(2.8):

$$V_{\text{RO}} = 0,01866 (64,34 + 0,375 \cdot 0,38) = 1,2 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{НО}}^0 = 0,111 \cdot 3,45 + 0,0124 \cdot 12 + 0,0161 \cdot 6,417 = 0,64 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{N}}^0 = 0,79 \cdot 6,417 + 0,008 \cdot 1,53 = 5,08 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Суммарный объем продуктов сгорания по (2.9)

$$V_{\Gamma}^0 = 1,2 + 0,64 + 5,08 = 6,92 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

**Пример 2.5.** Как изменится объем и объемные доли трехатомных продуктов сгорания и водяных паров при сжигании подмосковного бурого угля (состав:  $W^{\text{P}} = 32 \%$ ;  $A^{\text{P}} = 28,6 \%$ ;  $S^{\text{P}} = 2,7 \%$ ;  $C^{\text{P}} = 26 \%$ ;  $H^{\text{P}} = 2,1 \%$ ;  $N^{\text{P}} = 0,4 \%$ ;  $O^{\text{P}} = 8,2 \%$ ) при избытке воздуха  $\alpha = 1,2$ , если его влажность увеличилась до 40 %?

**Решение.** Коэффициент пересчета на новую рабочую влажность

$$K = (100 - W_2^{\text{P}}) / (100 - W_1^{\text{P}}) = (100 - 40) / (100 - 32) = 0,882.$$

Отсюда  $A_2^{\text{P}} = 28,6 \cdot 0,882 = 25,24 \%$ ;  $S_2^{\text{P}} = 2,7 \cdot 0,882 = 2,38 \%$ ;  
 $C_2^{\text{P}} = 26 \cdot 0,882 = 22,94 \%$ ;  $H_2^{\text{P}} = 2,1 \cdot 0,882 = 1,85 \%$ ;  $N_2^{\text{P}} = 0,4 \cdot 0,882 = 0,35 \%$ ;  
 $O_2^{\text{P}} = 8,2 \cdot 0,882 = 7,24 \%$ .

Проверка полученного элементного состава:

$$25,24 + 2,38 + 22,94 + 1,85 + 0,35 + 7,24 + 40 = 100 \%$$

Объемы воздуха и продуктов сгорания для исходного топлива находим по формулам 2.1–2.9:

$$V^0 = 2,68 \text{ м}^3/\text{кг}; V_{\text{RO}} = 0,5 \text{ м}^3/\text{кг}; V_{\text{N}}^0 = 2,12 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{НО}}^0 = 0,69 \text{ м}^3/\text{кг}; V_{\Gamma}^0 = 3,31 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

При избытке воздуха  $\alpha = 1,2$  объем газов в соответствии с (2.16)

$$V_{\Gamma} = 3,31 + 1,0161(1,2 - 1)2,68 = 3,85 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем водяного пара по (2.15):

$$V_{\text{НО}} = 0,69 + 0,0161(1,2 - 1)2,68 = 0,7 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Доли трехатомных газов и водяного пара в соответствии с (2.20) и (2.21):

$$R_{\text{RO}} = 0,5/3,85 = 0,13; R_{\text{НО}} = 0,7/3,85 = 0,182.$$

Определяем объемы воздуха и продуктов сгорания для угля с влажностью  $W_2^p = 40\%$ .

Теоретическое количество сухого воздуха находим по (2.1):

$$V_B^0 = 0,0889(22,94 + 0,375 \cdot 2,38) + 0,265 \cdot 1,85 - 0,0333 \cdot 7,24 = 2,37 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретические объемы продуктов сгорания для нового состава топлива рассчитываются по формулам (2.6)–(2.9):

$$V_{RO} = 0,01866 (22,94 + 0,375 \cdot 2,38) = 0,44 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{HO}^0 = 0,111 \cdot 1,85 + 0,0124 \cdot 40 + 0,0161 \cdot 2,37 = 0,74 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_N^0 = 0,79 \cdot 2,37 + 0,008 \cdot 0,35 = 1,88 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_\Gamma^0 = 0,44 + 0,74 + 1,88 = 3,06 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Находим объемы газов по (2.16) при избытке воздуха  $\alpha = 1,2$ :

$$V_\Gamma = 3,06 + 1,0161(1,2 - 1)2,37 = 3,54 \text{ м}^3/\text{кг}$$

и водяных паров по (2.15):

$$V_{HO} = 0,74 + 0,0161(1,2 - 1)2,37 = 0,75 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Определяем доли трехатомных газов и водяных паров:

$$R_{RO} = 0,44/3,54 = 0,124; R_{HO} = 0,75/3,54 = 0,212.$$

**Пример 2.6.** Определить коэффициент избытка воздуха в продуктах сгорания при сжигании экибастузского угля (состав:  $W^p = 6,5\%$ ;  $A^p = 36,9\%$ ;  $S^p = 0,7\%$ ;  $C^p = 44,8\%$ ;  $H^p = 3\%$ ;  $N^p = 0,8\%$ ;  $O^p = 7,3\%$ ), если известно, что содержание кислорода в газоходе равно  $3,5\%$ ; содержание трехатомных газов  $RO_2 = 14,17\%$ .

**Решение.** Избыток воздуха в газоходе при известной концентрации кислорода определяется по формуле

$$\alpha = 21/(21 - O_2),$$

где  $O_2$  – содержание кислорода в продуктах сгорания, %.

При известном содержании  $RO_2$  в газовом потоке значение  $\alpha$  находят по формуле

$$\alpha = RO_2^{\text{макс}}/RO_2,$$

где  $RO_2^{\text{макс}}$  – максимальное содержание трехатомных газов в продуктах сгорания топлива при  $\alpha = 1$ .

1. Определяем избыток воздуха по кислороду:

$$\alpha = 21/(21 - 3,5) = 1,2.$$

2. Определяем избыток воздуха по  $RO_2$ . Для экибастузского угля максимальное содержание трехатомных газов  $V_{RO} = 0,84 \text{ м}^3/\text{кг}$ , теоретический объем газов  $V_\Gamma^0 = 4,94 \text{ м}^3/\text{кг}$ .



В процентном отношении количество трехатомных газов

$$RO_2^{\text{макс}} = (V_{RO} / V_{\Gamma}^0) 100 = (0,84/4,94) 100 = 17 \%, \text{ тогда } \alpha = 17 / 14,17 = 1,2.$$

**Пример 2.7.** Для кузнецкого угля марки СС (состав  $C^P = 64,34 \%$ ;  $H^P = 3,45 \%$ ;  $N^P = 1,53 \%$ ;  $O^P = 6,9 \%$ ;  $S^P = 0,38 \%$ ;  $W^P = 12 \%$ ;  $A^P = 11,4 \%$ ) определить плотность продуктов сгорания при температуре  $\theta_{\Gamma} = 850 \text{ }^{\circ}\text{C}$  и избытке воздуха  $\alpha = 1,2$ , а также концентрацию золовых частиц  $\mu_{\text{зл}}$  при доле уноса  $a_{\text{ун}} = 0,95$ . Суммарный объем продуктов сгорания при нормальных условиях  $V_{\Gamma}^0 = 6,92 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Теоретическое количество сухого воздуха, необходимого для полного сжигания топлива ( $\alpha = 1$ )  $V^0 = 6,42 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

**Решение.** Для избытка воздуха  $\alpha = 1,2$  по (2.16)

$$V_{\Gamma} = 6,92 + 1,0161(1,2 - 1) 6,42 = 8,2, \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Масса продуктов сгорания на 1 кг топлива по (2.17)

$$G_{\Gamma} = 1 - 11,4/100 + 1,306 \cdot 1,2 \cdot 6,42 = 10,94 \text{ кг/кг}.$$

Плотность газов при нормальных условиях ( $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  и 760 мм рт. ст.)

$$\rho_{\Gamma}^0 = G_{\Gamma} / V_{\Gamma} = 10,94 / 8,2 = 1,33 \text{ кг/м}^3.$$

Плотность газов в реальных условиях

$$\rho_{\Gamma} = \rho_{\Gamma}^0 \cdot 273 / (\theta_{\Gamma} + 273) = 1,33 \cdot 273 / (850 + 273) = 0,324 \text{ кг/м}^3.$$

Расчетная концентрация золовых частиц в потоке газов составляет по (2.22)

$$\mu_{\text{зл}} = 11,4 \cdot 0,95 / 100 \cdot 10,94 = 9,89 \cdot 10^{-3} \text{ кг/кг}.$$

**Пример 2.8.** Определить размеры коробов уходящих газов после парового котла, сжигающего сернистый мазут (состав:  $S^P = 1,4 \%$ ;  $C^P = 83,8 \%$ ;  $H^P = 11,2 \%$ ;  $O^P = 0,5 \%$ ;  $W^P = 3,0 \%$ ;  $A^P = 0,1 \%$ ). Расход мазута  $B = 8,3 \text{ кг/с}$ , температура уходящих газов  $\theta_{\text{ух}} = 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$  при избытке воздуха  $\alpha = 1,18$ . Принять скорость уходящих газов  $w = 10 \text{ м/с}$ , соотношение сторон газохода 1:4, количество коробов 2.

**Решение.** 1. Определяем в соответствии с (2.16) объем продуктов сгорания на 1 кг топлива:

$$V_{\Gamma} = 11,27 + 1,0161(1,18 - 1) 10,45 = 13,18 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

2. Секундный расход уходящих газов:

$$V_{\text{с}} = V_{\Gamma} B (\theta_{\text{ух}} + 273) / 273 = 13,18 \cdot 8,3 (150 + 273) / 273 = 169,5 \text{ м}^3/\text{с}.$$

3. Необходимое сечение одного газохода

$$F = V_{\text{с}} / (2w) = 169,5 / 2 \cdot 10 = 8,475 \text{ м}^2.$$

4. Линейные размеры газохода в соответствии с соотношением сторон 1:4. Принимаем ширину газохода  $b = 4h$ . Тогда сечение газохода  $F = hb = 4h^2$ . При этом  $h = (F/4)^{0,5} = (8,475/4)^{0,5} = 1,45 \text{ м}$ ;  $b = 4 \cdot 1,45 = 5,8 \text{ м}$ .

## ЗАДАЧИ

**Задача 2.4.** Определить, насколько объем газов за пароперегревателем превосходит объем воздуха, поступающего через горелки в паровом котле с избытком воздуха за топочной камерой 1,2, присосами воздуха в ней 0,05, в пылесистеме 0,04 и присосами воздуха в пароперегревателе 0,03. Топливо – промпродукт каменных углей марки Г (состав  $S^P = 0,5 \%$ ;  $C^P = 51,4 \%$ ;  $H^P = 3,8 \%$ ;  $N^P = 1,9 \%$ ;  $O^P = 6,6 \%$ ;  $W^P = 12 \%$ ;  $A^P = 23,8 \%$ ).

**Задача 2.5.** Определить состав продуктов сгорания в уходящих газах ( $V_{RO}$ ,  $V_{\Gamma}^0$ ,  $V_{NO}$ ,  $V_{\Gamma}$ ) при сжигании донецкого угля марки Д (состав:  $S^P = 3,1 \%$ ;  $C^P = 47 \%$ ;  $H^P = 3,4 \%$ ;  $N^P = 1 \%$ ;  $O^P = 8 \%$ ;  $W^P = 13 \%$ ;  $A^P = 24,4 \%$ ) при  $\alpha = 1$  и избытке воздуха в уходящих газах  $\alpha_{yx} = 1,35$ .

**Задача 2.6.** Как изменится состав продуктов сгорания в уходящих газах (данные – см. задачу 2.5) при изменении  $W^P$  с 13 до 18 и 23 %?

**Задача 2.7.** Определить теоретические объемы воздуха и продуктов сгорания при разомкнутой схеме сушки назаровского бурого угля состава:  $W^P = 39 \%$ ;  $A^P = 7,3 \%$ ;  $S^P = 0,4 \%$ ;  $C^P = 37,6 \%$ ;  $H^P = 2,6 \%$ ;  $N^P = 0,4 \%$ ;  $O^P = 12,7 \%$ . Принять влажность пыли 15 %.

**Задача 2.8.** Определить необходимое сечение канала горячего воздуха при температуре 300 °С, избыточном давлении в газоходе 3000 Па для котла, сжигающего нерюнгринский уголь (состав:  $W^P = 10 \%$ ;  $A^P = 19,8 \%$ ;  $S^P = 0,2 \%$ ;  $C^P = 60 \%$ ;  $H^P = 3,1 \%$ ;  $N^P = 0,6 \%$ ;  $O^P = 6,3 \%$ ) в количестве 23,8 кг/с. При решении задачи принять скорость воздуха 15 м/с, количество газоходов 2, форма – круглая (1-й вариант) и прямоугольная с соотношением сторон 2:1 (2-й вариант); принять  $\alpha = 1,16$  и барометрическое давление 750 мм рт. ст. (99990 Па).

**Задача 2.9.** Определить объем воздуха для горения и объем продуктов сгорания в топке при сжигании эстонских сланцев (состав:  $W^P = 12 \%$ ;  $A^P = 44,4 \%$ ;  $S^P = 1,4 \%$ ;  $C^P = 19,9 \%$ ;  $H^P = 2,6 \%$ ;  $N^P = 0,1 \%$ ;  $O^P = 2,9 \%$ ). Избыток воздуха в топке принять  $\alpha = 1,3$ ; сжигание – камерное.

**Задача 2.10.** Как изменится объем и объемные доли трехатомных газов и водяных паров, если при сжигании челябинского бурого угля (состав:  $W^P = 17 \%$ ;  $A^P = 32,4 \%$ ;  $S^P = 0,9 \%$ ;  $C^P = 35,9 \%$ ;  $H^P = 2,6 \%$ ;  $N^P = 1 \%$ ;  $O^P = 10,2 \%$ ) избыток воздуха увеличить с 1,2 до 1,3?

**Задача 2.11.** Какая масса и какой объем кислорода (при плотности 1,429 кг/м<sup>3</sup>) потребуются для полного сжигания 1 кг углерода?

**Задача 2.12.** Какой объем  $\text{CO}_2$  (при плотности  $1,977 \text{ кг/м}^3$ ) образуется в результате полного сжигания  $1 \text{ кг}$  углерода?

**Задача 2.13.** Какой объем воздуха потребуется для полного сжигания  $1 \text{ кг}$  углерода?

**Задача 2.14.** Определить плотность и удельный объем метана при нормальных условиях, если киломолярный объем составляет  $22,4 \text{ м}^3$ .

**Задача 2.15.** Определить массу пропана в емкости объемом  $20 \text{ м}^3$ , если по показаниям манометра давление в ней составляет  $0,5 \text{ кг/см}^2$  и температура  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ , а атмосферное давление  $760 \text{ мм рт. ст.}$  Киломолярная газовая постоянная  $\mu R = 8314 \text{ Дж/(кмоль}\cdot\text{град)}$ .

**Задача 2.16.** Определить низшую теплоту сгорания  $Q_{\text{H}}^{\text{c}}$  природного газа (при нормальных условиях) следующего состава:  $\text{H}_2\text{S} = 1 \text{ } \%$ ;  $\text{CH}_4 = 76,7 \text{ } \%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6 = 4,5 \text{ } \%$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8 = 1,7 \text{ } \%$ ;  $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,8 \text{ } \%$ ;  $\text{C}_5\text{H}_{12} = 0,6 \text{ } \%$ .

**Задача 2.17.** Определить избыток воздуха в процентах, если по анализу продуктов горения в них содержится  $14,3\% \text{ CO}_2$ ,  $5,1\% \text{ O}_2$  и  $1,4\% \text{ CO}$ .

**Задача 2.18.** Определить количество воздуха (по массе и по объему), необходимое для сжигания мазута состава:  $\text{C} = 86 \text{ } \%$ ;  $\text{H}_2 = 11,5 \text{ } \%$ ;  $\text{O}_2 = 1,5 \text{ } \%$ ;  $\text{N}_2 = 1 \text{ } \%$ . Плотность воздуха при нормальных условиях  $1,293 \text{ кг/м}^3$ .

### 3. ПЕРЕСЧЕТЫ СОСТАВА И ЭНТАЛЬПИИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

Энтальпия теоретически необходимых объемов воздуха и продуктов сгорания,  $\text{кДж/кг}$ , при расчетной температуре  $\theta$ :

$$H_{\text{B}}^0 = V^0(c\theta)_{\text{B}}; \quad (3.1)$$

$$H_{\text{Г}}^0 = V_{\text{RO}}^0(c\theta)_{\text{RO}} + V_{\text{N}}^0(c\theta)_{\text{N}} + V_{\text{HO}}^0(c\theta)_{\text{HO}}$$

где  $(c\theta)_{\text{B}}$ ,  $(c\theta)_{\text{RO}}$ ,  $(c\theta)_{\text{N}}$ ,  $(c\theta)_{\text{HO}}$  – энтальпия  $1 \text{ м}^3$  влажного воздуха, диоксида углерода, азота, водяных паров при температуре  $\theta$ ,  $^\circ\text{C}$ ,  $\text{кДж/м}^3$ ; определяются по табл. 13 [4, с.179].

Энтальпия продуктов сгорания при избытке воздуха  $\alpha > 1$ :

$$H_{\text{Г}} = H_{\text{Г}}^0 + (\alpha - 1) H_{\text{B}}^0 + H_{\text{ЗЛ}}. \quad (3.3)$$

Здесь  $H_{\text{ЗЛ}}$  – энтальпия золы,  $\text{кДж/кг}$ :

$$H_{\text{ЗЛ}} = (c\theta)_{\text{ЗЛ}} A^{\text{P}} a_{\text{УН}} / 100,$$

где  $a_{\text{УН}}$  – доля золы топлива, уносимая продуктами сгорания;  $(c\theta)_{\text{ЗЛ}}$  – энтальпия  $1 \text{ кг}$  золы при температуре  $\theta$ ,  $\text{кДж/кг}$ , определяется по табл. 13 [4, с.179].

При величине уноса золы из топки  $a_{\text{ун}} < 1,4$  значением  $H_{\text{зл}}$  можно пренебречь.

Энтальпия газов при наличии рециркуляции

$$H_{\text{Г.рц}} = H_{\text{Г}} + rH_{\text{Г.отб}}, \quad (3.4)$$

где  $H_{\text{Г}}$  и  $rH_{\text{Г.отб}}$  – энтальпии газов основного потока и рециркулируемых газов, определенные при температурах в рассчитываемом сечении газохода.

## ПРИМЕРЫ

**Пример 3.1.** Определить энтальпии продуктов сгорания в точках смешения: в топке (при  $\theta = 1700$  °С,  $\alpha = 1,1$ ) и перед промежуточным перегревателем ( $\theta'_{\text{пп}} = 850$  °С,  $\alpha = 1,16$ ) при рециркуляции газов. Принять температуру в месте отбора газов на рециркуляцию  $\theta_{\text{отб}} = 390$  °С;  $\alpha_{\text{отб}} = 1,2$ ;  $r_{\text{рц}} = 0,15$ ; топливо – мазут. Энтальпии дымовых газов  $H_{\text{Г}}^0$  при сгорании мазута и воздуха  $H_{\text{В}}^0$  при  $\alpha = 1$ : для 1700 °С –  $H_{\text{Г}}^0 = 31522,5$  кДж/кг,  $H_{\text{В}}^0 = 26814$  кДж/кг; для 850 °С –  $H_{\text{Г}}^0 = 14595$  кДж/кг,  $H_{\text{В}}^0 = 12609,5$  кДж/кг; для 390 °С –  $H_{\text{Г}}^0 = 6303$  кДж/кг,  $H_{\text{В}}^0 = 5512,2$  кДж/кг.

**Решение.** По формуле (3.3) энтальпия газов при избытке воздуха  $\alpha > 1$  составит:

при  $\alpha = 1,1$  и  $\theta = 1700$  °С

$$H_{\text{Г}} = 31522,5 + (1,1 - 1)26814 = 34204 \text{ кДж/кг};$$

при  $\alpha = 1,16$  и  $\theta = 850$  °С

$$H_{\text{Г}} = 14595 + (1,16 - 1)12609,5 = 16613 \text{ кДж/кг};$$

при  $\alpha = 1,2$  и  $\theta = 390$  °С

$$H_{\text{Г}} = 6303 + (1,2 - 1)5512,2 = 7405 \text{ кДж/кг}.$$

Энтальпии газов в точках смешения находим по формуле (3.4):

в топке

$$H_{\text{Г.рц}} = 34204 + 0,15 \cdot 7405 = 35315 \text{ кДж/кг};$$

в газоходе перед промежуточным нагревателем

$$H_{\text{Г.рц}} = 16613 + 0,15 \cdot 7405 = 17724 \text{ кДж/кг}.$$

**Пример 3.2.** Элементный состав исходного топлива – экибастузского угля – следующий:  $W^{\text{P}} = 6,5$  %,  $A^{\text{P}} = 36,9$  %,  $S^{\text{P}} = 0,7$  %,  $C^{\text{P}} = 44,8$  %,  $H^{\text{P}} = 3$  %,  $N^{\text{P}} = 0,8$  %,  $O^{\text{P}} = 7,3$  %. Низшая теплота сгорания 17380 кДж/кг. Для исходного топлива теоретические энтальпии газов и воздуха при

$\theta = 1250$  °С и энтальпия золы по табл. 13 [4, с.179] равны:  $H_{\Gamma}^0 = 9888$  кДж/кг;  $H_{\text{в}}^0 = 8360$  кДж/кг;  $H_{\text{зл}} = 1283$  кДж/кг.

Насколько изменится энтальпия продуктов сгорания экибастузского угля на 1 кг топлива и в единицу времени при температуре 1250 °С,  $\alpha = 1,2$ , если влажность его увеличится с 6,5 до 14 %, а зольность с 36,9 до 45 % ?

При решении принять  $a_{\text{уН}} = 0,95$ , исходный расход топлива 25 кг/с. КПД котла снизится при увеличении влажности и зольности на 0,5 % (с 92 до 91,5 %), расход топлива обратно пропорционален изменению низшей теплоты сгорания.

**Решение.** Пересчет элементного состава на новую рабочую влажность  $W_2^{\text{р}} = 14$  % и новую рабочую зольность  $A^{\text{р}} = 45$  % производится с помощью множителя

$$K_2 = (100 - 14 - 45)/(100 - 6,5 - 36,9) = 0,724.$$

Новый элементный состав следующий:  $S_2^{\text{р}} = 0,5$  %,  $C_2^{\text{р}} = 32,45$  %,  $H_2^{\text{р}} = 2,15$  %,  $N_2^{\text{р}} = 0,6$  %,  $O_2^{\text{р}} = 5,3$  %,  $A_2^{\text{р}} = 45$  %,  $W_2^{\text{р}} = 14$  %.

Новая низшая теплота сгорания по формуле (1.9):

$$Q_{\text{Н}}^{\text{р}} = (17380 + 25,1 \cdot 6,5) \cdot 0,724 - 25,1 \cdot 14 = 12350 \text{ кДж/кг.}$$

1. При избытке воздуха  $\alpha = 1,2$  по формуле (3.3) энтальпия продуктов сгорания

$$H_{\Gamma} = 9888 + (1,2 - 1)8360 + 1283 \cdot 36,9 \cdot 0,95/100 = 12010 \text{ кДж/кг.}$$

2. Определяем энтальпию продуктов сгорания для экибастузского угля с влажностью 14 % и зольностью 45 %.

В соответствии с новым элементным составом по формуле (2.1, 2.6–2.8) определяем теоретические объемы воздуха и газов:

$$V^0 = 3,32 \text{ м}^3/\text{кг}; V_{\text{RO}} = 0,61 \text{ м}^3/\text{кг}; V_{\text{НО}}^0 = 0,47 \text{ м}^3/\text{кг}; V_{\text{N}}^0 = 2,63 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретические энтальпии газов и воздуха по формулам (3.1) и (3.2) при  $\theta = 1250$  °С:

$$H_{\text{в}}^0 = 1833,8 \cdot 3,32 = 6088 \text{ кДж/кг};$$

$$H_{\Gamma}^0 = 2846,7 \cdot 0,61 + 1774,95 \cdot 2,63 + 2238 \cdot 0,47 = 7456 \text{ кДж/кг.}$$

Значения  $(c\theta)_{\text{в}} = 1833,8$  кДж/м<sup>3</sup>,  $(c\theta)_{\text{СО}} = 2846,7$  кДж/м<sup>3</sup>,  $(c\theta)_{\text{N}} = 1774,95$  кДж/м<sup>3</sup>,  $(c\theta)_{\text{НО}} = 2238$  кДж/м<sup>3</sup> приняты по табл. 13 [4, с.179].

При избытке воздуха  $\alpha = 1,2$  энтальпия газов по формуле (3.3):

$$H_{\Gamma} = 7456 + (1,2 - 1)6088 + 1283 \cdot 0,47 \cdot 0,95/100 = 9222 \text{ кДж/кг.}$$

3. Определяем новый расход топлива при сохранении тепловой мощности котла:

$$B_2 = B_1 Q_{н1}^p \eta_{к1} / (Q_{н2}^p \eta_{к2}) = 25 \cdot 17380 \cdot 0,92 / (12350 \cdot 0,915) = 35,37 \text{ кг/с.}$$

Изменение энтальпии газов на 1 кг сожженного топлива

$$H_{Г1}/H_{Г2} = 12010/9222 = 1,3.$$

Изменение энтальпии потока газов в единицу времени

$$B_1 H_{Г1} / B_2 H_{Г2} = 25 \cdot 12010 / 35,37 \cdot 9222 = 0,92.$$

**Пример 3.3.** Назаровский бурый уголь сжигается в топке с твердым шлакоудалением при  $\alpha = 1,2$ ,  $\theta = 1200$  °С. Как изменится температура продуктов сгорания на выходе из топки, если в верхнюю часть топки введены газы рециркуляции? Коэффициент рециркуляции  $r = 0,15$ , температура газов рециркуляции  $\theta_{рц} = 390$  °С;  $\alpha_{отб} = 1,25$ .

Энтальпии газов и воздуха при температурах 1200 и 390 °С:

при  $\theta = 1200$  °С

$$H_{Г}^0 = 8546 \text{ кДж/кг}; H_{В}^0 = 6351 \text{ кДж/кг};$$

при  $\theta = 390$  °С

$$H_{Г}^0 = 2506 \text{ кДж/кг}; H_{В}^0 = 1910 \text{ кДж/кг}.$$

**Решение.** 1. Определяем энтальпию газов при  $\theta = 1200$  °С и 390° С по формуле (3.3):

при  $\theta = 1200$  °С и  $\alpha = 1,2$

$$H_{Г} = 9816 \text{ кДж/кг};$$

при  $\theta = 390$  °С и  $\alpha = 1,25$

$$H_{Г} = 2983 \text{ кДж/кг}.$$

2. Определяем энтальпию газов в точке смешения по формуле (3.4):

$$H_{Г,рц} = 9816 + 0,15 \cdot 2983 = 10263 \text{ кДж/кг}.$$

Избыток воздуха в газовом потоке после смешения

$$\alpha_{см} = \alpha_{Г} + (\alpha_{рц} - \alpha_{Г})r = 1,2 + (1,25 - 1,2)0,15 = 1,207.$$

3. Определяем температуру газов после ввода рециркуляции газов. Для этого находим энтальпию смеси при  $\alpha_{см} = 1,207$  в интервале температур 1200–1000 °С по формуле

$$H_{Г,см} = [H_{Г}^0 + (\alpha_{см} - 1) H_{В}^0](1 + r).$$

При 1200 °С

$$H_{Г,см} = [8546 + (1,207 - 1)6351](1 + 0,15) = 11343 \text{ кДж/кг};$$

при 1000 °С

$$H_{Г,см} = [6970 + (1,207 - 1)5206](1 + 0,15) = 9258 \text{ кДж/кг}.$$

Интерполируя, получаем температуру газов на выходе из топки после рециркуляции газов

$$\theta''_{\Gamma} = 1200 - (1200 - 1000)(11343 - 10263)/(11343 - 9258) = 1096,4 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Таким образом, температура газов за топкой снизилась на

$$\Delta\theta'' = 1200 - 1096,4 = 103,6 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

**Пример 3.4.** Насколько изменится энтальпия уходящих газов при сжигании природного газа Газли-Ташкент, если избыток воздуха за топочной камерой снизить с 1,1 до 1,05? Принять присосы воздуха в газовом тракте (от выхода из топки до выхода из воздухоподогревателя)  $\Delta\alpha_{\text{прс}} = 0,15$ , температуру уходящих газов  $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . По табл. 15 [4, с. 192] при  $\theta = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$  энтальпия воздуха и продуктов сгорания равна для данного топлива  $H_{\text{в}200}^0 = 2566 \text{ кДж/м}^3$ ,  $H_{\text{г}200}^0 = 3010 \text{ кДж/м}^3$ .

**Решение.** В соответствии с заданием, избыток воздуха в уходящих газах снизится с  $\alpha_{\text{ух}} = \alpha_{\text{т}} + \Delta\alpha_{\text{прс}} = 1,1 + 0,15 = 1,25$  до  $\alpha_{\text{ух}} = 1,2$ .

1. Определим энтальпию газов при  $\alpha = 1,25$  и температуре  $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$H_{\text{г}200} = H_{\text{г}200}^0 + (\alpha - 1) H_{\text{в}200}^0 = 3010 + (1,25 - 1)2566 = 3651,5 \text{ кДж/м}^3.$$

При температуре уходящих газов  $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$H_{\text{г}120} = H_{\text{г}200} \cdot 120/200 = 3651,5 \cdot 120/200 = 2190,9 \text{ кДж/м}^3.$$

2. Энтальпия газов при  $\alpha_{\text{ух}} = 1,2$  и температуре  $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$H_{\text{г}200} = 3010 + (1,2 - 1)2566 = 3523,2 \text{ кДж/м}^3.$$

При температуре уходящих газов  $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$H_{\text{г}120} = 3523,2 \cdot 120/200 = 2113,9 \text{ кДж/м}^3.$$

Таким образом, понижение избытка воздуха за топкой на  $\Delta\alpha = 0,05$  уменьшает энтальпию уходящих газов на  $77 \text{ кДж/м}^3$  (примерно на 3,5 %).

## ЗАДАЧИ

**Задача 3.1.** Определить энтальпию теоретически необходимого объема воздуха при сжигании 1 кг угля АШ и 1 кг назаровского бурого угля при температуре  $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Энтальпии газов и воздуха при температурах  $200$  и  $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (при  $0,1 \text{ МПа}$ ):

при  $\theta = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :

для угля АШ  $H_{\text{в}}^0 = 1412 \text{ кДж/кг}$ ; для бурого угля  $H_{\text{в}}^0 = 965 \text{ кДж/кг}$

при  $\theta = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :

для угля АШ  $H_{\text{в}}^0 = 2873 \text{ кДж/кг}$ ; для бурого угля  $H_{\text{в}}^0 = 1962 \text{ кДж/кг}$ .

**Задача 3.2.** Как изменится энтальпия продуктов сгорания уходящих газов при сжигании ангреноского угля (состав:  $W^P = 34,5 \%$ ;  $A^P = 14,4 \%$ ;  $S^P = 1,3 \%$ ;  $C^P = 39,1 \%$ ;  $H^P = 1,9 \%$ ;  $N^P = 0,2 \%$ ;  $O^P = 8,6 \%$ ), если его влажность увеличить с 34,5 до 45 %? Температуру уходящих газов принять  $160 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_{yx} = 1,4$ . Значением  $H_{3л}$  пренебречь.

Значения теплоемкостей при температуре уходящих газов:

При  $\theta = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ :  $(c\theta)_B = 132,4 \text{ кДж/м}^3$ ;  $(c\theta)_{RO} = 170 \text{ кДж/м}^3$ ;  
 $(c\theta)_N = 129,6 \text{ кДж/м}^3$ ;  $(c\theta)_{HO} = 150,5 \text{ кДж/м}^3$ .

При  $\theta = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ :  $(c\theta)_B = 266,4 \text{ кДж/м}^3$ ;  $(c\theta)_{RO} = 357,5 \text{ кДж/м}^3$ ;  
 $(c\theta)_N = 259,9 \text{ кДж/м}^3$ ;  $(c\theta)_{HO} = 304,5 \text{ кДж/м}^3$ .

#### 4. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПАРОВОГО КОТЛА

Тепловой баланс парового котла определяется равенством

$$Q_H^P + Q_{B.VHSH} + Q_{TL} + Q_{\Phi} - Q_K + Q_{X.B} = Q_{\text{ПОЛ}} + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + H_{YX}, \quad (4.1)$$

где  $Q_H^P$  – низшая теплота сгорания рабочей массы, кДж/кг;  $Q_{B.VHSH}$  – теплота воздуха, подогретого вне котла, кДж/кг,  $Q_{B.VHSH} = \beta'(H_B^{0'} - H_{X.B}^0)$ ;  $\beta'$  – отношение количества воздуха на входе в котел к теоретически необходимому;  $H_B^{0'}$ ,  $H_{X.B}^0$  – энтальпии теоретически необходимого объема воздуха при температурах воздуха на входе в котел и холодного воздуха, кДж/кг;  $Q_{TL}$  – физическая теплота топлива, кДж/кг, равная произведению его теплоемкости  $c_{TL}$  на температуру топлива  $t_{TL}$ ;  $Q_{\Phi}$  – теплота, вносимая в котел при сжигании мазута с паровым дутьем, кДж/кг,  $Q_{\Phi} = G_{\Phi}(h_{\Phi} - 2512)$ ;  $G_{\Phi}$  и  $h_{\Phi}$  – расход и энтальпия пара, идущего на распыл мазута в форсунках, кг/кг и кДж/кг;  $Q_K$  – теплота, затраченная на разложение карбонатов сланцев, кДж/кг,  $Q_K = 40,6(\text{CO}_2)$ ;  $Q_{X.B}$  – теплота холодного воздуха, соответствующая объему уходящих газов, кДж/кг,  $Q_{X.B} = \alpha_{yx} H_{X.B}^0$ ;  $\alpha_{yx}$  – избыток воздуха в уходящих газах;  $Q_{\text{ПОЛ}}$  – удельная теплота, полезно воспринятая рабочей средой в котле, кДж/кг;  $Q_3 - Q_6$  – потери теплоты соответственно с химическим и механическим недожогом, на наружное охлаждение и с теплотой шлака (зола), кДж/кг;  $H_{YX}$  – энтальпия уходящих газов, кДж/кг.

В тепловом балансе парового котла выделяют располагаемую теплоту поступающего в топку топлива, включая теплоту его сгорания со всеми сопутствующими дополнительными источниками теплоты:



$$Q_p^p = Q_H^p + Q_{в.внш} + Q_{тл} + Q_{ф} - Q_{к}. \quad (4.2)$$

При сжигании газа составляющие теплового баланса относятся к  $1 \text{ м}^3$  газового топлива.

Удельное полезное тепловосприятие котла, кДж/кг,

$$Q_{пол} = Q_{п.к} / B, \quad (4.3)$$

где  $B$  – расход топлива, кг/с;  $Q_{п.к}$  – теплота, воспринятая рабочей средой в паровом котле, кДж/с,

$$Q_{п.к} = D_{пе}(h_{пе} - h_{п.в}) + D_{пр}(h' - h_{п.в}) + D_{п.пс}(h''_{п.пе} - h'_{п.пе}) + D_{н.п}(h'' - h_{п.в}), \quad (4.3a)$$

где  $D_{пе}$  – паропроизводительность котла, кг/с;  $h_{пе}$ ,  $h_{п.в}$ ,  $h'$ ,  $h''$  – энтальпии соответственно перегретого пара, питательной и продувочной (кипящей) воды и насыщенного пара, кДж/кг;  $D_{п.пе}$  – расход пара через промежуточный перегреватель, кг/с;  $h'_{п.пе}$ ,  $h''_{п.пе}$  – энтальпия пара до и после промперегревателя, кДж/кг;  $D_{пр}$  – расход воды на продувку, кг/с;  $D_{н.п}$  – расход насыщенного пара, кг/с.

При наличии впрыска воды в промежуточный перегреватель для регулирования перегрева пара формула (4.3a) принимает вид

$$Q_{п.к} = (D_{п.пе} - D_{впр})(h''_{п.пе} - h'_{п.в}) + D_{впр}(h''_{п.пе} - h_{впр}) + D_{пе}(h_{пе} - h_{п.в}) + D_{пр}(h' - h_{п.в}), \quad (4.3б)$$

где  $D_{впр}$  и  $h_{впр}$  – расход воды на впрыск в промежуточный перегреватель, кг/с, и ее энтальпия, кДж/кг.

Потери с физической теплотой шлаков  $q_{6шл}$  :

$$q_{6шл} = a_{шл}(c\theta)_{шл} A^p / Q_p^p, \quad (4.3в)$$

где  $a_{шл} = 1 - a_{ун}$  – доля золы топлива в шлаке;  $a_{ун}$  – доля золы топлива, уносимая с продуктами сгорания и определяемая по табл. 17–19 [4, с. 200–201];  $(c\theta)_{шл}$  – энтальпия шлака, кДж/кг, принимаемая по табл. 13 [4, с. 179].

## ПРИМЕРЫ

**Пример 4.1.** Составить тепловой баланс барабанного парового котла производительностью 186,11 кг/с, имеющего следующие параметры пара (табл. 4.1). Топливо – высушенный березовский уголь:  $Q_H^{суш} = 21298$  кДж/кг и влажность  $W^{суш} = 13\%$ .

Значения параметров котла

Параметр	Значение
Температура перегретого пара	545 °С
Температура питательной воды	250 °С
Давление свежего пара на выходе	13,7 МПа
Давление питательной воды	16,2 МПа
Расход пара через промежуточный перегреватель	163,89 кг/с
Температура пара на входе в промежуточный перегреватель	333 °С
Давление пара после промежуточного перегревателя	2,44 МПа
Давление пара на входе в промежуточный перегреватель	2,66 МПа

При проведении расчетов принять: температуры воздуха перед котлом и после калориферов  $t_{x,v} = 30$  °С ( $H_{x,v} = 223,6$  кДж/кг) и  $t''_{кф} = 55$  °С ( $H''_{кф} = 409,9$  кДж/кг); избыток воздуха на входе в калориферы  $\beta' = 1,198$ ; температуру топлива после сушки 85 °С; температуру уходящих газов 120 °С ( $H_{yx} = 1256$  кДж/кг); температуру газов при отборе на сушку 386 °С ( $H_{отб} = 4001,3$  кДж/кг); долю отбора газов на сушку 0,34; долю уноса золы  $a_{ун} = 0,5$  при зольности  $A^p = 4,8$  %; температуру шлаков  $t_{шл} = 1430$  °С ( $c\theta_{шл} = 1637$  кДж/кг); избыток воздуха в уходящих газах 1,231; впрыск в промежуточный перегреватель отсутствует.

**Решение.** 1. Определяем удельное количество теплоты, воспринятой рабочей средой в котле. Энтальпия перегретого пара и питательной воды при заданных температурах и давлениях принимается по термодинамическим таблицам воды и водяного пара:  $h_{пе} = 3449,1$  кДж/кг;  $h_{п.в} = 1086,5$  кДж/кг.

Энтальпия пара до и после промежуточного перегревателя:

$$h'_{п.пе} = 3083,6 \text{ кДж/кг}; h''_{п.пе} = 3563 \text{ кДж/кг}. \text{ Тогда } Q_{п.к} = 186,11 (3449,1 - 1086,5) + 163,89 (3563 - 3083,6) = 518270 \text{ кДж/с}.$$

Продувка воды из барабана незначительна (менее 0,5 %), и ее теплотой можно пренебречь.

2. Определяем располагаемую теплоту топлива по формуле (4.2).

Дополнительные источники теплоты

$$Q_{в.внш} = 1,198(409,9 - 223,6) = 223,2 \text{ кДж/кг.}$$

Теплоемкость топлива находится по зависимости

$$c_{\text{тл}} = 4,1868 W^p/100 - c_{\text{тл}}^c (100 - W^p)/100,$$

где  $c_{\text{тл}}^c$  – теплоемкость сухого топлива, определяемая по табл. 3–1 [4, с.15]:

$$c_{\text{тл}} = 4,1868 \cdot 13/100 + 1,2309 (100 - 13)/100 = 1,615 \text{ кДж/(кг·К).}$$

В итоге

$$Q_p^p = 21298 + 223,2 + 1,615 \cdot 85 = 21658 \text{ кДж/кг.}$$

3. В соответствии с табл. 17–19 [4, с. 200–201] и опытом сжигания углей, определяем тепловые потери  $Q_3 - Q_5$ :  $q_3 = 0 \%$ ;  $q_4 = 0,3 \%$ ;  $q_5 = 0,3 \%$ . Тогда:  $Q_3 = 0$ ;  $Q_4 = Q_p^p q_4/100 = 21658 \cdot 0,3/100 = 65 \text{ кДж/кг}$ ;  $Q_5 = Q_p^p q_5/100 = 21658 \cdot 0,3/100 = 65 \text{ кДж/кг}$ .

4. Определяем потери теплоты с уходящими газами. Так как применяется разомкнутая схема сушки топлива, то эти потери складываются из теплоты газов, покидающих котел, и теплоты доли газов в месте отбора на сушку:

$$Q_2 = H_{\text{ух}}(1 - r_{\text{отб}}) + H_{\text{отб}} r_{\text{отб}};$$

$$Q_2 = 1256 (1 - 0,34) + 4001,3 \cdot 0,34 = 2189,4 \text{ кДж/кг.}$$

5. Потери теплоты с физической теплотой шлаков  $Q_{6\text{шл}}$ , определяемые с использованием формулы (4.3а):

$$Q_{6\text{шл}} = Q_p^p q_{6\text{шл}}/100 = a_{\text{шл}}(c\theta)_{\text{шл}} A^p/100 = (0,5 \cdot 1637 \cdot 4,8)/100 = 78,6 \text{ кДж/кг,}$$

где  $a_{\text{шл}} = 1 - a_{\text{ун}}$  – доля золы топлива в шлаке;  $a_{\text{ун}} = 0,5$  – доля золы топлива, уносимая с продуктами сгорания и определяемая по табл. 19 [4, с. 201];  $(c\theta)_{\text{шл}} = 1637$  – энтальпия шлака, кДж/кг, принимаемая по табл. 13 [4, с. 179].

6. Теплота холодного воздуха

$$Q_{х.в} = \alpha_{\text{ух}} H_{х.в}^0 = 1,231 \cdot 223,6 = 275 \text{ кДж/кг.}$$

Таким образом, в соответствии с равенством (4.1) тепловой баланс имеет вид

$$21658 + 275 = 518270/B + 0 + 65 + 65 + 78,6 + 2189,4.$$

7. Расход топлива  $B = 518270/(21933 - 2398) = 26,5 \text{ кг/с}$ .

**Пример 4.2.** Определить, насколько изменится располагаемая теплота жидкого топлива при увеличении предварительного подогрева воздуха в калорифере с 40 до 100 °С. Отношение количества воздуха на входе в котел к

теоретическому  $\beta' = 1,18$ ; энтальпия теоретически необходимого объема воздуха при  $100\text{ }^\circ\text{C}$   $H_{x.v}^{0'} = 1390\text{ кДж/кг}$ .

**Решение.** Из формулы (4.2) следует, что

$$Q_{p2}^p - Q_{p1}^p = Q_{в.внш.2} - Q_{в.внш.1} = \Delta Q_{в.внш}$$

В то же время

$$\Delta Q_{в.внш} = \beta'(H_{в2}^{0'} - H_{x.v}^0) - \beta'(H_{в1}^{0'} - H_{x.v}^0) = \beta'(H_{в2}^{0'} - H_{в1}^{0'}).$$

Энтальпия теоретически необходимого воздуха при  $40\text{ }^\circ\text{C}$  равна

$$H_{в1}^{0'} = 1390 \cdot 40/100 = 556\text{ кДж/кг}.$$

В соответствии с этим изменение располагаемой теплоты топлива составит

$$Q_{p2}^p - Q_{p1}^p = \beta'(H_{x.v}^{0'} - H_{в1}^{0'}) = 1,18(1390 - 556) = 984\text{ кДж/кг}.$$

**Пример 4.3.** Определить, насколько изменится располагаемая теплота мазута при увеличении его подогрева с  $t_{тл1} = 80\text{ }^\circ\text{C}$  до  $t_{тл2} = 150\text{ }^\circ\text{C}$ .

**Решение.** Аналогично примеру 4.2  $\Delta Q_p^p = Q_{тл2} - Q_{тл1}$ . Теплота поступающего в горелку мазута

$$Q_{тл} = c_{тл} t_{тл},$$

где теплоемкость мазута определяется по формуле  $c_{тл} = 1,737 + 0,00251t_{тл}$ .

Тогда  $\Delta Q_p^p = 1,737(150 - 80) + 0,00251(150^2 - 80^2) = 162,1\text{ кДж/кг}$ . При значении  $Q_n^p = 39 \cdot 10^3\text{ кДж/кг}$  доля  $\Delta Q_p^p$  составит 0,00415, или 0,415 %.

**Пример 4.4.** Определить, насколько изменится располагаемая теплота мазута при использовании для распыла мазута пара в количестве 0,15 кг пара на 1 кг мазута. Принять давление пара 1,6 МПа, температуру пара  $300\text{ }^\circ\text{C}$ .

**Решение.** Изменение располагаемой теплоты мазута

$$\Delta Q_p^p = Q_\phi = G_\phi(h_\phi - 2512).$$

При  $p = 1,6\text{ МПа}$  и  $t = 300\text{ }^\circ\text{C}$   $h_\phi = 3036\text{ кДж/кг}$ . При этом  $\Delta Q_p^p = 0,15(3036 - 2512) = 78,6\text{ кДж/кг}$ .

**Пример 4.5.** Определить, насколько изменится расход топлива на барабанном котле при включении продувки воды из барабана в количестве 2,5 % и сохранении полезной теплопроизводительности котла. Параметры пара и воды и их расходы принять по примеру 4.1.

**Решение.** При отсутствии продувки  $Q_\phi = Q_{п.к1}/B_1 = 518270 / 26,5 = 19557\text{ кДж/кг}$  при расходе топлива  $B_1 = 26,5\text{ кг/с}$ .

При наличии продувки потери теплоты с продуваемой водой равны  $Q_{пр} = D_{пр}(h' - h_{п.в})$ . При давлении в барабане 15,4 МПа  $h' = 1627,6\text{ кДж/кг}$ .

В соответствии с формулой (4.3а) при продувке 2,5 %

$$Q_{п.к2} = 186,11(3449,1 - 1086,5) + 163,89 (3563 - 3086,6) + \\ + 186,11 \cdot 2,5 (1627,6 - 1086,5)/100 = 520790 \text{ кДж/с.}$$

Расход топлива  $B_2 = 520790 / 19557,4 = 26,63 \text{ кг/с.}$

Увеличение расхода топлива  $\Delta B/B_2 = (26,63 - 26,5)/26,5 = 0,00486$ , или 0,486 %.

**Пример 4.6.** Определить располагаемую теплоту эстонских сланцев [4, табл. 1, с.152] при температуре топлива  $t_{ТЛ} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , холодного воздуха  $t_{х.в} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ , температуре предварительного подогрева воздуха  $t'_в = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ , отношении количества воздуха на входе в воздухоподогреватель к теоретически необходимому  $\beta' = 1,35$  и замкнутой сушке топлива. В соответствии с табл. 1 [4, с. 152. Топливо № 90] низшая теплота сгорания эстонских сланцев 9000 кДж/кг, энтальпии воздуха  $H_{х.в}^0 = 96,15 \text{ кДж/кг}$ ,  $H_{в}^0 = 160,25 \text{ кДж/кг}$ . Влажность  $W^p = 12 \text{ } \%$ .

**Решение.** 1. Определяем теплоту подогрева воздуха

$$Q_{в.внш} = \beta' (H_{в}^0 - H_{х.в}^0) = 1,35 (160,25 - 96,15) = 86,5 \text{ кДж/кг.}$$

2. Определяем физическую теплоту топлива. По табл. 3.1 [4, с. 15] для сухой массы топлива:

$$c_{ТЛ}^c = 1,0636 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C)};$$

для рабочей массы топлива:

$$c_{ТЛ} = 4,1868 W^p / 100 + c_{ТЛ}^c (100 - W^p) / 100 = 4,1868 \cdot 12 / 100 + \\ + 1,0636 (100 - 12) / 100 = 1,438 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C)};$$

$$Q_{ТЛ} = c_{ТЛ} t_{ТЛ} = 1,438 \cdot 20 = 28,8 \text{ кДж/кг.}$$

3. Определяем потери теплоты от разложения карбонатов. По табл. 1 [4, с. 152] для эстонских сланцев  $(CO_2)_к^p = 16,7 \text{ } \%$ . Тогда

$$Q_{к} = 40,6 (CO_2)_к^p = 40,6 \cdot 16,7 = 678 \text{ кДж/кг.}$$

4. Определяем  $Q_p^p$  по формуле (4.2):

$$Q_p^p = 9000 + 86,5 + 28,8 - 678 = 8437 \text{ кДж/кг.}$$

## ЗАДАЧИ

**Задача 4.1.** Определить располагаемую теплоту донецкого угля марки Г ( $Q_n^p = 18,88 \text{ МДж/кг}$ ) при температуре холодного воздуха  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , температуре предварительного подогрева воздуха  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Отношение

количества воздуха на входе в котел к теоретически необходимому  $\beta' = 1,35$ , сушка топлива – замкнутая, физической теплотой топлива пренебречь.

**Задача 4.2.** Насколько меняется  $Q_p^p$  бурого угля ( $Q_H^p = 13,44$  МДж/кг) при изменении температуры предварительного подогрева воздуха с 40 до 80 °С? При решении задачи принять  $\beta' = 1,22$ .

**Задача 4.3.** Определить тепловосприятие котла  $Q_{пол}$  при наличии отбора пара на собственные нужды. Расход пара на собственные нужды принять из промежуточного пароперегревателя в количестве 40 кг/с с параметрами  $t_{пе} = 450$  °С,  $p = 2,55$  МПа. Принять параметры и расходы свежего пара по примеру 4.1, при этом расход пара на входе в промежуточный перегреватель увеличить с 163,9 до 203,9 кг/с.

**Задача 4.4.** Определить располагаемую теплоту фрезерного торфа ( $Q_H^p = 8,12$  МДж/кг), а также энтальпию уходящих газов при изменении влажности  $W$  с 50 до 40 %. Принять: температуру холодного воздуха 30 °С, предварительного подогрева воздуха на входе в воздухоподогреватель 50 °С; отношение расхода воздуха на входе в воздухоподогреватель к теоретически необходимому  $\beta' = 1,25$ ; избыток воздуха за котлом  $\alpha_{ух} = 1,4$ ; температуру уходящих газов  $\theta_{ух} = 150$  °С; температуру топлива 20 °С.

## 5. ТЕПЛООБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ

Адиабатная температура горения определяется при избытке воздуха за топкой  $\alpha_T$  и энтальпии, равной полезному тепловыделению в топке. Полезное тепловыделение находится по зависимости

$$Q_T = Q_T^p (100 - q_3 - q_4 - q_{6шл}) / (100 - q_4) + Q_{в} + Q_{в.вн} + H_{г.отб}^0 r, \quad (5.1)$$

где  $Q_{в}$  – теплота, вносимая воздухом в топку,

$$Q_{в} = (\alpha_T - \Delta\alpha_T - \Delta\alpha_{пл}) H_{г.в}^0 + (\Delta\alpha_T + \Delta\alpha_{пл}) H_{х.в}^0, \quad (5.2)$$

где  $\Delta\alpha_T$  и  $\Delta\alpha_{пл}$  – присосы воздуха в топке и в пылесистеме;  $H_{г.в}^0$ ,

$H_{х.в}^0$  – энтальпия теоретически необходимого объема воздуха при температурах горячего и присосанного холодного воздуха, кДж/кг;

$Q_{в.вн}$  – теплота воздуха, подогретого вне парового котла, кДж/кг;

$H_{г.отб}^0 r$  – энтальпия и доля газов, отбираемых на рециркуляцию;

$q_3$ ,  $q_4$  – соответственно потери теплоты с химическим, механическим недожогом, %;  $q_{6шл}$  – потеря теплоты со шлаком, %.

Параметр распределения температур по высоте топки

$$M = A - BX_T, \quad (5.3)$$

где  $X_T$  – относительное положение максимума температур газов в топке.

Для однокамерных топок с горизонтальным расположением осей вихревых горелок и верхним выводом из топки продуктов сгорания  $X_T$  совпадает с относительным уровнем расположения горелок  $X_G$ .

Значение коэффициентов  $A$  и  $B$  в уравнении (5.3) определяется по табл. 5.1.

Таблица 5.1

Значение коэффициентов  $A$  и  $B$

Сжигаемое топливо, топочное устройство	Коэффициент	
	$A$	$B$
Газ и мазут	0,54	0,20
Высокореакционное твердое топливо в камерной топке и все твердые топлива в слоевой топке	0,59	0,50
Малореакционные твердые топлива, каменные угли с повышенной зольностью в камерной топке	0,56	0,50

При отклонении положения максимальной температуры от среднего уровня горелок

$$X_T = X_G + \Delta X, \quad (5.4)$$

где  $\Delta X$  – поправка относительного превышения максимума температур над уровнем горелок, определяемая по табл. 5.2.

В остальных случаях, не оговоренных в табл. 5.2,  $X_T = X_G$ .

Независимо от полученного значения  $M$  по формуле (5.3) параметр  $M$  в призматических топках не должен для твердых топлив превышать 0,5. Для полуоткрытых топок параметр  $M$  принимают равным 0,48 при сжигании газа, мазута и высокореакционных топлив и 0,46 при сжигании антрацита, полуантрацита и тощего угля.

В топках с подовым расположением горелок рекомендуется принимать  $M = 0,39 - 0,40$ .

Число Больцмана

$$B_0 = \varphi B_p V_{c_{cp}} \cdot 10^{11} / (5,67 \psi_{cp} F_{ст} T_a^3). \quad (5.5)$$

Таблица 5.2

Поправка  $\Delta X$  относительного превышения максимума температур  
над уровнем горелок

Условия сжигания топлива	Поправка $\Delta X$
Сжигание угольной пыли в прямоточных горелках (кроме горелок с плоскими струями) и в вихревых горелках (при двух и более ярусах, с фронтальным или встречным расположением) в котлах производительностью $D > 116,67$ кг/с (420 т/ч)	0,05
То же при производительности котла $D \leq 116,67$ кг/с (420 т/ч)	0,10
При сжигании мазута и газа в топках с $D \leq 9,72$ кг/с (35 т/ч)	0,15
При сжигании мазута и газа с избытками воздуха в горелках $\alpha_T < 1$	$2(1 - \alpha_T)$
Поворотные горелки с поворотом вниз	- 0,1 на поворот $20^\circ$
То же вверх	+ 0,1 на поворот $20^\circ$

Средняя теплоемкость продуктов сгорания  $V_{ср}$  1 кг топлива, кДж/(кг·К), при избытке воздуха за топкой и в интервале температур газов  $\theta_a - \theta_T''$  определяется по формуле

$$V_{ср} = (\theta_T - H_T'') / (\theta_a - \theta_T''). \quad (5.6)$$

При сжигании смеси твердого и жидкого топлива при определении числа Больцмана.  $B_0$  объем продуктов сгорания принимается на 1 кг смеси, а расход топлива равным суммарному расходу составляющих смеси топлив.

При сжигании природного газа в смеси с твердым или жидким топливом расчет ведется по расходу твердого (или жидкого) топлива и поэтому при определении числа Больцмана объем продуктов сгорания принимается по объему смеси, приходящемуся на 1 кг твердого или жидкого топлива ( $V_{см} = V_{Т.Т} + xV_{Г.Т}$ ), а  $B_p$  – по расходу твердого (или жидкого) топлива. Здесь индексы «Т.Т» – твердое топливо, «Г.Т» – газообразное топливо;  $x$  – количество кубических метров горючего газа, приходящегося на 1 кг твердого (или жидкого) топлива.



Относительная температура продуктов сгорания за топкой

$$\theta_T'' = T_T'' / T_a; \theta_T'' = B_0^{0,6} / (B_0^{0,6} + M \varepsilon_0^{0,6}). \quad (5.7)$$

Абсолютная температура продуктов сгорания за топкой

$$T_T'' = T_a / [1 + M(\varepsilon_T / B_0)^{0,6}]. \quad (5.8)$$

Поверхность стен топки, необходимая для охлаждения продуктов сгорания до заданной температуры на выходе из топки,

$$F_{CT} = B_p Q_L [(T_a / T_T'' - 1)^2 / M^2]^{0,33} / (5,67 \cdot 10^{-11} \varepsilon_T \psi_T M T_T'' T_a^3), \quad (5.9)$$

где  $Q_L$  – удельное тепловосприятие экранов топки по балансу, кДж/кг,

$$Q_L = (Q_T - H_T'') \varphi; \quad (5.10)$$

$\varphi$  – коэффициент сохранения теплоты, учитывающий долю теплоты газов, воспринятой поверхностью нагрева  $\varphi = 1 - q_5 / (\eta_5 + q_5)$ . Здесь  $q_5$  – потеря теплоты на наружное охлаждение, %.

## ПРИМЕРЫ

**Пример 5.1.** Определить адиабатную температуру горения кузнецкого угля марки СС. Условия сжигания топлива: топка с жидким шлакоудалением, температура горячего воздуха  $t_{г.вз} = 370$  °С,  $\Delta\alpha_T = 0$ ,  $\Delta\alpha_{пл} = 0$ ; котел работает под наддувом, рециркуляция газов – отсутствует, избыток воздуха за топкой  $\alpha_T = 1,15$ , доля золы топлива, уносимая с продуктами сгорания,  $a_{ун} = 0,5$ .

**Решение.** 1. Определяем энтальпию газов для ожидаемого диапазона адиабатной температуры продуктов сгорания (2200–2000 °С). Для этого используем теоретические энтальпии  $H_B^0$  и  $H_T^0$  для данного топлива. Они равны: при  $\theta_1 = 2200$  °С  $H_B^0 = 24865$  кДж/кг,  $H_T^0 = 28855$  кДж/кг;

при  $\theta_2 = 2000$  °С  $H_B^0 = 22408$  кДж/кг,  $H_T^0 = 25971$  кДж/кг.

При избытке  $\alpha_T = 1,15$  энтальпия газов равна:

при  $\theta_1 = 2200$  °С

$H_{г1} = H_T^0 + (\alpha_T - 1) H_B^0 = 28855 + (1,15 - 1)24865 = 32585$  кДж/кг; при  $\theta_2 = 2000$  °С  $H_{г2} = 25971 + (1,15 - 1)22408 = 29332$  кДж/кг.

Так как отсутствует предварительный подогрев воздуха  $Q_{в.вн} = 0$ , физической теплотой топлива пренебрегаем; тогда  $Q_p^p = Q_n^p = 27420$  кДж/кг.

2. Определяем потери теплоты  $q_3$  и  $q_4$  по табл.17–20 [4, с. 200–201]: с химическим недожогом  $q_3 = 0$ ; с механическим недожогом  $q_4 = 1$  %.

3. Потери с физической теплотой шлаков  $q_{6\text{шл}}$  :

$$q_{6\text{шл}} = a_{\text{шл}}(c\theta)_{\text{шл}}A^p / Q_p^p = 0,5 \cdot 2064,1 \cdot 14,1 / 27420 = 0,531 \%$$

Температура шлаков принята равной температуре нормального жидкого шлакоудаления  $t_{\text{н.ж}} = 1700$  °С. Эта температура обеспечивает устойчивое образование жидкого шлака на поде топки. При этом  $(c\theta)_{\text{шл}} = 2064$  кДж/кг.

4. Определяем теоретическую энтальпию горячего воздуха. По табл. 15 [4, с. 192] для данного топлива и соответствующей температуры значения энтальпии равны:

$$\text{при } t_{\text{Г.В1}} = 400 \text{ °С } H_{\text{Г.В1}} = 3960 \text{ кДж/кг};$$

$$\text{при } t_{\text{Г.В2}} = 200 \text{ °С } H_{\text{В2}} = 1947 \text{ кДж/кг}.$$

Для температуры  $t_{\text{Г.В3}} = 370$  °С:

$$H_{\text{В}} = (H_{\text{В1}} - (H_{\text{В1}} - H_{\text{В2}})(t_{\text{Г.В1}} - t_{\text{Г.В3}})) / (t_{\text{Г.В1}} - t_{\text{Г.В2}}) = \\ = (3960 - (3960 - 1947)(400 - 370)) / (400 - 200) = 3658 \text{ кДж/кг}.$$

5. Теплота, вносимая воздухом определяется по формуле (5.2):

$$Q_{\text{В}} = (1,15 - 0 - 0)3658 + 0 = 4207 \text{ кДж/кг}.$$

6. Определяем полезное тепловыделение в топке по формуле (5.1).

$$Q_{\text{Т}} = 27420(100 - 1 - 0 - 0,531) / (100 - 1) + 4207 - 0 + 0 = 31480 \text{ кДж/кг}.$$

Для  $Q_{\text{Т}} = 31480$  кДж/кг адиабатная температура

$$\theta_{\text{а}} = \theta_2 + (\theta_1 - \theta_2)(Q_{\text{Т}} - H_{\text{Г2}}) / (H_{\text{Г1}} - H_{\text{Г2}}) = 2000 + (2200 - 2000) (31480 - \\ - 29332) / (32585 - 29332) = 2132 \text{ °С}.$$

**Пример 5.2.** В соответствии с данными решения примера 5.1 найти изменение адиабатной температуры горения при повышении температуры горячего воздуха на 50 °С.

**Решение.** 1. Определяем теоретическую энтальпию горячего воздуха при температуре 420 °С. По табл. 15 [4, с. 192] для данного топлива при  $t_{\text{Г.В1}} = 400$  °С  $H_{\text{Г.В1}} = 3960$  кДж/кг, при  $t_{\text{Г.В2}} = 600$  °С  $H_{\text{Г.В2}} = 6065$  кДж/кг. При температуре  $t_{\text{Г.В3}} = 420$  °С:

$$H_{\text{В}}^0 = H_{\text{Г.В1}} + (H_{\text{Г.В2}} - H_{\text{Г.В1}}) (t_{\text{Г.В3}} - t_{\text{Г.В1}}) / (t_{\text{Г.В2}} - t_{\text{Г.В1}}) = 3960 + (6065 - \\ - 3960)(420 - 400) / (600 - 400) = 4170,5 \text{ кДж/кг}.$$

2. Тепло, вносимое с воздухом в топку определяем по формуле (5.2)

$$Q_{\text{В}} = 4170,5 (1,15 - 0 - 0) + 0 = 4796 \text{ кДж/кг};$$

3. Полезное тепловыделение в топке при температуре горячего воздуха 420 °С определяем по формуле (5.1):

$$Q_{\text{Т}} = 27420(100 - 1 - 0 - 0,531) / (100 - 1) + 4796 = 32069 \text{ кДж/кг}.$$

4. Определяем адиабатную температуру горения:

$$\theta_a = \theta_2 + (\theta_1 - \theta_2)(Q_T - H_{Г2}) / (H_{Г1} - H_{Г2}) = 2000 + (2200 - 2000)(32069 - 29332) / (32595 - 29332) = 2168 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Таким образом, увеличение температуры горячего воздуха на  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  повысило адиабатную температуру на  $2168 - 2132 = 36 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Существует приближенный способ определения разницы адиабатных температур:

– определяем изменение энтальпии продуктов сгорания в интервале температур  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  при ее изменении от  $2000$  до  $2200 \text{ }^\circ\text{C}$ . В соответствии с примером 5.2:

$$\Delta H_{Г} = H_{Г1} - H_{Г2} = 32585 - 29332 = 3253 \text{ кДж/кг};$$

– определяем изменение энтальпии горячего воздуха в интервале температур  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  при ее изменении от  $400$  до  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$\Delta H_{Г.В} = (H_{Г.В2} - H_{Г.В1}) (\alpha_T - \Delta\alpha_{ПЛ}) = (6065 - 3960)(1,15 - 0) = 2420 \text{ кДж/кг}.$$

Изменение адиабатной температуры продуктов сгорания

$$\theta_a = \Delta t_{Г.В} \Delta H_{Г.В} / \Delta H_{Г} = 50 \cdot 2420 / 3253 = 37 \text{ }^\circ\text{C}.$$

## ЗАДАЧИ

**Задача 5.1.** Определить, насколько повысится адиабатная температура горения при переходе от замкнутой схемы сушки при сжигании кузнецкого угля марки СС (см. пример 5.1) к разомкнутой схеме сушки дымовыми газами. Принять влажность пыли  $W^{пл} = 2 \%$ , при разомкнутой схеме – подачу пыли в горелки воздухом от компрессора, долю транспортирующего воздуха  $\Delta\alpha_{Г.В} = 0,012$ , температуру транспортирующего воздуха  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , температуру пыли после пылевого бункера  $85 \text{ }^\circ\text{C}$ . Рециркуляция газов отсутствует, шлакоудаление – жидкое, доля уноса золы  $0,5$ .

**Задача 5.2.** Определить изменение адиабатной температуры при введении рециркуляции газов в ядро горения в количестве  $5\text{--}20 \%$  с интервалом  $5 \%$ , Топливо – березовский бурый уголь, характеристики которого приведены в табл. 1 (топливо № 51) [4, с. 160].

Размол топлива – в индивидуальной замкнутой схеме пылеприготовления с мелющими вентиляторами, забор газов на рециркуляцию за воздухоподогревателем при  $\theta_{yx} = 130 \text{ }^\circ\text{C}$  и избытке воздуха  $\alpha = 1,26$ .

При этом следует принять: температуру горячего воздуха  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ ; отбор газов на сушку  $r_{отб} = 0,2$ ; температуру газов в отборе на сушку  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  при  $\alpha_{суш} = \alpha_T$ ; избыток воздуха в топке  $\alpha_T = 1,2$ ; присос в топке  $\Delta\alpha_T = 0$ ; присосы воздуха в пылесистеме  $\Delta\alpha_{ПЛ} = 0,2$ ; предварительный подогрев воздуха в калориферах отсутствует, физической теплотой топлива пренебречь.

## 6. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОСПРИЯТИЯ РАДИАЦИОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ТОПКЕ

Теплота, воспринятая радиационными поверхностями нагрева в топке, определяется либо на основе позонного расчета топки, либо на основе теплового расчета топочной камеры в целом по методу ЦКТИ.

При использовании результатов позонного расчета для определения тепловосприятия радиационной поверхности  $Q_{р.п}$ , кДж/кг, используется формула

$$Q_{р.п} = q_{л} F_{л.р.п} / B_{р}, \quad (6.1)$$

где  $q_{л}$  – удельный воспринятый тепловой поток, кВт/м<sup>2</sup>;  $F_{л.р.п}$  – площадь лучевоспринимающей рабочей поверхности нагрева, м<sup>2</sup>;  $B_{р}$  – расход топлива в котле, кг/с.

Если радиационная поверхность нагрева располагается не в одной, а в нескольких зонах, то формула (6.1) принимает вид

$$Q_{р.п} = q'_{л} F'_{л.р.п} / B_{р} + q''_{л} F''_{л.р.п} / B_{р}, \quad (6.2)$$

где индексы ' и '' относятся к зонам, в которых находится радиационная поверхность.

Удельный воспринятый тепловой поток  $q_{л}$ , кВт/м<sup>2</sup>, определяется для зоны с учетом коэффициента тепловой эффективности радиационной поверхности в зоне  $\psi$ , коэффициента излучения газовой среды в зоне  $\varepsilon$  и средней температуры газов в зоне  $T_{ср}$ , К, по формуле

$$q_{л} = 5,67 \cdot 10^{-11} \psi \varepsilon F'_{л.р.п} T_{ср}^4. \quad (6.3)$$

Если известно тепловосприятие зоны  $Q_{з}$ , кДж/кг, то тепловое восприятие отдельной радиационной поверхности нагрева в пределах зоны можно найти из выражения

$$Q_{р.п} = Q_{з} \eta_{ст} F_{р.п} \psi_{р.п} / \Sigma F_{р.п} \psi, \quad (6.4)$$

где  $\eta_{ст}$  – коэффициент распределения тепловосприятия между стенами топки по ее периметру: при однофронтном размещении горелок для задней стены топки  $\eta_{ст.з} = 1,1$ , для фронтной  $\eta_{ст.ф} = 0,9$ ; для боковых стен и в других случаях размещения горелок  $\eta_{ст} = 1$ .

При использовании данных общего теплового расчета топки в целом известными тепловыми характеристиками являются средний воспринятый тепловой поток  $q_{л}$ , кВт/м<sup>2</sup>, и удельное тепловосприятие экранов топки  $Q_{л}$ , кДж/кг, топлива.

Тогда для интересующей нас радиационной поверхности нагрева ее удельное тепловосприятие можно получить из выражения

$$Q_{p.п} = Q_3 \eta_B \eta_{ст} F_{p.п} \Psi_{p.п} / \Sigma F_{ст} \Psi_{ср}, \quad (6.5)$$

где  $\eta_B$  – коэффициент неравномерности тепловосприятия по высоте топки (рис. 6.1);  $F_{ст}$  – поверхность стен топки в целом, м<sup>2</sup>.

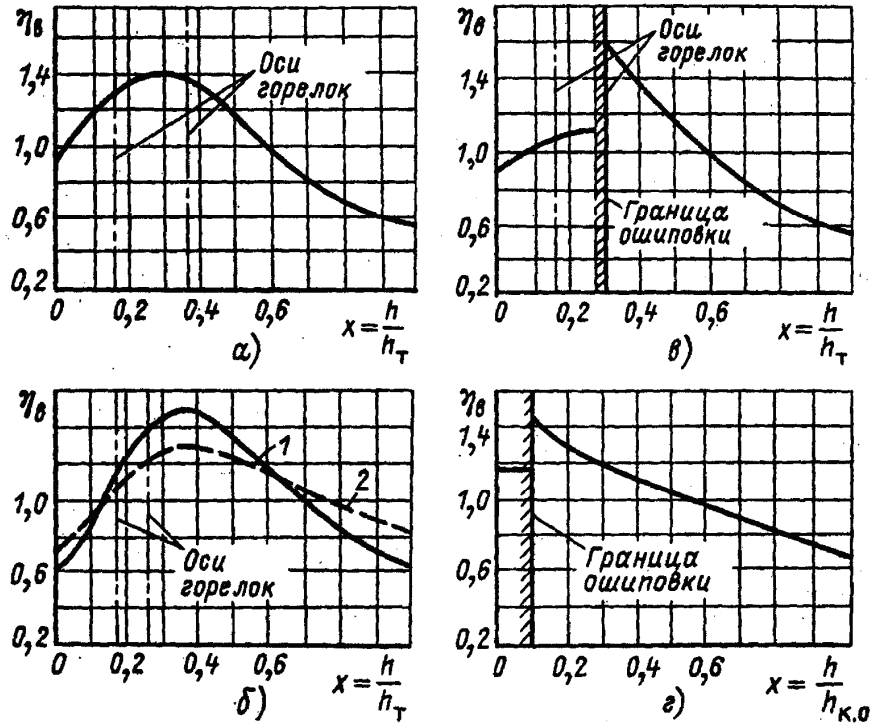


Рис. 6.1. Коэффициент распределения тепловосприятия по высоте топки: а – газомазутные топки; б – пылеугольные топки (твердое шлакоудаление); 1 – антрацит, тощие и каменные угли, сухой бурый уголь; 2 – бурые угли, фрезерный торф; в – пылеугольные топки (жидкое шлакоудаление); г – камеры охлаждения двухкамерных топок

При выполнении расчета для всех отдельных радиационных поверхностей топки должно соблюдаться условие  $\Sigma Q_{p.п} = Q_{л.}$

## ПРИМЕРЫ

**Пример 6.1.** В топке котла Е – 500 – 13,8 ГМ ( $p = 13,8$  МПа,  $t_{III} = 560$  °С) имеется радиационный пароперегреватель (РПП), выполненный из шести горизонтальных U – образных панелей по одной на боковых стенах ( $n_б = 2$ ) при ширине топки  $b_T = 7,68$  м и по две на фронтальной и задней стенах ( $n_ф = 2, n_з = 2$ ) при высоте топки  $a_T = 13,52$  м, расположенных сверху испарительных вертикальных экранов. Каждая из панелей состоит из 30 труб

( $n_{\text{тр}} = 30$ ) с наружным диаметром  $d_{\text{тр}} = 36$  мм, толщиной стенки 5 мм и с шагом  $s = 40$  мм. Ширина поверхности панели, занятая трубами,  $l_{\text{тр}} = d_{\text{тр}} \cdot n_{\text{тр}} = 0,036 \cdot 30 = 1,08$  м.

Ширина ленты одной панели  $b_{\text{л}} = 1,16$  м. Интенсивность теплового потока в этой зоне  $q_{\text{л}} = 157,6$  кВт/м<sup>2</sup>. Нижняя отметка расположения панелей от пода топки 11,5 м.

Определить, насколько увеличится тепловосприятие радиационного пароперегревателя, если его сместить вниз на 4 м в зону с тепловым потоком  $q'_{\text{л}} = 235,7$  кВт/м<sup>2</sup>.

Удельный расход топлива принять  $B_{\text{р}} = 9,25$  кг/с.

**Решение.** 1. Определяем лучистую поверхность радиационного пароперегревателя:

$$F_{\text{л.р.п.}} = b_{\text{л}} \cdot n_{\text{б}} \cdot b_{\text{т}} \cdot l_{\text{тр}} + b_{\text{л}} \cdot n_{\text{ф}} \cdot a_{\text{т}} \cdot F_{\text{тр}} \cdot n_{\text{з}} = \\ = 1,16 \cdot 2 \cdot 13,52 \cdot 1,08 + 1,16 \cdot 2 \cdot 13,52 \cdot 1,08 \cdot 2 = 101,6 \text{ м}^2.$$

2. Определяем лучистое тепловосприятие радиационного пароперегревателя в исходном варианте:

$$Q'_{\text{р.п.}} = q_{\text{л}} \cdot F_{\text{п.р.л}} / B_{\text{р}} = 157,6 / 101,6 / 9,25 = 1731 \text{ кДж/кг.}$$

3. При смещении радиационного пароперегревателя вниз на 4 м

$$Q''_{\text{р.п.}} = q'_{\text{л}} \cdot F_{\text{п.р.л}} / B_{\text{р}} = 235,7 \cdot 101,6 / 9,25 = 2588,9 \text{ кДж/кг.}$$

Таким образом, со смещением радиационного пароперегревателя вниз на 4 м его тепловосприятие возрастает на 857,9 кДж/кг.

**Пример 6.2.** Как изменится тепловосприятие радиационного перегревателя, приведенного в примере 6.1, при сжигании природного газа вместо мазута.

Из аналогичного позонного теплового расчета котла на природном газе получено: температура газов на входе в зону 1371, на выходе из нее 1238 °С, коэффициент излучения топочной среды  $\varepsilon_{\text{т}} = 0,76$ , удельный расход топлива  $B_{\text{р}} = 9,764$  м<sup>3</sup>/с.

Коэффициент тепловой эффективности радиационной поверхности в зоне  $\psi = 0,65$ .

**Решение.** 1. Определяем среднюю температуру в зоне

$$T_{\text{ср}} = 0,5(\theta' + \theta'') + 273 = 0,5(1371 + 1238) + 273 = 1577,5 \text{ К;}$$

2. Определяем средний лучистый поток в зоне по формуле (6.3):

$$q_{\text{л.з}} = 5,67 \cdot 10^{-11} \cdot \psi \cdot \varepsilon_{\text{т}} \cdot T_{\text{ср}}^4 = 5,67 \cdot 10^{-11} \cdot 0,65 \cdot 0,76 \cdot 1577,5^4 = 174,1 \text{ кВт/м}^2.$$

3. Определяем тепловосприятие радиационного пароперегревателя при сжигании природного газа

$$Q_{\text{р.п.}} = q_{\text{л.з}} \cdot F_{\text{п.р.л}} / B_{\text{р}} = 174,1 \cdot 101,6 / 9,764 = 1811,6 \text{ кДж/м}^3.$$

В связи с разной теплотой сгорания топлив (мазута и природного газа) сопоставим полное тепловосприятие радиационного пароперегревателя  $Q_{р.п}^п$ , кДж/с, в единицу времени из соотношения  $Q_{р.п}^п = Q_{р.п} B_p$ : при сжигании мазута  $Q_{р.п}^п = 1731 \cdot 9,25 = 16011,8$  кДж/с; при сжигании газа  $Q_{р.п}^п = 1811,6 \cdot 9,764 = 17688,5$  кДж/с.

Таким образом, при сжигании природного газа тепловосприятие радиационного пароперегревателя будет больше, что в основном объясняется повышенным коэффициентом тепловой эффективности экранов.

**Пример 6.3.** В последней зоне топочной камеры с размерами:  $V_T = 34760 \text{ м}^3$ ,  $F_{ст} = 7092 \text{ м}^2$ ,  $h_T = 61,9 \text{ м}$ ,  $b_T = 18 \text{ м}$ ,  $a_T = 31,96 \text{ м}$  расположены 12 топочных ширм ( $n = 12$ ) высотой  $h_{ш} = 8$  и шириной  $b_{ш} = 3,8 \text{ м}$ .

Определить тепловосприятие ширм, если омывание их продуктами сгорания продольное, температура газов на входе в ширмы 1152 и на выходе из нее 1048 °С.

Экраны в зоне топочных ширм и сами ширмы выполнены цельносварными (рис. 6.2) из труб диаметром  $d_{тр} = 32 \text{ мм}$  с шагом  $S = 48 \text{ мм}$ . Коэффициент теплоотдачи конвекцией в зоне ширм топочной камеры  $\alpha_k = 7,15 \cdot 10^{-3} \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; коэффициенты излучения  $\varepsilon = 0,811$  и тепловой эффективности  $\psi = 0,4$ . Удельный расход топлива  $B_p = 126,6 \text{ кг/с}$ .

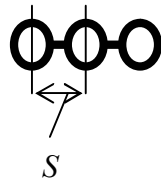


Рис. 6.2. Схема цельносварных экранов

**Решение.** 1. Определяем среднюю температуру теплового потока в ширмах

$$T_{ср} = 0,5(T_{вх} + T_{вых}) + 273 = 0,5(1152 + 1048) + 273 = 1373 \text{ К}.$$

2. Тепловой поток в топочных ширмах за счет радиации:

$$q_{л} = 5,67 \cdot 10^{-11} \cdot \psi \cdot \varepsilon \cdot T_{ср}^4 = 5,67 \cdot 10^{-11} \cdot 0,4 \cdot 0,811 \cdot 1373^4 = 65,71 \text{ кВт}/\text{м}^2.$$

3. Поверхность лучистого теплообмена ширм

$$F_{л.т.ш.} = b_{ш} \cdot h_{ш} \cdot 2 \cdot n = 3,8 \cdot 8 \cdot 2 \cdot 12 = 729,6 \text{ м}^2.$$

4. Определяем тепловосприятие топочных ширм за счет радиации:

$$Q_{л.т.ш.} = \frac{q_{л} \cdot F_{л.т.ш.}}{B_p} = \frac{65,71 \cdot 729,6}{126,6} = 378,5 \text{ кДж/кг}.$$

5. Определяем тепловосприятие топочных ширм конвекцией. Для условий расчета средняя температура газов  $\theta_{\text{ср}} = 1100$  °С, температуру пара в ширмах принимаем  $t_{\text{ср}} = 400$  °С.

Площадь поверхности конвективного теплообмена

$$F_{\text{к}} = [\pi d_{\text{тр}} + (S - d_{\text{тр}})2]h_{\text{ш}}(b_{\text{ш}}/S + 1)n = [3,14 \cdot 0,032 + (0,048 - 0,032)2]8(3,8/0,048 + 1)12 = 1017,8 \text{ м}^2.$$

Конвективный тепловой поток в топочных ширмах

$$Q_{\text{к.т.ш}} = \alpha_{\text{к}}(\theta_{\text{ср}} - t_{\text{ср}})(F_{\text{к}} - F_{\text{л.т.ш}})/B_{\text{р}} = 7,15 \cdot 10^{-3}(1100 - 400)(1017,8 - 729,6)/126,6 = 11,4 \text{ кДж/кг}.$$

Таким образом, суммарное тепловосприятие ширм

$$Q_{\text{т.ш}} = Q_{\text{л.т.ш}} + Q_{\text{к.т.ш}} = 378,5 + 11,4 = 389,9 \text{ кДж/кг}.$$

Возможно приближенное определение тепловосприятия топочных ширм другим методом.

Охлаждение продуктов сгорания в зоне расположения ширм вычисляется по формуле:

$$Q_3 = (H' - H'')\varphi,$$

где  $H'$ ,  $H''$  – энтальпии продуктов сгорания на входе в зоне ширм и на входе из нее;  $\varphi$  – коэффициент сохранения тепла в топке.

При температурах газов 1152 и 1048 °С энтальпии продуктов сгорания составляют 12864 и 11578 кДж/кг,  $\varphi = 0,998$ , тогда

$$Q_3 = (12864 - 11578)0,998 = 1283 \text{ кДж/кг}.$$

Тепловосприятие топочных ширм в связи с преобладанием радиационного тепловосприятия. Средний коэффициент эффективности экранов принимаем по [4]  $\psi_{\text{ср}} = 0,446$

Определяем для приближенного расчета площадь потолочной лучевоспринимающей поверхности топки

$$F_{\text{п.л}} = a_{\text{т}}b_{\text{т}} = 31,98 \cdot 18 = 575,3 \text{ м}^2$$

Определяем для приближенного расчета площадь лучевоспринимающих поверхностей стен топки в области ширм

$$F_{\text{с.л.ш}} = 2h_{\text{ш}}b_{\text{т}} + 2h_{\text{ш}}a_{\text{т}} = 2 \cdot 8 \cdot 18 + 2 \cdot 8 \cdot 31,96 = 799,4 \text{ м}^2$$

Средняя лучевоспринимающая поверхность топки в области ширм

$$F_{\text{ср}} = F_{\text{л.т.ш}} + F_{\text{п.л}} + F_{\text{с.л.ш}} = 729,6 + 575,3 + 799,4 = 2104,3 \text{ м}^2$$

Отсюда, значение тепловосприятия топочных ширм  $Q_{\text{п.р}}$ , вычисленное по приближенному методу, составляет

$$Q_{\text{п.р}} = Q_3(\psi F_{\text{л.т.ш}})/(\psi_{\text{ср}} F_{\text{ср}}) = 1283(0,4 \cdot 729,6)/(0,446 \cdot 2104,3) = 399 \text{ кДж/кг}.$$



## ЗАДАЧИ

**Задача 6.1.** Как изменится тепловосприятие радиационного перегревателя в примере 6.2, если его конструкцию выполнить из сдвоенных U – образных труб  $\varnothing 42$  мм, с шагом 45 мм, радиусом внутренней петли 105 мм, в ленте принять 20 труб.

Принять расположение одной петли в зоне 2, второй – в зоне 3 по всему периметру топки; тепловые потоки в зонах принять по примеру 6.2:  $q_{л2} = 235,7$  кВт/м<sup>2</sup> и  $q_{л3} = 157,6$  кВт/м<sup>2</sup>.

**Задача 6.2.** Как изменится поверхность стен призматической топочной камеры при установке в ней шести низкоопущенных ширм высотой 15 м и шириной 2 м из труб с наружным диаметром 32 мм и с шагом между трубами 45 мм?

В исходном варианте топка имеет объем  $V_T = 2750$  м<sup>3</sup>, лучевоспринимающая поверхность экранов  $F_{л.Т} = 1388$  м<sup>2</sup>. Как изменится соотношение  $F_{л.Т} / V_T$ ?

## 7. ТЕПЛОВОСПРИЯТИЕ РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА

Количество теплоты  $Q_{\phi}$ , кДж/кг, которое отдают продукты сгорания при их охлаждении в поверхности нагрева от температуры на входе  $\theta'$  до температуры на выходе  $\theta''$ , определяется балансовым уравнением

$$Q_{\phi} = (H' - H'')\phi - Q_{\text{доп.}} \quad (7.1)$$

где  $H'$ ,  $H''$  – энтальпия продуктов сгорания при температурах  $\theta'$  и  $\theta''$ , кДж/кг;  $Q_{\phi}$  – тепловосприятие по балансу дополнительных поверхностей, кДж/кг.

Количество теплоты  $Q_{л.ш}$ , кДж/кг, воспринимаемое поверхностью (ширмой, фестонем) в результате прямого излучения из топочного объема, определяется как разность поступающей тепловой энергии через входное сечение  $Q_{л.вх}$  и переизлученной на другие поверхности через выходное сечение  $Q_{л.вых}$ :

$$Q_{л.ш} = Q_{л.вх} - Q_{л.вых}. \quad (7.2)$$

При этом

$$Q_{л.вх} = \frac{q_{л.ш} F_{л.вх}}{B_p}; \quad (7.3)$$

$$Q_{л.вых} = Q_{л.вх} (1 - \varepsilon) / \beta + (5,67 \cdot 10^{-11} \varepsilon F_{л.вых} T_{ср}^4 \xi_{\Pi}) / B_p, \quad (7.4)$$

где  $q_{л.ш}$  – интенсивность теплового потока в районе выходного окна топки, кВт/м<sup>2</sup>; принимается из позонного расчета топки либо при его отсутствии определяется по формуле

$$q_{л.ш} = \beta \eta_v B_p Q / F_{ст}; \quad (7.5)$$

где  $\beta$  – коэффициент, учитывающий взаимный теплообмен между топкой и ширмами и определяемый в зависимости от температуры газов в конце топки  $\theta_T''$  (рис. 7.1);  $\eta_v$  – коэффициент неравномерности тепловосприятия топки по высоте в районе выходного окна, принимается по графику (см. рис. 6.1);  $Q_{л}$  – лучистое тепловосприятие поверхности стен топки, кДж/кг;  $F_{ст}$  – площадь поверхности стен топки, м<sup>2</sup>;  $\varepsilon$  – коэффициент излучения продуктов сгорания при средней температуре газов, определяется по зависимости  $\varepsilon = 1 - \exp(-kps)$ , где  $k$  – коэффициент ослабления лучей топочной средой;  $p$  – давление газовой среды в топке;  $s$  – эффективная толщина излучающего слоя;  $s = 3,6V_T / F_{ст}$ ;  $V_T$  – объем топки, м<sup>3</sup>; при наличии ширм, включаемых в объем топки,  $s = (3,6V_T / (F_{св} + F_{ш.т} + F_{пр})) (1 + F_{ш.т}V_{св} / (F_{св} + F_{пр})V_T)$ ;  $V_{св}$  – объем топки, свободный от ширм, м<sup>3</sup>;  $F_{св}$  – поверхность стен части топки, свободной от ширм;  $F_{ш.т}$  – поверхность ширм, установленных в топке (кроме ширм, установленных в окне);  $F_{пр}$  – поверхность стен топки, прилегающих к ширмам;  $\xi_{п}$  – поправочный коэффициент, зависящий от вида топлива, принимается равным: 0,5 при сжигании угля и мазута, 0,7 при сжигании природного газа и 0,2 при сжигании сланцев.

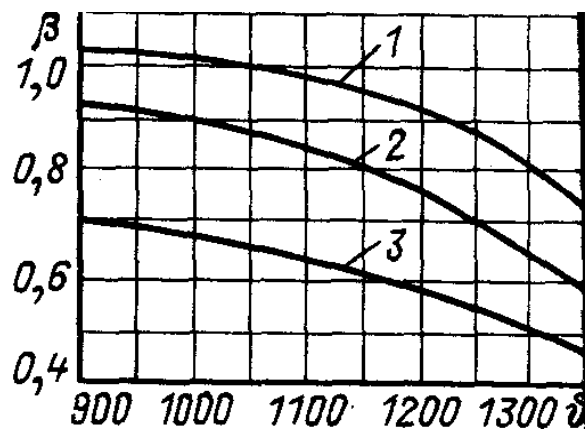


Рис. 7.1. Коэффициент  $\beta$ , учитывающий теплообмен между топкой и ширмовой поверхностью пароперегревателя в зависимости от температуры газов в конце топки  $\theta_T''$ : 1 – для твердого топлива; 2 – для мазута; 3 – для газового топлива

Если фестон (котельный пучок) имеет число рядов в глубину  $z_2 \geq 5$ , то теплота излучения из топки полностью воспринимается этой поверхностью. При меньшем числе рядов радиационная теплота фестона (котельного пучка) определяется по формуле

$$Q_{л.ф} = (q_{л.ф} F_{л.ф}) / B_p \quad (7.6)$$

где  $F_{л.ф}$  – лучевоспринимающая поверхность фестона (котельного пучка),  $m^2$ , определяется по формуле  $F_{л.ф} = ah_{г.о}x_{ф}$ , где  $a$  – ширина газового окна, в котором находится фестон, м;  $h_{г.о}$  – расчетная высота газового окна, в котором находится фестон, м;  $x_{ф}$  – угловой коэффициент фестона, определяемый по графику (рис.7.2); при числе труб  $z_2 \geq 5$   $x_{ф} = 1$ ;  $q_{л.ф}$  – интенсивность теплового потока в районе фестона,  $кВт/м^2$ ; определяется из позонного расчета топки либо по формуле (7.5).

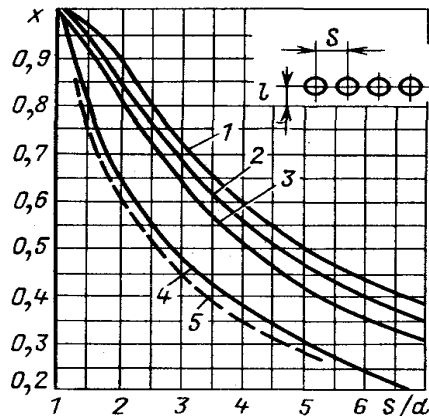


Рис. 7.2. Угловой коэффициент однорядного гладкотрубного экрана в зависимости от расстояния до обмуровки (стенки газохода)  $l$ : 1 – с учетом излучения обмуровки,  $l \geq 1,4d$ ; 2 – то же,  $l = 0,8d$ ; 3 – то же,  $l = 0,5d$ ; 4 – то же,  $l = 0$ ; 5 – без учета излучения обмуровки

Если фестон установлен за ширмами,

$$Q_{л.ф} = Q_{л.вых} x_{ф}. \quad (7.7)$$

Рабочая среда в трубах воспринимает полное количество теплоты (радиационное и конвективное).

Приращение энтальпии среды составляет

$$\Delta h = (Q_{б} + Q_{л}) B_p / D, \quad (7.8)$$

где  $D$  – расход среды через поверхность,  $кг/с$ .

## ПРИМЕРЫ

**Пример 7.1.** Определить тепловосприятие ширм пароперегревателя и приращение энтальпии пара.

При выполнении расчетов принять: температуры газов на входе в ширмы пароперегревателя  $\theta' = 1060$  °С; на выходе из ширм пароперегревателя  $\theta'' = 950$  °С; энтальпии газов на входе в ширмы пароперегревателя  $H' = 11983$  кДж/кг; энтальпии газов на выходе в ширмы пароперегревателя  $H'' = 10605$  кДж/кг; температура рабочей среды (пара) на входе  $t' = 417$  °С; давление пара на входе в пароперегреватель  $p' = 14,96$  МПа; давление пара на выходе из пароперегревателя  $p'' = 14,67$  МПа; энтальпия пара на входе в пароперегреватель  $h' = 3047$  кДж/кг; коэффициент сохранения тепла в котлоагрегате  $\varphi = 0,996$ ; паропроизводительность котла  $D = 136,81$  кг/с; удельный тепловой поток в ширмах  $q_{л.ш} = 69,7$  кВт/м<sup>2</sup>; площадь ширм на входе  $F_{л.вх} = 52$  м<sup>2</sup>; площадь ширм на выходе  $F_{л.вых} = 45$  м<sup>2</sup>; топливо – каменный уголь; расход топлива в котле  $B_p = 9,76$  кг/с; эффективная толщина излучающего слоя  $s = 0,84$  м; давление в газоходе  $0,1$  МПа; объемная доля водяного пара в продуктах сгорания  $r_{H_2O} = 0,091$ ; объемная доля трехатомных газов в продуктах сгорания  $r_{п} = 0,231$ ; массовая концентрация золы в продуктах сгорания  $\mu_{зл} = 0,0227$ , кг/кг; угловой коэффициент ширм  $\varphi_{ш} = 0,14$ .

Тип мельниц – среднеходовые. Дополнительное тепловосприятие других поверхностей в зоне расположения ширм  $Q_{доп} = 91$  кДж/кг.

**Решение.** 1. По формуле (7.1) определяем тепловосприятие ширмовых поверхностей:

$$Q_{б} = (H' - H'')\varphi - Q_{доп} = (11983 - 10605)0,996 - 91 = 1281,5 \text{ кДж/кг.}$$

2. Средняя температура продуктов сгорания:

$$\theta_{ср} = (\theta' + \theta'')0,5 = (1060 + 950)0,5 = 1005 \text{ °С;}$$

$$T_{ср} = \theta_{ср} + 273 = 1278 \text{ К;}$$

3. Произведение  $p_{п}s = pr_{п}s = 0,1 \cdot 0,231 \cdot 0,84 = 0,0194$  м·МПа; коэффициенты ослабления [4, с. 242]:  $k_{г} = 10,56$  м<sup>-1</sup>·МПа<sup>-1</sup>;  $k_{зл} = 74,76$  м<sup>-1</sup>·МПа<sup>-1</sup>. Оптическая толщина запыленного потока

$$kps = (k_{г}r_{п} + k_{зл}\mu_{зл})ps = (10,56 \cdot 0,231 + 74,76 \cdot 0,0227)0,1 \cdot 0,84 = 0,347.$$

Коэффициент излучения запыленного потока

$$\varepsilon = 1 - \exp(-kps) = 1 - \exp(-0,347) = 0,293.$$

4. Определяем по формуле (7.6) теплоту поступающую через плоскость входного сечения ширм:

$$Q_{л.вх} = 69,7 \cdot 52 / 9,76 = 371,4 \text{ кДж/кг.}$$

5. По формуле (7.4) определяем теплоту в выходном сечении ширм:

$$Q_{л.вых} = 371,4 (1 - 0,293) 0,14 / 0,97 + \\ + 5,67 \cdot 10^{-11} \cdot 0,293 \cdot 45 \cdot 1274^4 \cdot 0,5 / 9,76 = 140,8 \text{ кДж/кг}$$

Здесь поправочный коэффициент  $\beta = 0,97$  (при  $\theta' = 1060 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

6. Радиационное тепловосприятие ширм из топки определяем по формуле (7.2)

$$Q_{л.ш} = 371,4 - 140,8 = 230,6 \text{ кДж/кг}$$

7. Приращение энтальпии пара в ширме определяем по формуле (7.8)

$$\Delta h_{ш}'' = (1281,5 + 230,6) 9,76 / 136,81 = 107,9 \text{ кДж/кг.}$$

8. Энтальпия пара на выходе из ширмы

$$h_{ш}'' = h' + \Delta h_{ш}'' = 3043,9 + 107,9 = 3151,8 \text{ кДж/кг.}$$

9. Температура на выходе из ширмы [4, с. 219]

$$t_{ш}'' = 446 \text{ }^\circ\text{C.}$$

**Пример 7.2.** Как изменятся коэффициент излучения в ширмовом пароперегревателе, угловой коэффициент и радиационное тепловосприятие из топки при изменении поперечного шага между секциями пароперегревателя с  $S_1 = 600$  до  $S_1 = 1200$  мм? При расчете принять: температура газов на входе  $\theta' = 1212 \text{ }^\circ\text{C}$ ; температура газов на выходе  $\theta'' = 1080 \text{ }^\circ\text{C}$ ; давление в газоходе  $p = 0,1$  МПа; объемная доля водяного пара в продуктах сгорания  $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,118$ ; объемная доля трехатомных газов в продуктах сгорания  $r_{\text{П}} = 0,257$ . Высота секций ширм  $h_{ш} = 9$  м; глубина секций ширм  $c = 2,8$  м.

**Решение.** 1. Исходный вариант с  $S_1 = 0,6$  м. Средняя температура продуктов сгорания

$$\theta_{\text{ср}} = (\theta' + \theta'') / 2 = (1212 + 1080) / 2 = 1146 \text{ }^\circ\text{C,}$$

$$\text{или } T_{\text{ср}} = 1146 + 273 = 1419 \text{ К}$$

Произведение

$$p_{\text{П}} s = p r_{\text{П}} s = 0,1 \cdot 0,257 \cdot 0,843 = 0,0216 \text{ м} \cdot \text{МПа,}$$

где эффективная толщина излучающего слоя

$$s = 1,8 / (1 / h_{ш} + 1 / S_1 + 1 / c) = 1,8 / (1 / 9 + 1 / 0,6 + 1 / 2,8) = 0,843 \text{ м.}$$

Коэффициент ослабления лучей [4, с. 242, 243]  $k = 9,438 \text{ м}^{-1} \cdot \text{МПа}^{-1}$  и оптическая толщина газового потока

$$kps = kpr_{\Pi} s = 9,438 \cdot 0,1 \cdot 0,257 \cdot 0,843 = 0,204.$$

Коэффициент излучения

$$\varepsilon = 1 - \exp(-kpr_{\Pi} s) = 1 - \exp(-0,204) = 0,185.$$

2. Вариант с  $S_1 = 1,2 \text{ м}$ . Эффективная толщина излучающего слоя  $s = 1,8 / (1/a + 1/b + 1/c) = 1,8 / (1/9 + 1/2,8 + 1/1,2) = 1,383 \text{ м}$ .

Произведение  $p_{\Pi} s = pr_{\Pi} s = 0,1 \cdot 0,257 \cdot 1,383 = 0,0355 \text{ м} \cdot \text{МПа}$ .

Коэффициент ослабления лучей [4, с. 242, 243]  $k = 7,26 \text{ м}^{-1} \cdot \text{МПа}^{-1}$ . Оптическая толщина излучающего слоя  $kpr_{\Pi} s = 7,26 \cdot 0,1 \cdot 0,257 \cdot 1,383 = 0,258$ . Коэффициент излучения

$$\varepsilon = 1 - \exp(-kpr_{\Pi} s) = 1 - \exp(-0,258) = 0,227.$$

Таким образом, в данном случае увеличение поперечного шага между секциями в 2 раза повысило коэффициент излучения газового объема примерно в 1,23 раза.

**Пример 7.3.** Определить тепловосприятие двухрядного фестона, расположенного на выходе из топочной камеры и являющегося отводящей системой заднего экрана топки. При выполнении расчетов принять: отводящие трубы диаметром  $d = 60 \text{ мм}$ , толщиной стенки 6 мм, с коридорным расположением, поперечным шагом  $S_1 = 750 \text{ мм}$ , продольным шагом  $S_2 = 150 \text{ мм}$ , размеры газохода: высота  $a = 9200 \text{ мм}$ , ширина  $b = 5000 \text{ мм}$ ; топливо – бурый уголь; расход топлива в котле  $B_p = 10,09 \text{ кг/с}$ ; температура газов на входе в фестон  $\theta' = 1012 \text{ }^\circ\text{C}$ ; температура газов на выходе из зоны фестона  $\theta'' = 1003 \text{ }^\circ\text{C}$ ; удельный лучистый поток в фестоне  $q_{\text{л.ф}} = 96,3 \text{ кВт/м}^2$ , энтальпия продуктов сгорания на входе фестона  $H' = 6785,9 \text{ кДж/кг}$  и на выходе  $H'' = 6701,8 \text{ кДж/кг}$ . Коэффициент сохранения тепла в котле  $\varphi = 0,9935$ .

**Решение.** 1. Угловой коэффициент (см. рис. 7.2) при  $S_1/S_2 = 750/60 = 12,5$  для первого ряда труб фестона  $x = 0,2$ . С учетом второго ряда угловой коэффициент фестона  $x_{\text{ф}} = x + (1 - x)x = 0,2 + (1 - 0,2)0,2 = 0,36$ .

2. Площадь лучистой поверхности фестона

$$F_{\text{л.ф}} = abx_{\text{ф}} = 9,2 \cdot 5 \cdot 0,36 = 16,56 \text{ м}^2.$$

3. Тепловосприятие фестона излучением из топки

$$Q_{\text{л.ф}} = q_{\text{л.ф}} F_{\text{л.ф}} / \varphi = 96,3 \cdot 16,56 / 0,9935 = 158,05 \text{ кДж/кг}.$$

4. Тепловосприятие труб фестона (за счет теплообмена с газами  $Q_{\text{доп}} = 0$ ) определяем по формуле (7.1)

$$Q_{\text{б}} = (6785,9 - 6701,8)0,9935 = 83,6 \text{ кДж/кг.}$$

5. Полное тепловосприятие труб фестона

$$Q_{\text{ф}} = Q_{\text{л.ф}} + Q_{\text{б}} = 158,05 + 83,6 = 241,65 \text{ кДж/кг.}$$

Как видно, в двухрядном фестоне количество теплоты, получаемой радиацией из топки, может превышать теплоту, полученную от продуктов сгорания конвекцией и межтрубным излучением.

## ЗАДАЧИ

**Задача 7.1.** Как изменится количество лучистой теплоты из топки, воспринятой радиационно-конвективным пароперегревателем при увеличении высоты ширм с 7 до 9 м? При решении задачи принять: поперечный шаг между секциями  $s_1 = 600$  мм; глубина секций  $c = 2,8$  м; поверхность входного окна пароперегревателя  $174 \text{ м}^2$  (высота 7 м) и  $225,3 \text{ м}^2$  (высота 9 м); поверхности выходного окна  $88,8 \text{ м}^2$  (высота 7 м) и  $114,2 \text{ м}^2$  (высота 9 м); топливо – мазут; расход топлива в котле  $B_p = 19,278$  кг/с; содержание водяного пара  $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,119$ ; содержание трехатомных газов  $r_{\text{П}} = 0,257$ ; удельный лучистый поток  $q_{\text{л.ш.}} = 19,5$  кВт/м<sup>2</sup>; средняя температура газов в пароперегревателе  $1160$  °С; коэффициент взаимного теплообмена (топка-ширма)  $\beta = 0,76$ .

**Задача 7.2.** Как изменится количество лучистой теплоты из топки в единицу времени, если вместо мазута будет сжигаться твердое топливо? Произвести сопоставление при одинаковых геометрических размерах радиационно-конвективного перегревателя: высота секций 9000 мм; глубина 2800 мм; шаг между ними 600 мм; поверхность входного окна  $225,3 \text{ м}^2$ ; выходного окна  $114,2 \text{ м}^2$ ; данные по мазуту принять по задаче 7.1; расход твердого топлива в котле  $B_p = 63,7$  кг/с; содержание водяного пара в продуктах сгорания  $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,168$ ; содержание трехатомных газов в продуктах сгорания  $r_{\text{П}} = 0,305$ ; концентрация золы в продуктах сгорания  $\mu_{\text{ЗЛ}} = 0,017$  кг/кг; мельницы-среднеходные; удельный лучистый поток  $q_{\text{л.ш.}} = 19,5$  кВт/м<sup>2</sup>. Температуры газов в обоих случаях принять на выходе из топки  $1150$  °С, за пароперегревателем  $1050$  °С.

**Задача 7.3.** Определить балансовое тепловосприятие радиационно-конвективного пароперегревателя, лучистую теплоту, которую он получает из топки и приращение энтальпии пара в нем. При расчете принять: топливо-

мазут; температура газов на входе конвективного пароперегревателя  $\theta' = 1272$  °С; температура газов на выходе из конвективного пароперегревателя  $\theta'' = 1101$ °С; энтальпия на входе конвективного пароперегревателя  $H' = 24350$  кДж/кг; энтальпия на выходе из конвективного пароперегревателя  $H'' = 20758$  кДж/кг; тепловосприятие дополнительных поверхностей  $Q_{\text{доп}} = 420$  кДж/кг; температура пара на входе  $t' = 365$  °С; давление пара на входе  $p' = 14,72$  МПа; давление пара на выходе  $p'' = 14,32$  МПа; энтальпия пара на входе  $h' = 2814,4$  кДж/кг; расход топлива в котле  $B_p = 14,44$  кг/с; коэффициент сохранения тепла в котле  $\varphi = 0,997$ ; расход пара в котле  $D_{\text{ш}} = 175,75$  кг/с; удельный лучистый поток  $q_{\text{л.ш}} = 57,9$  кВт/м<sup>2</sup>; площадь поверхности радиационно-конвективного пароперегревателя на входе  $F_{\text{л.вх}} = 171$  м<sup>2</sup>; площадь поверхности радиационно-конвективного пароперегревателя на выходе  $F_{\text{л.вых}} = 117$  м<sup>2</sup>; эффективная толщина излучающего слоя  $s = 0,872$  м; давление в газоходе  $p = 0,1$  МПа; содержание водяного пара в продуктах сгорания  $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,187$ ; содержание трехатомных газов в продуктах сгорания  $r_{\text{п}} = 0,281$ ; угловой коэффициент ширм  $\varphi_{\text{ш}} = 0,174$ .

## 8. 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 газовоздушного 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. 8.1. 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 8.1

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.

## ПРИМЕРЫ

**Пример 8.1.** 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  $Q_{\text{р}}^{\text{н}} = 33369,2$  кДж/нм<sup>3</sup>. Располагаемая теплота топлива  $Q_{\text{р}}^{\text{р}} = Q_{\text{р}}^{\text{н}}$ .

2. Определяем потерю тепла с уходящими газами (для данного природного газа при  $t_{\text{ух}} = 125$  °С). Теоретические энтальпии воздуха и продуктов сгорания равны [4]:

$$H_{\text{в}}^0 = 1583 \text{ кДж/м}^3 \text{ и } H_{\text{г}}^0 = 1854 \text{ кДж/м}^3.$$

Теоретическая энтальпия воздуха при температуре 30 °С

$$H_{\text{н.в}}^0 = 395,7 \text{ кДж/м}^3.$$

Избыток воздуха в уходящих газах [4]

$$\alpha_{\text{ух}} = \alpha_{\text{т}} + \Delta\alpha_{\text{ЭК}} + \Delta\alpha_{\text{ВП}} = 1,05 + 0,04 + 0,06 = 1,15,$$

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  $\alpha_{yx} = 1,15$  энтальпия уходящих газов

$$H_{yx} = H_{\Gamma}^0 + (\alpha_{yx} - 1) = 1854 + (1,15 - 1)1583 = 2091,5 \text{ кДж/м}^3.$$

Для газообразного топлива потери тепла с механическим недожогом  $q_4 = 0$ .

Потери тепла с уходящими газами [4]

$$\begin{aligned} q_2 &= (H_{yx} - \alpha_{yx} H_{н.в}^0)(100 - q_4) / Q_p^p = \\ &= (2091,5 - 1,15 \cdot 395,7)(100 - 0) / 33369,2 = 4,9 \%. \end{aligned}$$

3. Принимаем для газообразного топлива потери тепла с химическим недожогом  $q_3 = 0,5 \%$  [4].

Определяем коэффициент полезного действия (брутто):

$$\eta_k = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6 = 100 - 4,9 - 0,5 - 0 - 0,5 - 0 = 94,1 \%,$$

где  $q_3 = 0,5 \%$ ;  $q_4 = 0 \%$ ;  $q_5 = 0,5 \%$ ;  $q_6 = 0 \%$  – соответственно потери тепла с химическим и механическим недожогом, на наружное охлаждение и с теплотой шлака (золы) [4].

4. Определяем полный расход топлива для котла с уплотненным газоходом [4]:

$$V_{\text{упл}} = Q_{\text{п.к}} \cdot 100 / (Q_p^p \cdot \eta_k) = 149862,3 \cdot 100 / (33369,2 \cdot 94,1) = 4,77 \text{ м}^3/\text{с},$$

где  $Q_{\text{п.к}}$  – удельное количество теплоты, воспринятое рабочей средой в котле (при параметрах перегретого пара  $t_{\text{пе}} = 570 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $P_{\text{пе}} = 140 \text{ атм}$ ), вычисляемое как

$$\begin{aligned} Q_{\text{п.к}} &= D_{\text{п.к}}(h_{\text{пе}} - h_{\text{п.в}}) + D_{\text{пр}}(h' - h_{\text{п.в}}) = (58,3(841,3 - 231,7) + \\ &+ 0,58(623,6 - 231,7))4,19 = 149862,3 \text{ кДж/с}. \end{aligned}$$

где  $D_{\text{п.к}} = 210000 / 3600 = 58,3 \text{ кг/с}$  – паропроизводительность котла БКЗ–210–140ФЖШ;  $h_{\text{пе}}$  – энтальпия перегретого пара, кДж/кг;  $h_{\text{п.в}}$  – энтальпия пита–тельной воды, кДж/кг;  $D_{\text{пр}}$  – расход воды на продувку (1 % от  $D_{\text{п.к}}$ ), кг/с;  $h'$  – 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  $Q_{y.t} = 7000 \text{ ккал/кг} = 29308 \text{ кДж/кг}$ :

$$V_{y.t. \text{ упл}} = V_{\text{упл}} Q_p^H / Q_{y.t} = 4,77 \cdot 33369,2 / 29308 = 5,43 \text{ кг/с}.$$

6. Определяем энтальпию уходящих газов при их температуре  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  для котла БКЗ–210–140ФЖШ с обычной обмуровкой (без обшивки стальным листом).

Коэффициент избытка воздуха в газоходе за воздухоподогревателем  $\alpha_{yx} = 1,5$  (берется по режимным картам котлов).

Энтальпия уходящих газов при  $\alpha_{yx} = 1,5$

$$H_{yx} = H_{\Gamma}^0 + (\alpha_{yx} - 1) = 1854 + (1,5 - 1)1583 = 2645,5 \text{ кДж/м}^3.$$

Потери тепла с уходящими газами [4] (при  $q_4 = 0$ )

$$q_2 = (H_{yx} - \alpha_{yx} H_{н.в}^0)(100 - q_4) / Q_p^p = \\ = (2645,5 - 1,5 \cdot 395,7)(100 - 0) / 33369,2 = 6,15 \text{ \%}.$$

7. Коэффициент полезного действия для котла БКЗ–210–140ФЖШ с обычной неуплотненной обмуровкой (брутто)

$$\eta_{к.н} = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6 = 100 - 6,15 - 0,5 - 0 - 0,5 - 0 = 92,85 \text{ \%}.$$

8. Полный расход газообразного топлива в котле БКЗ–210–140ФЖШ с обычной неуплотненной обмуровкой

$$B_{н} = Q_{п.к} \cdot 100 / (Q_p^p \cdot \eta_{к.н}) = 149862,3 \cdot 100 / (33369,2 \cdot 92,85) = 4,84 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Расход условного топлива

$$B_{у.т.н} = B_{н} Q_p^h / Q_{у.т} = 4,84 \cdot 33369,2 / 29308 = 5,51 \text{ кг/с}.$$

9. Превышение расхода условного топлива в котле БКЗ–210–140ФЖШ с неуплотненным газоходом

$$\Delta B_{у.т.н} = B_{у.т.упл} - B_{у.т.н} = 5,51 - 5,43 = 0,08 \text{ кг/с}.$$

В процентном выражении

$$\Delta B_{н} = (B_{у.т.н} - B_{у.т.упл}) 100 / B_{у.т.упл} = (5,51 - 5,43) 100 / 5,43 = 1,47 \text{ \%}.$$

**Пример 8.2.** 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

$$Q_{пол1}^{уд} = Q_{п.к} / B_1 = D_{п.к}(h_{пе} - h_{п.в}) + D_{пр}(h' - h_{п.в}) / B_1 = (58,3(841,3 - 231,7) + \\ + 0,58(623,6 - 231,7)) 4,19 / 5,43 = 27599 \text{ кДж/кг},$$

где  $Q_{п.к} = 58,3 \text{ кг/с}$  – производительность одного котла БКЗ–210–140ФЖШ;

$h_{пе} = 841,3 \text{ ккал/кг}$  – энтальпия перегретого пара; 4,19 – переводной коэффициент ккал в кДж;  $h_{п.в} = 231,7 \text{ ккал/кг}$  – энтальпия питательной воды;

$D_{\text{пр1}} = 0,58$  кг/с – расход воды на продувку;  $h' = 623,6$  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

$$Q_{\text{пол2}} = D_{\text{п.к}}(h_{\text{пе}} - h_{\text{п.в}}) + D_{\text{пр2}}(h' - h_{\text{п.в}}) = (58,3(841,3 - 231,7) + 0,29(623,6 - 231,7)) \cdot 4,19 = 149386 \text{ кДж/с},$$

где  $D_{\text{пр2}} = 0,29$  кг/с – расход воды на продувку по нормативу.

Расход топлива при продувке в 0,5 % от паропроизводительности

$$B_2 = Q_{\text{пол2}} / Q_{\text{пол1}}^{\text{уд}} = 149386 / 27599 = 5,41 \text{ кг/с}.$$

Экономия расхода топлива в котле при снижении расхода воды на продувку до 0,5 % от паропроизводительности составляет

$$\Delta B_{\text{у.т. прод}} = B_1 - B_2 = 5,43 - 5,41 = 0,02 \text{ кг/с или } 0,37 \text{ \%}.$$

## ЗАДАЧИ

**Задача 8.1.** 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>.

**Задача 8.2.** 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.

## 9. 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<sup>P</sup>);

– *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.

### 9.1. 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  $T'_a$ :

$$T'_a = \frac{Q'_T}{V_G^0 c_G + 1,016(\alpha_{гор} - 1)V_B^0 c_B} + 273, \quad (9.1)$$

где  $Q'_T = Q_H^p \cdot 10^3 + Q_{Г.В} + Q$  – тепловыделение в зоне горения, кДж/кг;  $Q_H^p$  – теплота сгорания, МДж/кг;  $c_G$  и  $c_B$  – теплоемкости газа и воздуха, полученные при ожидаемой 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:  $\alpha_{гор} = \alpha_T - 0,5\Delta\alpha_T$ , 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

$$c_{\Gamma} = (1,59 + 0,004W^{\Pi}) + 0,14k_t; \quad (9.2a)$$

– при сжигании природного газа

$$c_{\Gamma} = 1,57 + 0,134k_t; \quad (9.2б)$$

– при сжигании мазута

$$c_{\Gamma} = 1,58 + 0,122 k_t, \quad (9.2в)$$

где  $W^{\Pi} = W^{\text{P}} / Q_{\text{H}}^{\text{P}}$  – 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

$$c_{\text{B}} = 1,46 + 0,092k_t. \quad (9.3)$$

Ожидаемую адиабатную температуру для расчета теплоемкостей находят по формулам:

– для твердого топлива

$$t_a = \frac{1800}{\alpha_{\text{гор}}} (1 + 10^{-5} Q'_m); \quad (9.4a)$$

– для мазута и природного газа

$$t_a = \frac{1950}{\alpha_{\text{гор}}} (1 + 0,36^{-5} Q'_T); \quad (9.4б)$$

Допустимое расхождение между предварительно принятой  $t_a$  и полученным по (9.1) значением  $(T'_a - 273)$  не должно превышать 50 °С, иначе необходимо принять новое  $t_a = T'_a - 273$  и уточнить значения  $c_{\Gamma}$  и  $c_{\text{B}}$ .

Максимальную температуру зоны горения находят по формуле с учетом отвода теплоты к экранам, степени выгорания топлива и влияния рециркуляции газов:

$$T_{\text{M}} = \beta_{\text{сГ}} T'_a (1 - \psi_{\text{з.Г}})^{0,25} (1 - r^{1 + nr}) m_{\Gamma}, \quad (9.5)$$

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;  $\psi_{\text{з.Г}}$  – коэффициент тепловой эффективности экранов в зоне ядра факела (см. гл. 6), 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;  $m_{\Gamma} = 0,95(25 / w_{\text{в}})^{0,2}$  – для прямоточных настенных горелок, где  $w_{\text{в}}$  – 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  $T_{\text{М}}$

$$\tau_0 = 0,024 \exp(54290 / T_{\text{М}} - 23). \quad (9.6)$$

Расчетное время реакции образования оксидов азота в топке

$$\tau_{\text{р}} = \frac{\Delta T_{\text{р}}}{T'_{\text{а}} - T''_{\text{т}}} \left( \frac{q_f \Pi}{300} \right)^{0,5} \tau_{\text{преб}}, \quad (9.7)$$

где  $\Delta T_{\text{р}}$  – температурный интервал активной реакции образования оксидов азота. К, зависит от значения  $T_{\text{М}}$  и определяется из выражения

$$\Delta T_{\text{р}} = \frac{T_{\text{М}}^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + T_{\text{М}} \cdot 10^{-5}}; \quad (9.8)$$

$q_f = \frac{BQ_{\text{Н}}^{\text{р}}}{a_{\text{т}} b_{\text{т}}}$  – среднее тепловое напряжение сечения топочной камеры, МВт / м<sup>2</sup>;  $\Pi = 2a_{\text{т}} + 2b_{\text{т}}$  – расчетный периметр стен призматической топочной камеры, м (при наличии двусветного экрана добавляется его удвоенная ширина);  $T''_{\text{т}}$  – абсолютная температура газов на выходе из топки. К, берется из теплового расчета котла;  $\tau_{\text{преб}}$  – время пребывания газов в топочной камере, с:

$$\Delta T_{\text{р}} = \frac{T_{\text{М}}^2 \cdot 10^{-5}}{q_{\text{в}} T_{\text{Г}} v_{\text{Г}}^{\Pi} \alpha_{\text{Г}} (1 + r)}, \quad (9.9)$$

где  $q_{\text{в}} = \frac{BQ_{\text{Н}}^{\text{р}}}{V_{\text{т}}}$  – тепловое напряжение топочного объема, МВт/м<sup>3</sup>;  $T_{\text{Г}} = 0,84[(T_{\text{М}})^4 + (T''_{\text{т}})^4]^{0,25}$  – средняя расчетная температура газов в топочном объеме, К;  $v_{\text{Г}}^{\Pi}$  – удельный приведенный объем газов при  $\alpha = 1$ , м<sup>3</sup>/МДж, в расчетах следует принимать для антрацита и полуантраци  $v_{\text{Г}}^{\Pi} = 0,273$  м<sup>3</sup>/МДж, для остальных твердых топлив  $v_{\text{Г}}^{\Pi} = 0,278 + 0,001 W^{11}$ ,

для мазута  $0,281 \text{ м}^3/\text{МДж}$ , для природного газа  $0,3 \text{ м}^3/\text{МДж}$ ;  $\xi$  – 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  $\text{NO}_2^{\text{TP}}$ ,  $\text{г}/\text{м}^3$ , определяется по формуле

$$\text{NO}_2^{\text{TP}} = 7,03 \cdot 10^3 C_{\text{O}_2}^{0,5} \exp(-10860/T_M) \frac{\tau_p}{\tau_0}, \quad (9.10)$$

где  $C_{\text{O}_2}$  – концентрация остаточного (избыточного) кислорода в зоне реакции,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , определяется по формуле

$$C_{\text{O}_2} = \frac{0,21V_B^0 [(\alpha_{\text{гор}} - 1) + r(\alpha_{\text{рц}} - \alpha_{\text{гор}})] \rho_{\text{O}_2}}{[V_{\Gamma}^0 + (\alpha_{\text{гор}} - 1)V_B^0] (1 + r)}, \quad (9.11)$$

где  $\alpha_{\text{рц}}$  – избыток воздуха в газах рециркуляции;  $\rho_{\text{O}_2} = 1,428 \text{ кг}/\text{м}^3$  – плотность кислорода при атмосферном давлении. В случаях, когда значение  $\alpha_{\text{гор}} - 1$  – окажется меньше  $0,02$ , условно принимать его постоянным и равным  $0,02$ .

## 9.2. Концентрации топливных и быстрых оксидов азота.

### Суммарная концентрация оксидов в газах

Образование этого вида оксидов происходит в диапазоне температур  $800\text{--}2100 \text{ К}$  и наибольшую интенсивность - имеет в области  $1850 \text{ К}$ . Выход топливных оксидов  $\text{NO}_2^{\text{ТЛ}}$  в этой зоне сильно зависит от избытка воздуха (в степени 2), слабо от температуры (степень  $0,33$ ) и содержания азота в топливе  $N^{\text{P}}$ .

Расчетные формулы для двух температурных зон имеют следующий вид:

– при значениях температуры  $2100 > T_M \geq 1850 \text{ К}$

$$\text{NO}_2^{\text{ТЛ}} = (0,40 - 0,1N^{\text{P}}) N^{\text{P}} \left( \frac{\alpha_{\text{гор}} + r}{1 + r} \right)^2 \left( \frac{2100 - T_M}{125} \right)^{0,33}; \quad (9.12)$$

– при значениях температуры  $1850 > T_M \geq 800$  К

$$\text{NO}_2^{\text{ТЛ}} = 1,25(0,40 - 0,1N^{\text{P}})N^{\text{P}} \left( \frac{\alpha_{\text{гор}} + r}{1 + r} \right)^2 \left( \frac{T_M - 800}{1000} \right)^{0,33}. \quad (9.13)$$

Формулы (9.12) и (9.13) учитывают одновременно и образование быстрых оксидов азота.

В итоге максимальная суммарная концентрация оксидов азота при номинальной нагрузке котла составляет

$$\text{NO}_2^0 = \text{NO}_2^{\text{TP}} + \text{NO}_2^{\text{ТЛ}}. \quad (9.14)$$

При любой сниженной нагрузке парового котла суммарный выход оксидов азота определяется по формуле

$$\text{NO}_2 = \text{NO}_2^{\text{TP}} (D / D_{\text{НОМ}}) + \text{NO}_2^{\text{ТЛ}} (D / D_{\text{НОМ}})^{0,5}. \quad (9.15)$$

Здесь  $D / D_{\text{НОМ}}$  – отношение расчетной нагрузки котла к номинальной.

При переходе на двухступенчатое (нестехиометрическое) сжигание топлива расчет максимальной температуры факела  $T_M$  производится по формуле (9.5) 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

$$\alpha_{\text{гор}}^{\text{I}} = \frac{\alpha_{\text{T}} - 0,5\Delta\alpha_{\text{T}} - \beta_{\text{II}}}{B_{\text{I}}}, \quad (9.16)$$

где  $\beta_{\text{II}}$  – доля воздуха, поступающего во вторую ступень горения:  $B_{\text{I}} = B_{\text{I}} / B$  – доля топлива, поступающего в первую зону. При наличии сбросных горелок с учетом КПД циклона  $B_{\text{I}} = 0,88 \div 0,94$ . Расчетный избыток воздуха в горелках второй зоны горения

$$\alpha_{\text{гор}}^{\text{II}} = \beta_{\text{II}} + 0,5\Delta\alpha_{\text{T}}. \quad (9.17)$$

Доля топлива, сгоревшего в первой (нижней) зоне горения определяется относительным количеством воздуха в первой зоне с учетом неизбежной неполноты сгорания:

$$\beta_{\text{ср}}^{\text{I}} = 0,95\alpha_{\text{гор}}^{\text{I}}. \quad (9.18)$$

Расчет температуры  $T_M$  осуществляют по (9.5) для значения  $\beta_{\text{ср}}^{\text{I}}$ . Адиабатная температура горения определяется по (9.1) для полного избытка воздуха на выходе из верхней области горения, т.е. по  $\alpha_{\text{гор}} = \alpha_{\text{T}} - 0,5\Delta\alpha_{\text{T}}$  независимо от ступенчатой организации сжигания. В остальном расчет совпадает с изложенным ранее.

### 9.3. 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  $\text{NO}_2^{\text{газ}} = 1,3\text{NO}_2^{\text{маз}}$ ).

Ввиду отсутствия в природном газе топливного азота, входящего в радикалы, но при наличии углеводородных соединений при сгорании газа могут образовываться только быстрые оксиды азота  $\text{NO}_2^{\text{б}}$ .

При расчете термических оксидов азота следует исходить из методики, изложенной в п. 9.1.

Расчет максимальной температуры производится по (9.5), но для учета повышенной скорости реакций горения вводится поправка и расчетная температура принимается

$$T'_M = 1,01 T_M, \quad (9.19)$$

где  $T_M$  – максимальная температура по (9.5), К.

Расчет быстрых оксидов азота осуществляется по формуле

$$\text{NO}_2^{\text{б}} = 0,1 \left( \frac{\alpha_{\text{гор}} + r}{1 + r} \right)^2 \left( \frac{T'_M - 800}{1000} \right)^{0,33}. \quad (9.20)$$

Ввиду высокой реакционной способности газового топлива рециркуляция газов  $r$  не учитывается в формуле (9.5) при вводе газов через щлицы.

Суммарная концентрация оксидов азота составит

$$\text{NO}_2^0 = \text{NO}_2^{\text{TP}} + \text{NO}_2^{\text{б}}. \quad (9.21)$$

#### ПРИМЕРЫ

**Пример 9.1.** 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  $t_3^{\text{шл}} = 1230$  °С.

При расчете принять следующие исходные данные (табл. 9.1).

**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  $\Delta\alpha_{\text{пл}} = 0,1$ , тогда избыток горячего воздуха составит  $\alpha_{\Gamma.В} = 1,15 - 0,1 - 0,1 = 0,95$ .

Таблица 9.1

Исходные данные по параметрам продуктов сгорания  
для расчетов примера 9.1

Параметр	Донецкий ГСШ	Природный газ
Теплота сгорания	$Q_{\text{Н}}^{\text{P}} = 20,47 \text{ МДж/кг}$	$Q_{\text{Н}}^{\text{P}} = 37,3 \text{ МДж/м}^3$
Температура горячего воздуха	384 °С	370 °С
Доля рециркуляции газов	–	0,1
Избыток воздуха на выходе из топки	1,15	1,10
То же в газах рециркуляции	–	1,17
Температура газов на выходе из топки	1190 °С	1210 °С
Тепловое напряжение сечения	–	$q_f = 4,86 \text{ МВт/м}^2$
Периметр топочной камеры	–	$\Pi = 51,9 \text{ м}$
Присос холодного воздуха в топку	–	$\Delta\alpha_{\text{T}} = 0,1$

Для природного газа  $Q_{\Gamma.В} = 1,0 \cdot 4992 = 4992 \text{ кДж/м}^3$ ; физическую теплоту топлива не учитываем из-за ее незначительности.

2. Рассчитываем содержание оксидов азота при сжигании донецкого ГСШ:

тепловыделение:

$$Q'_{\text{T}} = Q_{\text{Н}}^{\text{P}} + Q_{\Gamma.В} = 20,47 \cdot 10^3 + 2879 = 23349 \text{ кДж/кг};$$

ожидаемая адиабатная температура горения топлива по (9.4а)

$$t_{\text{a}} = \frac{1800}{\alpha_{\text{гор}}} (1 + Q'_{\text{T}}) = \frac{1800}{1,1} (1 + 0,2335) = 2018 \text{ °С};$$

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  $W^{\Pi} = 8 / 20,47 = 0,39$ :

$$c_{\Gamma} = (1,59 + 0,004 \cdot W^{\Pi}) + 0,14 \cdot k_t = (1,59 + 0,004 \cdot 0,39) + 0,14 \cdot 0,818 = 1,706 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К});$$

$$c_{\text{В}} = 1,46 + 0,092 \cdot k_t = 1,46 + 0,092 \cdot 0,818 = 1,535 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К});$$

расчетная адиабатная температура

$$T'_a = \frac{Q_{\Gamma}}{V_{\Gamma}^0 \cdot c_{\Gamma} + 1,016(\alpha_{\text{гор}} - 1) \cdot V^0 \cdot c_{\text{В}}} + 273 = \frac{23349}{6,28 \cdot 1,706 + 1,016(1,1 - 1)5,83 \cdot 1,535} + 273 = 2010 + 273 = 2283 \text{ К.}$$

Максимальная температура в зоне горения принимается при  $\beta_{\text{сг}} = 0,965$ , поскольку топка с жидким шлакоудалением, экраны топки в зоне горения на высоту 5,5 м футерованы карборундовой массой. поверхность фронтальной стены топки:  $F_{\text{сг}} = \Pi + H = 51,9 + 5,5 \approx 285,5 \text{ м}^2$ ;  $H_{\text{в.я.}} = H + 1,5 = 5,5 + 1,5 = 7 \text{ м}$ ;

$F_{\text{в.я.}} = 0,5 (\Pi \cdot H_{\text{в.я.}}) = 0,5 (51,9 \cdot 7) = 142,7$ . Условный коэффициент загрязнения футерованной части экранов:

$$\xi_{\Phi} = 0,53 - 0,25 \frac{t_{\text{шл}}^3}{1000} = 0,53 - 0,25 \frac{1230^3}{1000} = 0,22;$$

– расчетная эффективность зоны горения:

$$\Psi_{\text{з.г}} = \frac{\xi_{\Phi} \cdot F_{\text{сг}} + F_{\text{в.я.}}(\xi_{\Phi} - \xi)}{F_{\text{сг}} + F_{\text{в.я.}}} = \frac{0,22 \cdot 285,5 + 142,7(0,2 - 0,45)}{285,5 + 2 \cdot 142,7} = 0,265;$$

– максимальная температура зоны горения:

$$T_{\text{М}} = \beta_{\text{сг}} \cdot T'_a (1 - \Psi_{\text{з.г}})^{0,25} = 0,965 \cdot 2283 (1 - 0,265)^{0,25} \approx 2030 \text{ К};$$

температурный интервал реакции образования оксидов азота

$$\Delta T_{\text{р}} = \frac{T_{\text{М}}^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + T_{\text{М}} \cdot 10^{-5}} = \frac{2030^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + 0,0203} = 64,9 \text{ с};$$

расчетное время реакции в топке

$$\tau_{\text{преб}} = \frac{273 \cdot \xi}{0,155 \cdot T_{\Gamma} \cdot 0,2784 \cdot 1,15} = \frac{273 \cdot 0,8}{0,155 \cdot 1810 \cdot 0,2784 \cdot 1,15} = 2,3 \text{ с};$$

1,15 – избыток воздуха на выходе из топки для Донецкого ГСШ, из таблицы; средняя температура газов в топке

$$T_{\Gamma} = 0,84 (T_{\text{М}}^4 + 1463^4)^{0,25} = 0,84 (2030^4 + 1463^4)^{0,25} = 1810 \text{ К.}$$

Тогда расчетное время реакции образования оксидов азота в топке

$$\tau_p = \frac{\Delta T_p}{T_a - 1463} \left( \frac{q_f \cdot \Pi}{300} \right)^{0,5} \quad \tau_{\text{преб}} = \frac{64,9}{2283 - 1463} \left( \frac{4,86 \cdot 51,9}{300} \right)^{0,5} \cdot 2,3 = 0,164 \text{ с};$$

теоретическое время достижения равновесия

$$\tau_0 = 0,024 \exp(54290 / T_M - \tau_{\text{преб}} \cdot 10) = 0,024 \exp(54290 / 2030 - 23) = 1,01 \text{ с};$$

концентрация термических оксидов азота при

$$C_{\text{O}_2} = \frac{0,21 V_B^0 [(\alpha_{\text{гор}} - 1) + r(\alpha_{\text{рц}} - \alpha_{\text{гор}})] \rho_{\text{O}_2}}{[V_{\Gamma}^0 + (\alpha_{\text{гор}} - 1) V_B^0] (1 + r)} =$$

$$= \frac{0,21 \cdot 5,83 \cdot 0,1 \cdot 1,428}{6,28 + 0,1 \cdot 5,83} = 0,025 \text{ кг/м}^3;$$

$$\text{NO}_2^{\text{TP}} = 7030 \cdot C_{\text{O}_2}^{0,5} \exp(-10860 / T_M) \frac{\tau_p}{\tau_0} =$$

$$= 7030 \cdot 0,025^{0,5} \exp(-10860 / 2030) \frac{0,164}{1,01} = 0,84 \text{ г/м}^3;$$

топливные и быстрые оксиды азота при содержание азота в топливе  $N^{\text{P}} = 1\%$ :

$$\text{NO}_2^{\text{ТЛ}} = (0,40 - 0,1 \cdot N^{\text{P}}) N^{\text{P}} (1,1)^2 \left( \frac{2100}{T_M} \right)^{0,33} =$$

$$= (0,40 - 0,1 \cdot 1) 1 (1,1)^2 \left( \frac{2100 - 2030}{125} \right)^{0,33} = 0,30 \text{ г/м}^3;$$

1,1 – избыток воздуха на выходе из топки для природного газа, из таблицы;  
суммарный выход оксидов азота при жидком шлакоудалении

$$\text{NO}_2^0 = \text{NO}_2^{\text{TP}} + \text{NO}_2^{\text{ТЛ}} = 0,84 + 0,30 = 1,14 \text{ г/м}^3.$$

3. Расчет выхода оксидов азота при сжигании природного газа:

- тепловыделение

$$Q'_{\text{T}} = Q_{\text{H}} \cdot 10^3 + Q_{\text{Г.В}} = 37,3 \cdot 10^3 + 4992 = 42292 \text{ кДж/м}^3;$$

$$\alpha_{\text{гор}} = \alpha_{\text{T}} - 0,5 \Delta \alpha_{\text{T}} = 1,1 - 0,5 \cdot 0,1 = 1,05;$$

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):

$$t_a = \frac{1950}{\alpha_{\text{гор}}} \left( 1 + 0,36 \cdot 10^{-5} Q'_{\text{T}} \right) = \frac{1950}{1,05} (1 + 0,36 \cdot 0,423) = 2135 \text{ }^\circ\text{C};$$



- температурный коэффициент изменения теплоемкости и теплоемкости газов и воздуха

$$k_t = \frac{t_a - 1200}{1000} = \frac{2135 - 1200}{1000} = 0,935; \quad c_{\Gamma} = 1,57 + 0,134 \cdot k_t = 1,57 + 0,134 \cdot 0,935 = 1,695 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К});$$

$$c_{\text{В}} = 1,46 + 0,092 \cdot k_t = 1,46 + 0,092 \cdot 0,935 = 1,546 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К});$$

- расчетная адиабатная температура

$$T'_a = \frac{Q'_T}{V_{\Gamma}^0 \cdot c_{\Gamma} + 1,016(\alpha_{\text{Гор}} - 1)V^0 \cdot c_{\text{В}}} + 273 = \frac{42292}{11,16 \cdot 1,695 + 1,016(1,05 - 1)9,96 \cdot 1,546} + 273 = 2147 + 273 = 2420 \text{ К}.$$

Максимальная температура в зоне горения – по (9.5). 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

$$\psi_{3,\Gamma} = \frac{\xi_{\text{Ф}} \cdot F_{\text{СТ}} + F_{\text{В.Я}}(\xi_{\text{Ф}} - \xi)}{F_{\text{СТ}} + F_{\text{В.Я}}} = \frac{0,3 \cdot 285,5 + (0,2 + 0,45)149,6}{584,7} = 0,313;$$

– максимальная температура зоны горения

$$T_{\text{М}} = 0,97 \cdot T'_a (1 - \psi_{3,\Gamma})^{0,25} (1 - 0,1^{1+3,0 \cdot 0,1}) = 0,97 \cdot 2420 (1 - 0,313)^{0,25} (1 - 0,1^{1+3,0 \cdot 0,1}) = 2030 \text{ К};$$

– расчетная температура

$$T'_{\text{М}} = \tau_0 \cdot T_{\text{М}} = 1,01 \cdot 2030 = 2050 \text{ К};$$

– температурный интервал реакции образования оксидов азота

$$\Delta T_{\text{Р}} = \frac{T'_{\text{М}}{}^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + T'_{\text{М}}{}^2 \cdot 10^{-5}} = \frac{2050^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + 0,0205} = 66,3 \text{ К};$$

– средняя температура газов в топке

$$T_{\Gamma} = N_2^{\text{ГР}} (T'_{\text{М}}{}^4 + 1483^4)^{0,25} = 0,84(2050^4 + 1483^4)^{0,25} = 1814 \text{ К};$$

– расчетное время реакции в топке

$$\tau_{\text{преб}} = \frac{273 \cdot 0,8}{0,155 \cdot \Delta T_{\text{Р}} \psi_{\text{СТ}} \cdot 1,1(1 + 0,1)} = \frac{273 \cdot 0,8}{0,155 \cdot 1814 \cdot 0,3 \cdot 1,1(1 + 0,1)} = 2,15 \text{ с};$$

– расчетное время реакции образования оксидов азота в топке:

$$\tau_p = \frac{\Delta T_p}{T'_a - 1483} \left( \frac{q_f \cdot \Pi}{300} \right)^{0,5} \quad \tau_{\text{преб}} = \frac{66,3}{2420 - 1483} \left( \frac{4,86 \cdot 51,9}{300} \right)^{0,5} \cdot 2,15 = 0,138 \text{ с};$$

– теоретическое время достижения равновесия

$$\tau_0 = 0,024 \exp(54290 / T_M - 23) = 0,024 \exp(54290 / 2050 - 23) = 0,78 \text{ с};$$

– концентрация термических оксидов азота при

$$C_{O_2} = \frac{0,21 V_B^0 \left[ (\alpha_{\text{гор}} - 1) + r (\alpha_{\text{рц}} - \alpha_{\text{гор}}) \right] \rho_{O_2}}{\left[ V_{\Gamma}^0 + (\alpha_{\text{гор}} - 1) V_B^0 \right] (1 + r)} =$$

$$= \frac{0,21 \cdot 9,96 (0,05 + 0,1 \cdot 0,12) \cdot 1,428}{(11,16 + 0,05 \cdot 9,36) \cdot 1,1} = 0,0144 \text{ кг/м}^3;$$

$$NO_2^{\text{TP}} = 7030 \cdot C_{O_2}^{0,5} \exp(-10860 / T_M) \frac{\tau_p}{\tau_0} =$$

$$= 7030 \cdot 0,0144^{0,5} \exp(-10860 / 2050) \frac{0,138}{0,78} = 0,735 \text{ г/м}^3;$$

– быстрые оксиды азота

$$NO_2^{\text{б}} = 0,1 \left( \frac{\alpha_{\text{гор}} + r}{1 + r} \right)^2 \left( \frac{T'_M - 800}{1000} \right)^{0,33} =$$

$$= 0,1 \left( \frac{1,05 + 0,1}{1,1} \right)^2 \left( \frac{2050 - 800}{1000} \right)^{0,33} = 0,118 \text{ г/м}^3;$$

– суммарный выход оксидов азота при сжигании природного газа с рециркуляцией

$$NO_2^0 = NO_2^{\text{TP}} + NO_2^{\text{б}} = 0,735 + 0,118 = 0,853 \text{ г/м}^3.$$

## ОТВЕТЫ

1.1.  $A^P = 6,3 \%$ ;  $S^P = 0,3 \%$ ;  $C^P = 59,5 \%$ ;  $H^P = 4 \%$ ;  $N^P = 0,55 \%$ ;  $O^P = 19,35 \%$ ;  $W^P = 10 \%$ .

1.2.  $C^C = 41,12 \%$ .

1.3.  $S^Г = 0,26 \%$ ;  $C^Г = 84,96 \%$ ;  $H^Г = 4,24 \%$ ;  $N^Г = 0,9 \%$ ;  $O^Г = 9,64 \%$ .

1.4.  $S^Г = 1,6 \%$ ;  $C^P = 22 \%$ ;  $H^P = 3,1 \%$ ;  $N^P = 0,1 \%$ ;  $O^P = 3,7 \%$ ;  $W^P = 13 \%$ ;  $(CO_2)_{\text{к}}^P = 16 \%$ ;  $A^P = 40 \%$ .

1.5.  $A^C = 24 \%$  и сумма составляющих сухой массы равна 100 %.

1.6.  $Q_{H_2}^P = 12362$  кДж/кг.

1.7.  $Q_H^P = 31066$  кДж/кг.

1.8.  $x = 15,72$  м<sup>3</sup>/кг;  $Q_H^P = 37175$  кДж/кг.

2.1.  $V^0$  изменилось с 3,62 до 5,34 м<sup>3</sup>/кг.

2.2.  $V^0$  изменилось с 5,8 до 5,4 м<sup>3</sup>/кг.

2.3.  $V^0 = 11,26$  м<sup>3</sup>/кг.

2.4.  $\Delta V = 0,655$  м<sup>3</sup>/кг.

2.5.  $V_{RO} = 0,9$  м<sup>3</sup>/кг;  $V_N^0 = 3,89$  м<sup>3</sup>/кг;  $V_{HO}^0 = 0,62$  м<sup>3</sup>/кг;  $V_{Г}^0 = 5,41$  м<sup>3</sup>/кг;  $V_{Г} = 7,156$  м<sup>3</sup>/кг;  $V_{HO} = 0,648$  м<sup>3</sup>/кг.

2.6. При  $W^P = 18 \%$ ;  $V_{RO} = 0,844$  м<sup>3</sup>/кг;  $V_N^0 = 5,155$  м<sup>3</sup>/кг;  $V_{HO}^0 = 0,653$  м<sup>3</sup>/кг;  $V_{Г}^0 = 5,155$  м<sup>3</sup>/кг;  $V_{Г} = 6,802$  м<sup>3</sup>/кг;  $V_{HO} = 0,679$  м<sup>3</sup>/кг.

При  $W^P = 23 \%$ ;  $V_{RO} = 0,793$  м<sup>3</sup>/кг;  $V_N^0 = 3,444$  м<sup>3</sup>/кг;  $V_{HO}^0 = 0,628$  м<sup>3</sup>/кг;  $V_{Г}^0 = 4,864$  м<sup>3</sup>/кг;  $V_{Г} = 6,411$  м<sup>3</sup>/кг;  $V_{HO} = 0,652$  м<sup>3</sup>/кг.

2.7.  $V^0 = 5,046$  м<sup>3</sup>/кг;  $V_{Г}^0 = 5,637$  м<sup>3</sup>/кг.

2.8. Сечение канала 10,289 м<sup>2</sup>. Для первого варианта  $D = 3,62$  м; Для второго варианта  $A = 2,27$  м,  $b = 4,54$  м.

2.9.  $V^0 = 2,41$  м<sup>3</sup>/кг;  $V_{Г} = 3,585$  м<sup>3</sup>/кг.

2.10. При  $\alpha = 1,2$   $V_{RO} = 0,68$  м<sup>3</sup>/кг;  $r_{RO} = 0,142$ ;  $V_{HO} = 0,571$  м<sup>3</sup>/кг;  $r_{HO} = 0,119$ . При  $\alpha = 1,3$   $V_{RO} = 0,68$  м<sup>3</sup>/кг;  $r_{RO} = 0,132$ ;  $V_{HO} = 0,577$  м<sup>3</sup>/кг;  $r_{HO} = 0,112$ .

2.11. 1,868 м<sup>3</sup>/кг.

2.12. 1,86 м<sup>3</sup>/кг.

2.13.  $8,89 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

2.14.  $\rho = 0,714 \text{ кг/м}^3$ ,  $\nu = 1,4 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

2.15.  $19,2 \text{ кг}$ .

2.16.  $33981 \text{ кДж/м}^3$  или  $8109 \text{ ккал/м}^3$ .

2.17.  $28 \%$ .

2.18.  $13,9 \text{ кг/кг}$  или  $10,8 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

3.1.  $2508 \text{ кДж/кг}$  при сжигании АШ;  $1713 \text{ кДж/кг}$  при сжигании назаровского бурого угля.

3.2. Энтальпия уменьшится с  $1314$  до  $1148 \text{ кДж/кг}$ .

4.1.  $19060 \text{ кДж/кг}$ .

4.2. Увеличится с  $13498$  до  $13730 \text{ кДж/кг}$ .

4.3. Увеличится с  $19557,4$  до  $19959,5 \text{ кДж/кг}$ .

4.4. При влажности  $50 \%$  располагаемое тепло  $Q_p^p = 8255 \text{ кДж/кг}$  и энтальпия уходящих газов  $H_{yx} = 899 \text{ кДж/кг}$ . При снижении влажности до  $40 \%$   $Q_p^p = 10390 \text{ кДж/кг}$  и  $H_{yx} = 1017,8 \text{ кДж/кг}$ .

5.1. Переход на разомкнутую схему сушки повышает адиабатную температуру горения на  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ .

5.2. Увеличение рециркуляции на  $1 \%$  снижает адиабатную температуру на горения в среднем на  $9,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

6.1. Значения составляют:  $Q_2 = 1810,4 \text{ кДж/кг}$ ;  $Q_3 = 1210,5 \text{ кДж/кг}$ . В целом  $Q_{p,шп} = 3020,9 \text{ кДж/кг}$ .

6.2. При установке в топке ширм с общей площадью  $1740,8 \text{ м}^2$  значение  $F_{л,т} / V_t$  увеличится с  $0,505$  до  $0,633$ .

7.1.  $Q_{л}$  выросло с  $55,2$  до  $71,7 \text{ кДж/кг}$ .

7.2. При переходе на сжигание твердого топлива  $Q_{л}$  уменьшается с  $1385$  (на мазуте) до  $635 \text{ кДж/с}$ .

7.3.  $Q_{л,ш} = 343 \text{ кДж/кг}$ ;  $\Delta h_{п} = 288 \text{ кДж/кг}$ .

8.1. Экономия топлива составляет  $0,144 \text{ кг/с}$  или  $2,94 \%$ .

8.2. Экономия топлива составляет  $0,26 \text{ кг/с}$  или  $4,8 \%$ .

**РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети / Е.Я. Соколов. – М.: Энергия, 2006.
2. Соколов Е.Я. Промышленные тепловые электростанции / Е.Я. Соколов. – М.: Энергия, 2005.
3. 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.
4. Фокин В.М. Теплогенерирующие установки систем теплоснабжения / В.М. Фокин. – М.: Машиностроение – 1, 2006.
5. Липов Ю.М. Котельные установки и парогенераторы / Ю.М. Липов, Ю.М. Третьяков. – 2-е изд. – М.: 2006.
6. Зыков А.К. Паровые и водогрейные котлы/ А.К. Зыков. – М.: НПО ОБТ, 2006 .
7. 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.
8. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). – 2-е изд. – СПб.: Изд-во НГЮЦКТИ, 1998.
9. Сидельковский Л.Н. Котельные установки промышленных предприятий / Л.Н. Сидельковский, В.Н. Юренев – М.: Энергоатомиздат, 1988.
10. Троянковский Б.М. Паровые и газовые турбины: Сборник задач / Б.М. Троянковский – М.: Энергоатомиздат, 1987.
11. Ривкин С.Л. Термодинамические свойства газов / С.Л. Ривкин – М.: Энергия, 1987.
12. Ривкин С.Л. Термодинамические свойства воды и водяного пара / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
13. Делягин Г.Н. Теплогенерирующие установки / Г.Н. Делягин – М.: Стройиздат, 1986.
14. Ковалев А.П. Парогенераторы / А.П. Ковалев. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
15. Безгрешнов А.Н. Расчет паровых котлов в примерах и задачах / А.Н. Безгрешнов. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
16. Котлы малой и средней мощности и топочные устройства / Отраслевой каталог 15-83. – М.: НИИЭИформэнергомаш, 1983.

17. Эстеркин Р.И. Котельные установки. Курсовое и дипломное проектирование / Р.И. Эстеркин. – Л.: Энергоатомиздат, 1989.

18. Эстеркин Р.И. Противоаварийные тренировки в производственно-отопительных котельных / Р.И. Эстеркин. – Л.: Энергоатомиздат, 1990.

19. Роддатис К.Ф. Справочник по котельным установкам малой производительности / К.Ф. Роддатис, А.Н. Полтарецкий. – М.: Энергоатомиздат, 1989.

20. Безгрешнов А.Н. Расчет паровых котлов в примерах и задачах / А.Н. Безгрешнов. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Расчет характеристик энергетических топлив.....	4
1.1. Состав топлива.....	4
1.2. Теплота сгорания топлива.....	7
2. Расчеты продуктов сгорания топлива.....	11
2.1. Теоретический расход воздуха.....	11
2.2. Состав и объем продуктов сгорания.....	13
3. Пересчеты состава и энтальпии продуктов сгорания.....	19
4. Тепловой баланс парового котла.....	24
5. Теплообмен излучением в топочной камере.....	30
6. Расчет тепловосприятия радиационных поверхностей в топке.....	36
7. Тепловосприятие радиационно-конвективных поверхностей нагрева.....	41
8. Повышение экономичности котельных.....	48
9. Расчет образования оксидов азота.....	56
9.1. Образование термических оксидов азота.....	56
9.2. Концентрации топливных и быстрых оксидов азота. Суммарная концентрация оксидов в газах.....	59
9.3. Особенности расчета оксидов азота при сжигании природного газа.....	61
Ответы.....	67
Рекомендуемая литература.....	69

**Таймаров Михаил Александрович**

**ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ ПО КОТЕЛЬНЫМ УСТАНОВКАМ**

Учебное пособие  
по дисциплине

«Котельные установки и парогенераторы»

Кафедра котельных установок и парогенераторов КГЭУ

Редактор издательского отдела *О.В. Ханжина*  
Компьютерная верстка *О.В. Ханжина*

Подписано в печать 3.03.09.

Формат 60×84/16. Бумага ВХИ. Гарнитура «Times». Вид печати РОМ.  
Усл. печ. л. 4,18. Уч.-изд. л. 4,64. Тираж 500 экз. Заказ № 3399.

Издательство КГЭУ, 420066, Казань, Красносельская, 51  
Типография КГЭУ, 420066, Казань, Красносельская, 51