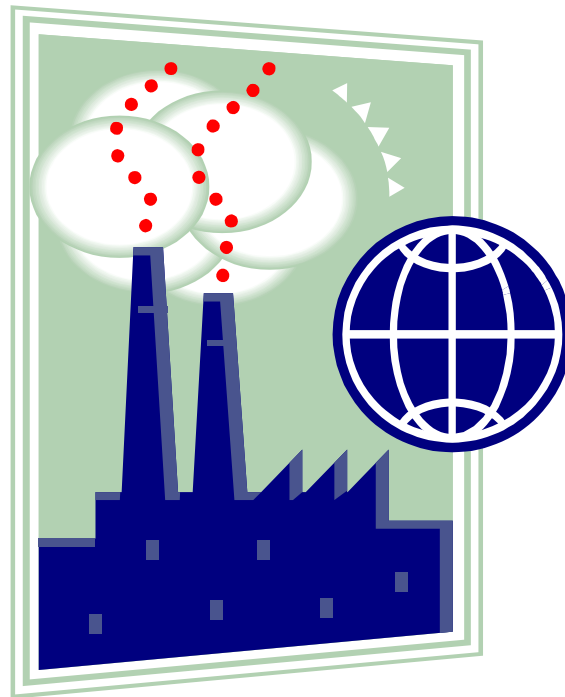


А. В. Барakov, А. А. Надеев

ТОПЛИВО И ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ

Практикум



Воронеж 2021

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

А. А. Надеев, А. В. Бараков

ТОПЛИВО И ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ

Практикум

Воронеж 2021

УДК 621.31(075.8)

ББК 31.3

Н17

Рецензенты:

*кафедра электротехники, теплотехники и гидравлики
ФГБОУ ВО Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г. Ф. Морозова;
д-р техн. наук, проф. В. В. Шитов*

Надеев, А. А.

Топливо и теория горения: практикум / А. А. Надеев, А. В. Бараков; ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. – 77 с.

ISBN

Данный практикум содержит практические задания и порядок выполнения курсового проекта по дисциплинам «Топливо и теория горения» и «Сжигание и термическая переработка топлива». Для их выполнения в практикуме приведены краткие теоретические сведения по основным разделам лекционных курсов.

Издание предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» (профиль «Промышленная теплоэнергетика») всех форм обучения.

Ил. 19. Табл. 37. Библиогр.: 6 назв.

**УДК 621.31(075.8)
ББК 31.3**

*Печатается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

ISBN

© Надеев А. А., Бараков А. В.,
2021

© ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический
университет», 2021

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость глубокого понимания процесса горения различного топлива в энергетических и теплотехнологических установках, а также необходимость проведения расчётов горения на разных его стадиях требуют детального изучения теории горения студентами, обучающимися по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» (профиль «Промышленная теплоэнергетика»).

В данном практикуме представлены практические задания и порядок курсового проектирования по дисциплине «Топливо и теория горения», а также «Сжигание и термическая переработка топлива», которые предназначены для закрепления теоретического материала и получения практических навыков в выполнении теплотехнических расчётов.

В начале каждого раздела приведены краткие теоретические сведения по изучаемому вопросу, а в приложениях – необходимые для расчётов справочные данные.

Некоторые расчётные формулы упрощены и содержат ряд допущений для приближения к решению технических задач горения топлива.

Также приведено задание на курсовой проект, который включает расчётную и графическую части.

1. СОСТАВ И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОПЛИВА

1.1. Краткие теоретические сведения

Элементарный химический состав твёрдых и жидких веществ записывается в виде суммы процентного содержания в них углерода C , водорода H , кислорода O , серы S (органической и колчеданной), азота N , золы (шлака) и влаги. В зависимости от того, какая масса берётся в расчёт, каждому химическому символу присваивается соответствующий надстрочный индекс.

Тот вид, в котором твёрдое и жидкое топливо поступает к потребителю, называется рабочим. В этом случае элементарный химический состав записывается в следующем образом:

$$C^P + H^P + S_{o+k}^P + N^P + O^P + A^P + W^P = 100 \%, \quad (1.1)$$

где C^P , H^P , S_{o+k}^P , N^P , O^P – содержание в рабочей массе топлива соответствующих компонентов, %;

A^P – зольность топлива, %;

W^P – влажность топлива, %.

Нижние индексы «о» и «к» у серы означают соответственно органическую и колчеданную серу, которые вступают в реакцию с кислородом.

В процессе транспортировки топлива и при его хранении содержание балластирующих компонентов (золы и влаги) может измениться. В этом случае применяются понятия сухой и горючей массы топлива.

Состав сухой массы топлива имеет следующий вид:

$$C^c + H^c + S_{о+к}^c + N^c + O^c + A^c = 100 \%, \quad (1.2)$$

а горючей

$$C^g + H^g + S_{о+к}^g + N^g + O^g + A^g = 100 \%. \quad (1.3)$$

Пересчёт элементарного состава топлива с одной массы на другую проводится по формулам, приведённым в табл. 1.1.

Пересчёт элементарного химического состава рабочей массы топлива при изменении его влажности или зольности производится по формулам

$$X_2^p = X_1^p \cdot \frac{100 - W_2^p}{100 - W_1^p}; \quad (1.4)$$

$$X_2^p = X_1^p \cdot \frac{100 - A_2^p}{100 - A_1^p}, \quad (1.5)$$

где X_1^p , X_2^p – значение любого компонента в составе рабочей массы топлива при W_1^p (A_1^p) и при W_2^p (A_2^p), соответственно, %.

Таблица 1.1

Формулы для определения состава расчётных масс топлива

Заданная масса	Искомая масса		
	Рабочая	Сухая	Горючая
Рабочая	1	$\frac{100}{100 - W^p}$	$\frac{100}{100 - (W^p + A^p)}$
Сухая	$\frac{100 - W^p}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^c}$
Горючая	$\frac{100 - (W^p + A^p)}{100}$	$\frac{100 - A^c}{100}$	1

Для сланцев пересчёт с рабочей массы на горючую осуществляется с помощью коэффициента, вычисляемого по формуле

$$K = \frac{100}{100 - A_u^p - W^p - (CO_2)_k^p}, \quad (1.6)$$

где A_u^p – истинная зольность рабочей массы, %;

$(CO_2)_k^p$ – содержание углекислоты карбонатов, %.

Истинная зольность рабочей массы вычисляется по формуле

$$A_u^p = A^p - \left[2,5 \cdot (S_{o+k}^c - S_c^c) + 0,375 \cdot S_k^c \right] \cdot \frac{100 - W^p}{100}, \quad (1.7)$$

где S_{o+k}^c – содержание органической и колчеданной серы в сухой массе топлива, %;

S_c^c – содержание сульфатной серы в сухой массе топлива, %.

Величина $\left[2,5 \cdot (S_{o+k}^c - S_c^c) + 0,375 \cdot S_k^c \right]$ в формуле (1.7) для ленинградских и эстонских сланцев может быть принята равной 2,0, для кашпирских сланцев – 4,1 (см. прил. 2).

Средний состав смеси, состоящей из двух твёрдых (жидких) топлив, вычисляется по формуле

$$X_{см} = m \cdot X_1 + (1 - m) \cdot X_2, \quad (1.8)$$

где X_1, X_2 – значение любого компонента в составе рабочей (сухой, горючей) массы первого и второго топлива, соответственно, %;

m – массовая доля первого топлива в смеси.

Массовая доля вычисляется по формуле

$$m = \frac{M_1}{M_1 + M_2}, \quad (1.9)$$

где M_1, M_2 – массы первого и второго топлив, составляющих смесь, кг.

Состав влажного газообразного топлива задаётся в виде процентного содержания реальных горючих и негорючих газов:

$$CO^B + CO_2^B + C_m H_n^B + H_2^B + O_2^B + \dots + H_2O = 100 \%. \quad (1.10)$$

Поскольку количество водяного пара в топливе обычно задаётся в виде влагосодержания, то его процентное содержание будет равно

$$H_2O = \frac{d_2}{803,6 + d_2} \cdot 100, \quad (1.11)$$

где d_2 – влагосодержание топлива, г/м³.

Пересчёт содержания любого компонента при наличии влаги в газообразном топливе определяется соотношением

$$X^B = X^C \cdot K, \quad (1.12)$$

где X^C , X^B – содержание любого компонента в сухом газе и во влажном газе, соответственно, %;

K – коэффициент, вычисляемый по формуле

$$K = \frac{100 - H_2O}{100}.$$

Одним из важнейших параметров топлива является теплота сгорания. Теплота сгорания топлива – это количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании одного килограмма твёрдого (жидкого) топлива или одного нормального кубического метра газообразного топлива. Это количество теплоты зависит от агрегатного состояния влаги, которая всегда присутствует в зоне горения. Различают высшую и низшую теплоту сгорания. Наиболее часто в теплотехнических расчётах применяется вторая.

Под низшей теплотой сгорания топлива понимают количество тепла, выделяющееся при полном сгорании топлива, за вычетом тепла, затраченного на парообразование содержащейся в нём влаги.

На практике теплота сгорания твёрдых (жидких) топлив вычисляется по эмпирическим формулам, основанным на знании их элементарного химического состава. Наибольшее распространение получила формула Д.И. Менделеева:

$$Q_n^p = 4,19 \cdot \left[81 \cdot C^p + 246 \cdot H^p - 26 \cdot (O^p - S_{o+k}^p) - 6 \cdot W^p \right], \text{ кДж/кг.} \quad (1.13)$$

Здесь коэффициент «4,19» предназначен для перевода количества теплоты, выраженного в калориях, в джоули.

Под высшей теплотой сгорания топлива понимают количество тепла, выделяющееся при полном сгорании топлива и при условии конденсации образующихся в продуктах сгорания водяных паров. Она вычисляется по формуле

$$Q_g^p = Q_n^p + 255 \cdot H^p + 25 \cdot W^p, \text{ кДж/кг.} \quad (1.14)$$

Теплота сгорания газообразного топлива определяется суммированием теплоты сгорания его отдельных компонентов:

$$Q_n^p = 127 \cdot CO + 108 \cdot H_2 + 358 \cdot CH_4 + 636 \cdot C_2H_6 + 913 \cdot C_3H_8 + \\ + 560 \cdot C_2H_4 + 234 \cdot H_2S, \text{ кДж/м}^3. \quad (1.15)$$

Если в топливе содержится до 3 % других непредельных углеводородов, то при определении теплоты сгорания по формуле (1.15) их можно принимать за этилен (C_2H_4).

В процессе хранения и транспортировки топлива содержание балласта в нём может измениться. В этом случае теплота сгорания Q_n^p пересчитывается по формуле:

$$Q_{n2}^p = (Q_{n1}^p + 25,1 \cdot W_1^p) \cdot \frac{100 - (W_2^p + A_2^p)}{100 - (W_1^p + A_1^p)} - 25,1 \cdot W_2^p, \quad (1.16)$$

где Q_{n1}^p , Q_{n2}^p – низшая рабочая теплота сгорания топлива, соответствующая параметрам W_1^p , A_1^p и W_2^p , A_2^p , соответственно, кДж/кг.

Если сжигается смесь двух однородных топлив, имеющих различную теплоту сгорания, то теплота сгорания смеси вычисляется по формуле

$$Q_{n см}^p = x \cdot Q_{n1}^p + (1 - x) \cdot Q_{n2}^p, \text{ кДж/кг (кДж/м}^3), \quad (1.17)$$

где Q_{n1}^p и Q_{n2}^p – теплоты сгорания составляющих смесь топлив, кДж/кг (кДж/м³);

x – массовая или объёмная доля первого топлива в смеси.

Для смеси твёрдого (жидкого) топлива с газообразным топливом расчёт производится на 1 кг твёрдого (жидкого) топлива с учётом приходящегося на него количества газообразного топлива, т.е.

$$Q_{n см}^p = Q_{n1}^p + n \cdot Q_{n2}^p, \text{ кДж/кг,} \quad (1.18)$$

где Q_{n1}^p – теплота сгорания твёрдого (жидкого) топлива, кДж/кг;

Q_{n2}^p – теплота сгорания газообразного топлива, кДж/м³;

n – объём газообразного топлива, приходящийся на 1 кг твёрдого (жидкого) топлива, м³/кг.

Для сравнения тепловой ценности различных видов топлива применяется понятие условного топлива. Условное топливо – это абстрактное топливо (твёрдое, жидкое или газообразное), имеющее теплоту сгорания, равную 29300 кДж/кг (кДж/м³).

Пересчёт расхода реального топлива на эквивалентный расход условного топлива осуществляется по формуле

$$B_{ум} = B \cdot \mathcal{E}, \quad (1.19)$$

где $B_{ум}$ и B – расход условного и натурального топлива, соответственно, кг/с (или кг);

\mathcal{E} – тепловой эквивалент топлива, определяемый по формуле

$$\mathcal{E} = \frac{Q_n^p}{29300}. \quad (1.20)$$

При рассмотрении условий работы котлов на различных видах топлива пользуются следующими приведёнными характеристиками:

- приведённая влажность

$$W^{np} = \frac{W^p}{Q_n^p}, \text{ (\%}\cdot\text{кг)/МДж}; \quad (1.21)$$

- приведённая влажность

$$A^{np} = \frac{A^p}{Q_n^p}, \text{ (\%}\cdot\text{кг)/МДж}; \quad (1.22)$$

- приведённая сернистость

$$S^{np} = \frac{S_{o+k}^p}{Q_n^p}, \text{ (\%}\cdot\text{кг)/МДж}. \quad (1.23)$$

По ним производится классификация топлива, выбирается система пыле-приготовления и некоторые параметры процесса горения.

1.2. Практические задания

1.1. Определить состав рабочей массы мазута, если задан состав его горючей массы: $C^r = 85 \%$; $H^r = 2,6 \%$; $O^r = 3 \%$; $S_{o+k}^p = 8,8 \%$; $N^r = 0,6 \%$, и извест-

но, что рабочая влажность W^P составляет 10 %, а зольность сухой массы A^c составляет 0,3 %.

1.2. Определить состав горючей массы угля, если в справочнике задан следующий состав его рабочей массы: $C^P = 48,5$ %; $H^P = 3,6$ %; $S_{o+k}^P = 6,1$ %; $N^P = 0,8$ %; $O^P = 4,0$ %. Зольность сухой массы топлива составляет 33,0 %, а рабочая влажность – 6,0 %.

1.3. Определить состав рабочей массы сланцев, добываемых в Ленинградской области, если состав их горючей массы составляет $C^Г = 74,0$ %; $H^Г = 9,5$ %; $S_{o+k}^Г = 6,1$ %; $N^Г = 0,4$ %; $O^Г = 10,0$ %. Зольность рабочей массы топлива составляет 46,0 %, рабочая влажность – 11,5 %, $(CO_2)_к^P = 16,4$ %.

1.4. Определить состав горючей массы эстонских сланцев, добываемых в шахтах и разрезе «Вивиконд» (прил. 2).

1.5. Определить состав рабочей массы угля, если в справочнике задан следующий его состав: $C^P = 38,6$ %; $H^P = 2,6$ %; $O^P = 3,1$ %; $S_{o+k}^P = 3,8$ %; $N^P = 0,8$ %; $A^P = 40,1$ %; $W^P = 11,0$ %, а технический анализ показал, что в действительности влажность его составляет $W^P = 16$ %.

1.6. В топке котла сжигается смесь, состоящая из 3 т угля Донбасского месторождения марки Д, класса Р (состав указан в прил. 1) и 4,5 т угля состава: $C^P = 55,2$ %; $H^P = 3,8$ %; $S_{o+k}^P = 3,2$ %; $N^P = 1,0$ %; $O^P = 5,8$ %; $A^P = 23,0$ %; $W^P = 8,0$ %. Определить состав рабочей смеси.

1.7. Определить химический состав влажного природного газа, если известен его сухой состав: $CH_4 = 89$ %; $C_2H_6 = 3,1$ %; $C_3H_8 = 1,3$ %; $C_4H_{10} = 1,0$ %; $N_2 = 5,6$ %, а его влагосодержание равно $d_2 = 63,1$ г/м³.

1.8. Вычислить высшую и низшую теплоту сгорания мазута, имеющего следующий состав: $C^Г = 86,5$ %; $H^Г = 10,6$ %; $O^Г = 0,2$ %; $S^Г = 2,1$ %; $N^Г = 0,6$ %. Его влажность $W^P = 10$ %, а зольность $A^P = 0,3$ %.

1.9. Вычислить теплоту сгорания сухого природного газа, имеющего состав: $CH_4 = 89,9$ %; $C_2H_6 = 3,1$ %; $C_3H_8 = 0,9$ %; $C_4H_{10} = 0,4$ %; $N_2 = 5,2$ %; $CO_2 = 0,3$ %; $O_2 = 0,2$ %.

1.10. Определить низшую рабочую теплоту сгорания угля Донбасского месторождения марки Д, класса Р, если технический анализ показал, что влажность его рабочей массы составляет 18 %, а зольность – 13 %.

1.11. Определить теплоту сгорания природного газа газопровода Минск-Москва, если технический анализ показал, что его влагосодержание $d_2 = 60$ г/м³.

1.12. Определить теплоту сгорания смеси газов, состоящей из 60 % природного газа состава: $CH_4 = 98$ %; $C_2H_6 = 0,4$ %; $C_3H_8 = 0,2$ %; $N_2 = 1,3$ %; $CO_2 = 0,1$ % и 40 % природного газа состава: $CH_4 = 25,5$ %; $H_2S = 2,3$ %; $CO = 6,5$ %; $H_2 = 59,5$ %; $N_2 = 3,3$ %; $CO_2 = 2,4$ %; $O_2 = 0,5$ %.

1.13. Определить теплоту сгорания смеси, состоящей из топочного мазута марки М-100, имеющего состав: $C^p = 83,4 \%$; $H^p = 10,0 \%$; $O^p = 0,1 \%$; $S_{o+k}^p = 2,9 \%$; $N^p = 3,0 \%$; $A^p = 0,3 \%$; $W^p = 0,3 \%$ и природного газа, имеющего состав: $CH_4 = 88 \%$; $C_2H_6 = 1,9 \%$; $C_2H_4 = 0,5 \%$; $CO_2 = 3 \%$; $N_2 = 6,6 \%$, если известно, что в топке парогенератора совместно сжигают $8,33 \text{ кг/с}$ мазута и $2,78 \text{ м}^3/\text{с}$ природного газа.

1.14. Определить теплоту сгорания смеси, состоящей из 50 % мазута, состав которого приведён в задаче 1.4 и 50 % угля Донбасского месторождения марки Д, класса Р (см. прил. 1).

1.15. Определить высшую теплоту сгорания рабочей массы угля, его приведённую влажность, приведённую зольность, приведённую сернистость и тепловой эквивалент. Состав топлива следующий: $C^p = 28,7 \%$; $H^p = 2,2 \%$; $S_{o+k}^p = 2,7\%$; $N^p = 0,6 \%$; $O^p = 8,6\%$; $A^p = 25,2\%$; $W^p = 32\%$.

1.16. На топливном складе котельной станции, в которой установлены различные котлы, хранится 50 т угля состава: $C^p = 62,7 \%$; $H^p = 3,1 \%$; $S_{o+k}^p = 2,8 \%$; $N^p = 0,9 \%$; $O^p = 1,7 \%$; $A^p = 23,8 \%$; $W^p = 5,0 \%$, и 60 т угля состава: $C^p = 63,8 \%$; $H^p = 1,2 \%$; $S_{o+k}^p = 1,7 \%$; $N^p = 0,6 \%$; $O^p = 1,3 \%$; $A^p = 22,9 \%$; $W^p = 8,5 \%$. Определить время работы котлов, если известно, что котлы, работающие первом угле, расходуют $2 \cdot 10^3 \text{ кг/ч}$ условного топлива, а котлы, работающие на втором угле – $2,3 \cdot 10^3 \text{ кг/ч}$ условного топлива.

1.17. В котельной за 10 часов сжигается 10^6 кг угля состава: $C^p = 55,2 \%$; $H^p = 3,8 \%$; $S_{o+k}^p = 3,2 \%$; $N^p = 1,0 \%$; $O^p = 5,8 \%$; $A^p = 3,0\%$; $W^p = 8,0 \%$. Определить часовую потребность котельной в условном топливе.

1.3 Задание № 1 на курсовой проект

1. Для заданного вида твёрдого топлива (прил. 1) определить состав его рабочей массы, если реальное значение его влажности составляет 0; 50; 100; 150; 200 % от табличного (заданного) значения. Результаты вычислений занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Состав рабочей массы твёрдого топлива

Состав топлива, %	Искомый состав рабочей массы топлива				
	0 %	50 %	100 %	150 %	200 %
1	2	3	4	5	6
W^p					
A^p					
C^p					

Окончание табл. 1.2

1	2	3	4	5	6
H^P					
S_{o+k}^P					
N^P					
O^P					

2. Для заданного вида газообразного топлива (прил. 4) определить его состав, если его влагосодержание равно 0; 10; 20; 30; 40; 50; 60 г/м³. Результаты вычислений занести в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Состав газообразного топлива

Состав топлива, %	Искомый состав газообразного топлива							
	d_2 , г/м ³	0	10	20	30	40	50	60
H_2O								
CH_4								
C_2H_6								
C_3H_8								
C_4H_{10}								
C_5H_{12}								
N_2								
CO_2								

3. Для заданного вида твёрдого топлива (прил. 1) определить низшую рабочую теплоту сгорания, если реальное значение его влажности равно 0; 50; 100; 150; 200 % от справочного (табличного) значения. Расчёт производить по формуле (1.13). Результаты вычислений занести в табл. 1.4. Построить график зависимости $Q_n^P = f_1(W^P)$.

Таблица 1.4

Теплота сгорания твёрдого топлива

Доля влаги	0 %	50 %	100 %	150 %	200 %
W^P , %					
Q_n^P , кДж/кг					

4. Для заданного вида газообразного топлива (прил. 4) определить состав низшую рабочую теплоту сгорания, если его влагосодержание равно 0; 10; 20; 30; 40; 50; 60 г/м³. Результаты вычислений занести в табл. 1.5. Построить график зависимости $Q_n^p = f_2(d_2)$.

Таблица 1.5

Теплота сгорания газообразного топлива

$d_2, \text{г/м}^3$	0	10	20	30	40	50	60
$Q_n^p, \text{кДж/м}^3$							

2. МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

2.1. Краткие теоретические сведения

Целью составления материального баланса процесса горения является определение количества окислителя, необходимого для полного сгорания единицы количества топлива (1 кг или 1 м³), и количества образующихся при этом продуктов сгорания.

Теоретический расход воздуха для полного сгорания 1 кг твёрдого (жидкого) топлива определяется по формуле

$$V_g^o = 0,0889 \cdot (C^p + 0,375 \cdot S_{o+k}^p) + 0,265 \cdot H^p - 0,0333 \cdot O^p, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (2.1)$$

Аналогично для газообразного топлива:

$$V_g^o = 0,0476 \cdot [0,5 \cdot \text{CO} + 0,5 \cdot \text{H}_2 + 1,5 \cdot \text{H}_2\text{S} + \sum_{i=1}^n \left(m + \frac{n}{4} \right) \cdot \text{C}_m\text{H}_n - \text{O}_2], \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (2.2)$$

При подаче в зону горения окислителя в теоретическом количестве процесс горения будет не полным. Это приведёт к потерям теплоты вследствие химического недожога. Для снижения величины химического недожога в зону горения необходимо подавать действительное количество воздуха, определяемое по формуле

$$V_g = \alpha \cdot V_g^o, \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ (м}^3/\text{кг)}, \quad (2.3)$$

где α – коэффициент избытка воздуха.

Оптимальные значения коэффициент избытка воздуха следующие: для твёрдого топлива $\alpha_{opt} = 1,25-1,7$; для мазута $\alpha_{opt} = 1,25$; для газообразного топлива $\alpha_{opt} = 1,05-1,15$;

В состав продуктов сгорания топлива входят следующие газы: углекислый газ CO_2 , оксид серы SO_2 , водяной пар H_2O , азот N_2 , а также избыточный воздух.

Теоретический объём продуктов сгорания для любого топлива будет равен сумме трёхатомных газов и теоретического объёма азота и водяного пара:

$$V_z^o = V_{RO_2} + V_{N_2}^o + V_{H_2O}^o, \text{ м}^3/\text{кг} (\text{м}^3/\text{м}^3). \quad (2.4)$$

При сжигании твёрдого (кроме сланцев) и жидкого топлива теоретический объём каждого компонента в (2.4) будет равен:

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2} = 0,01866 \cdot (C^p + 0,375 \cdot S_{o+k}^p), \text{ м}^3/\text{кг}; \quad (2.5)$$

$$V_{N_2}^o = 0,79 \cdot V_g^o + 0,008 \cdot N^p, \text{ м}^3/\text{кг}; \quad (2.6)$$

$$V_{H_2O}^o = 0,111 \cdot H^p + 0,0124 \cdot W^p + 0,0161 \cdot V_g^o, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (2.7)$$

Для сланцев объём трёхатомных газов определяется по формуле

$$V_{RO_{2k}} = V_{RO_2} + \left[\frac{0,509 \cdot (CO_2)_k^p}{100} \right] \cdot K, \quad (2.8)$$

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

Аналогичные (2.5) - (2.7) соотношения для газообразного топлива имеют следующий вид:

$$V_{RO_2} = 0,01 \cdot (CO_2 + CO + H_2S + \sum m \cdot C_m H_n), \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (2.9)$$

$$V_{N_2}^o = 0,79 \cdot V_g^o + 0,01 \cdot N_2, \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (2.10)$$

$$V_{H_2O}^o = 0,01 \cdot \left(H_2 + H_2S + \sum \frac{n}{2} \cdot C_m H_n + 0,124 \cdot d_z \right) + 0,0161 \cdot V_g^o, \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (2.11)$$

Действительный общий объём продуктов сгорания для топлива определяется по формуле

$$V_z = V_z^o + 1,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_g^o, \text{ м}^3/\text{кг} (\text{м}^3/\text{м}^3). \quad (2.12)$$

Общий объём продуктов сгорания V_2 разделяют на объём сухих газов V_{ce} , который включает объём трёхатомных газов, азота и объём избыточного воздуха, подаваемого в топку, и общий объём водяных паров

$$V_{ce} = V_{RO_2} + V_{N_2}^o + (\alpha - 1) \cdot V_g^o, \text{ м}^3/\text{кг} (\text{м}^3/\text{м}^3); \quad (2.13)$$

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^o + 0,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_g^o, \text{ м}^3/\text{кг} (\text{м}^3/\text{м}^3). \quad (2.14)$$

При сжигании смеси двух однородных топлив теоретический расход воздуха вычисляется по общей формуле

$$V_{г\text{ см}}^o = x \cdot V_{г1}^o + (1 - x) \cdot V_{г2}^o, \text{ м}^3/\text{кг} (\text{м}^3/\text{м}^3), \quad (2.15)$$

где x – доля первого топлива в смеси.

Если сжигается смесь разнородных топлив, т.е. смесь твёрдого (жидкого) и газообразного топлива, то теоретический расход воздуха вычисляется по формуле

$$V_{г\text{ см}}^o = V_{г1}^o + n \cdot V_{г2}^o, \text{ м}^3/\text{кг} (\text{м}^3/\text{м}^3), \quad (2.16)$$

где n – количество газообразного топлива, приходящееся на 1 кг твёрдого или жидкого топлива, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Аналогично рассчитывается объём трёхатомных газов ($V_{RO_2\text{ см}}^o$), азота ($V_{N_2\text{ см}}^o$) и водяных паров ($V_{H_2O\text{ см}}^o$).

Если сжигание твёрдого (жидкого) топлива производится с недостаточным количеством окислителя ($\alpha < 1$), то расчётные формулы для составления материального баланса имеют следующий вид:

- расход воздуха

$$V_g = 0,0889 \cdot [(1 - y_H) \cdot C^p + 0,375 \cdot S_{O+K}^p] + 0,0445 \cdot y_H \cdot C^p + 0,265 \cdot H^p - 0,0333 \cdot O^p, \text{ м}^3/\text{кг}; \quad (2.17)$$

- объём трёхатомных газов

$$V_{RO_2} = 0,0187 \cdot [(1 - y_H) \cdot C^p + 0,375 \cdot S_{O+K}^p], \text{ м}^3/\text{кг}; \quad (2.18)$$

- объём окиси углерода

$$V_{CO} = 0,0187 \cdot y_H \cdot C^p, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (2.19)$$

В формулах (2.17) - (2.19) y_n – доля углерода, входящего в состав топлива, которая в процессе горения окисляется до окиси углерода CO.

Объём азота при неполном сжигании определяется по формуле (2.6), а водяного пара – по формуле (2.7).

Коэффициент избытка воздуха по данным газового анализа продуктов сгорания определяется по формуле

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_{2изб}}, \quad (2.20)$$

где $O_{2изб}$ – избыточное содержание кислорода, %.

Содержание кислорода вычисляется по формуле

$$O_{2изб} = O_2 - 0,5 \cdot CO - 0,5 \cdot H_2 - 2 \cdot CH_4, \quad (2.21)$$

где O_2 , CO , H_2 , CH_4 – содержание соответствующих компонентов в продуктах сгорания, %.

Максимальное содержание трёхатомных газов в сухих газах при полном сгорании топлива вычисляется по формуле

$$RO_2^{\max} = \frac{21}{1 + \beta}, \quad (2.22)$$

где β – топливный коэффициент Бунте.

Топливный коэффициент вычисляется по следующим формулам:

- для твёрдого и жидкого топлива

$$\beta = 2,35 \cdot \frac{H^p - 0,126 \cdot O^p + 0,04 \cdot N^p}{C^p + 0,375 \cdot S_{o+k}^p}; \quad (2.23)$$

- для газообразного топлива

$$\beta = 0,21 \cdot \frac{0,01 \cdot N_2 + 0,79 \cdot V_6^o}{V_{RO_2}}. \quad (2.24)$$

Содержание азота N_2 и кислорода O_2 в сухих газах при полном сгорании топлива вычисляется по формулам

$$N_2 = 100 - RO_2 - O_2, \quad (2.25)$$

$$O_2 = 21 - \beta \cdot RO_2 - RO_2, \quad (2.26)$$

Масса продуктов сгорания, выделившихся при сгорании твёрдого и жидкого топлива, складывается из обеззоленной массы топлива и воздуха, подаваемого для горения, т.е.

$$G_2 = 1 - 0,01 \cdot A^p + 1,306 \cdot \alpha \cdot V_6^o, \text{ кг/кг.} \quad (2.27)$$

Концентрация золы в продуктах сгорания вычисляется по формуле

$$\mu = \frac{10 \cdot A^p \cdot a_{yn}}{V_2}, \text{ г/м}^3. \quad (2.28)$$

где a_{yn} – коэффициент уноса золы (доля золы топлива, уносимой продуктами его сгорания). Для пылеугольных топок $a_{yn} = 0,95$, для слоевых топок $a_{yn} = 0,25$.

Масса продуктов сгорания, выделившихся при сгорании сланцев вычисляется по формуле

$$G_2 = 1 - 0,01 \cdot A_k^p + 1,306 \cdot \alpha \cdot V_6^o + 0,01 \cdot (\text{CO}_2)_k^p \cdot K, \text{ кг/кг.} \quad (2.29)$$

где A_k^p – расчётное содержание золы в топливе с учётом неразложившихся карбонатов, %. Данный параметр вычисляется по формуле:

$$A_k^p = A^p + (1 - K) \cdot (\text{CO}_2)_k^p. \quad (2.30)$$

Масса продуктов сгорания, выделившихся при сгорании газообразного топлива вычисляется по формуле

$$G_2 = \rho_2^c + \frac{d_2}{1000} + 1,306 \cdot \alpha \cdot V_6^o, \text{ кг/м}^3, \quad (2.31)$$

где ρ_2^c – плотность сухого газообразного топлива, кг/м³.

Плотность сухого газа приведена в [4]. Также её можно вычислить по формуле

$$\rho_2^c = 0,01 \cdot [1,96 \cdot \text{CO}_2 + 1,52 \cdot \text{H}_2\text{S} + 1,25 \cdot \text{N}_2 + 1,43 \cdot \text{O}_2 + 1,25 \cdot \text{CO} + 0,0899 \cdot \text{H}_2 + \sum (0,536 \cdot m + 0,045 \cdot n) \cdot \text{C}_m\text{H}_n]. \quad (2.32)$$

2.2. Практические задания

2.1. Для топлива, состав которого приведён в задаче 1.4, определить теоретический и действительный объёмы воздуха и продуктов сгорания, если коэффициент избытка воздуха равен 1,25.

2.2. Для топлива, состав которого приведён в задаче 1.5, определить теоретический и действительный объёмы воздуха и продуктов сгорания, если коэффициент избытка воздуха равен 1,10.

2.3. Определить теоретический и действительный объёмы воздуха, необходимые для сжигания 1000 кг угля, имеющего следующий состав: $C^p = 55,2 \%$; $H^p = 3,8 \%$; $S_{o+k}^p = 3,2 \%$; $N^p = 1,0 \%$; $O^p = 5,8 \%$; $A^p = 23,0 \%$; $W^p = 8,0\%$. Коэффициент избытка воздуха в топке котла $\alpha_m = 1,3$.

2.4. Для смеси топлив, состав которых приведён в задаче 1.8, определить теоретический и действительный объёмы воздуха и продуктов сгорания, если коэффициент избытка воздуха равен 1,10.

2.5. Определить действительный объём воздуха, необходимый для сжигания 800 кг/ч угля состава: $C^p = 45,0 \%$; $H^p = 2,6 \%$; $S_{o+k}^p = 1,7 \%$; $N^p = 0,4 \%$; $O^p = 9,9 \%$; $A^p = 11,4 \%$; $W^p = 29,0 \%$, и 500 кг/ч угля состава: $C^p = 43,4\%$; $H^p = 2,9 \%$; $S_{o+k}^p = 0,8 \%$; $N^p = 0,8 \%$; $O^p = 7,0 \%$; $A^p = 38,1 \%$; $W^p = 7,0 \%$. Коэффициенты избытка воздуха в топочной камере котельного агрегата соответственно равны 1,4 и 1,3.

2.6. Определить теоретический и действительный объём воздуха, необходимый для сжигания 2000 м³/ч газообразного топлива состава: $CH_4 = 92,8 \%$; $C_2H_6 = 2,8 \%$; $C_3H_8 = 0,9 \%$; $C_4H_{10} = 0,4 \%$; $C_5H_{12} = 0,1 \%$; $N_2 = 2,5 \%$; $CO_2 = 0,5 \%$, и 1000 м³/ч газообразного топлива, состава: $CH_4 = 89,7 \%$; $C_2H_6 = 5,2 \%$; $C_3H_8 = 1,7 \%$; $C_4H_{10} = 0,5 \%$; $C_5H_{12} = 0,1\%$; $N_2 = 2,7 \%$; $CO_2 = 0,1 \%$. Коэффициенты избытка воздуха в топочной камере составляют соответственно 1,15 и 1,1.

2.7. Определить теоретический объём воздуха, необходимый для сжигания 1500 кг сланцев при известном составе их горючей массы: $C^r = 74,0 \%$; $H^r = 9,5 \%$; $S_{o+k}^r = 6,1 \%$; $N^r = 0,4 \%$; $O^r = 10,0 \%$; $A^r = 46,0\%$; $W^r = 11,5 \%$. Содержание углекислоты карбонатов $(CO_2)_k^p$ составляет 16,4 %.

2.8. В топке котельного агрегата сжигается уголь воркутинского месторождения марки Ж, класса Р (прил. 1). Определить объём сухих газов при полном сгорании данного топлива. Коэффициент избытка воздуха в топке составляет 1,3.

2.9. Определить объём водяных паров при полном сгорании 10 кг/ч фрезерного торфа (прил. 2) при коэффициентах избытка воздуха в топке, равных 1,3 и 1,4.

2.10. Из результатов химического анализа состава продуктов сгорания на выходе из топки получены следующие данные: $O_2 = 5 \%$; $CO = 1 \%$; $H_2 = 2 \%$; $CH_4 = 1,75 \%$. Определить коэффициент избытка воздуха.

2.11. После проведения химического анализа состава продуктов сгорания за топкой и на выходе из котла получены следующие данные: $O_2^m = 4 \%$; $CO^m = 1,5 \%$; $H_2^m = 1 \%$; $O_2^{yx} = 6 \%$; $CO^{yx} = 1 \%$; $H_2^{yx} = 0,5 \%$. Определить присосы воздуха в котле.

2.12. Произвести расчёт материального баланса процесса неполного горения кокса следующего состава: $C^p = 95,5 \%$; $H^p = 0,4 \%$; $O^p = 0,9 \%$; $S_{o+k}^p = 1 \%$; $N^p = 1,2 \%$; $W^p = 1 \%$, если $y_n = 0,28$.

2.13. Вычислить объём двух- и трёхатомных газов, а также содержание CO_2 и SO_2 в сухих газах (продуктах сгорания), получаемых при полном сгорании 1 кг угля следующего состава: $C^p = 62,7 \%$; $H^p = 3,1 \%$; $S_{o+k}^p = 2,8 \%$; $N^p = 0,9 \%$; $O^p = 1,7 \%$; $A^p = 23,8 \%$; $W^p = 5,0 \%$. Известно, что дымовые газы при полном сгорании содержат $RO_2^{\max} = 18,8 \%$.

2.14. Для угля Донбасского месторождения марки Д, класса Р (состав указан в прил. 1), вычислить массу выделившихся продуктов сгорания и концентрацию золы в них, если сжигание топлива производится в слоевой и пылеугольной топках котельного агрегата, а коэффициент избытка воздуха составляет 1,25.

2.15. Определить массу продуктов сгорания и концентрацию золы в них, если слоевым методом сжигается 1 кг сланцев Ленинградского месторождения и известно, что $(CO_2)_k^p = 16,4 \%$. Коэффициент уноса золы $a_{yn} = 0,9$, коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,3$.

2.16. Для газообразного топлива, состав которого приведён в задаче 1.5, вычислить массу выделившихся продуктов сгорания, если его влагосодержание составляет 50 г/м^3 , а коэффициент избытка воздуха равен 1,1.

2.3. Задание № 2 на курсовой проект

1. Для заданного вида твёрдого топлива определить расход воздуха, необходимый для его полного сжигания, и объём выделившихся продуктов сгорания, если коэффициент избытка воздуха имеет следующие значения: $\alpha = 1,25$; $1,50$; $1,75$.

2. Для приведённых выше условий для пылеугольной и слоевой топок котельного агрегата вычислить массу выделившихся продуктов сгорания и концентрацию золы в них.

3. Результаты вычислений занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Материальный баланс для твёрдого топлива

α	1,25	1,50	1,75
$V_g^o, \text{м}^3/\text{кг}$			
$V_g, \text{м}^3/\text{кг}$			
$V_{\text{RO}_2}, \text{м}^3/\text{кг}$			
$V_{\text{N}_2}^o, \text{м}^3/\text{кг}$			
$V_{\text{H}_2\text{O}}^o, \text{м}^3/\text{кг}$			
$V_z^o, \text{м}^3/\text{кг}$			
$V_z, \text{м}^3/\text{кг}$			
$G_z, \text{кг}/\text{кг}$			
$\mu, \text{г}/\text{м}^3$ (пылеугольная топка)			
$\mu, \text{г}/\text{м}^3$ (слоевая топка)			

4. Построить графики зависимости $V_g = f_1(\alpha)$ и $V_z = f_2(\alpha)$.

5. Для заданного вида газообразного топлива определить расход воздуха, необходимый для его полного сжигания, объём и массу выделившихся продуктов сгорания, если коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,05; 1,1; 1,15$, а топливо является сухим.

6. Результаты вычислений занести в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Материальный баланс для газообразного топлива

α	1,05	1,10	1,15
$V_g^o, \text{м}^3/\text{м}^3$			
$V_g, \text{м}^3/\text{м}^3$			
$V_{\text{RO}_2}, \text{м}^3/\text{м}^3$			
$V_{\text{N}_2}^o, \text{м}^3/\text{м}^3$			
$V_{\text{H}_2\text{O}}^o, \text{м}^3/\text{м}^3$			
$V_z^o, \text{м}^3/\text{м}^3$			
$V_z, \text{м}^3/\text{м}^3$			
$G_z, \text{кг}/\text{м}^3$			

7. Построить графики зависимости $V_g = f_3(\alpha)$ и $V_z = f_4(\alpha)$.

3. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

3.1. Краткие теоретические сведения

Целью составления теплового баланса процесса горения является определение температуры горения топлива, т.е. температуры, которую имеют продукты сгорания на выходе из зоны горения.

Величина температуры горения зависит от теплоты сгорания топлива, физического тепла компонентов горения, т.е. воздуха и топлива, коэффициента избытка воздуха, потерь теплоты от диссоциации продуктов сгорания и других потерь теплоты, например, потерь через ограждающие конструкции, от химической неполноты сгорания и т.д.

В зависимости от этих факторов различают калориметрическую (адиабатную) t_k , теоретическую t_m и действительную t_o температуру горения топлива.

Уравнение теплового баланса, применяемое для определения действительной температуры горения t_o , учитывает все перечисленные выше параметры и выглядит следующим образом:

$$h_2 = V_2 \cdot C_2 \cdot t_o = Q_n^p + Q_{ф.в.} + Q_{ф.т.} - Q_{дис} - Q_{ном}, \text{ кДж/кг (кДж/м}^3\text{)}, \quad (3.1)$$

где h_2 – действительная энтальпия продуктов сгорания, кДж/кг (кДж/м³);

C_2 – теплоёмкость продуктов сгорания, кДж/(м³·К);

$Q_{ф.в.}$ – физическое тепло воздуха, подаваемого на горение, кДж/кг (кДж/м³);

$Q_{ф.т.}$ – физическое тепло топлива, кДж/кг (кДж/м³);

$Q_{дис}$ – теплота, затрачиваемая на диссоциацию продуктов сгорания, кДж/кг (кДж/м³);

$Q_{ном}$ – другие потери теплоты, кДж/кг (кДж/м³).

Для вычисления теоретической температуры t_m из уравнения (3.1) исключают потери теплоты $Q_{ном}$:

$$h_2 = V_2 \cdot C_2 \cdot t_m = Q_n^p + Q_{ф.в.} + Q_{ф.т.} - Q_{дис}, \text{ кДж/кг (кДж/м}^3\text{)}, \quad (3.2)$$

Для вычисления калориметрической температуры t_k из уравнения (3.1) исключают $Q_{ном}$ и $Q_{дис}$:

$$h_2 = V_2 \cdot C_2 \cdot t_k = Q_n^p + Q_{ф.в.} + Q_{ф.т.}, \text{ кДж/кг (кДж/м}^3\text{)}, \quad (3.3)$$

Калориметрическую и теоретическую температуры горения можно определить двумя методами:

1) методом последовательных приближений из формул (3.2) и (3.3).

При данном методе теплоёмкости газов, составляющих продукты сгорания, в первом приближении принимаются при фиксированной (заданной) температуре горения топлива. Теплоёмкость продуктов сгорания стехиометрической смеси при этом вычисляется по формуле

$$C_2 = 0,01 \cdot \left(C_{\text{RO}_2} \cdot \frac{V_{\text{RO}_2}}{V_2} + C_{\text{N}_2} \cdot \frac{V_{\text{N}_2}^o}{V_2} + C_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}^o}{V_2} \right), \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}), \quad (3.4)$$

где C_{RO_2} , C_{N_2} , $C_{\text{H}_2\text{O}}$ – изобарные теплоёмкости трёхатомных газов (определяется для CO_2), азота и водяного пара, кДж/(м³·К);

V_{RO_2} , $V_{\text{N}_2}^o$, $V_{\text{H}_2\text{O}}^o$ – теоретические объёмы соответствующих компонентов продуктов сгорания, м³/кг (м³/м³).

Средние изобарные теплоёмкости компонентов продуктов сгорания приведены в прил. 6. Для вычисления теплоёмкости для любой заданной температуры необходимо воспользоваться формулой линейной интерполяции, которая в общем виде выглядит следующим образом:

$$Y = Y_1 + (Y_2 - Y_1) \cdot \frac{X - X_1}{X_2 - X_1}. \quad (3.5)$$

Параметры в данной формуле определяются по табличным данным в соответствии со следующей схемой:

$$\begin{bmatrix} X_1 \rightarrow Y_1 \\ X \rightarrow Y \\ X_2 \rightarrow Y_2 \end{bmatrix}.$$

При вычислении теплоёмкости параметру Y здесь соответствует искомое значение C , параметру X – заданная температура t . Параметры X_1 , X_2 – табличные значения температуры t_1 и t_2 , между которыми находится значение t . Параметры Y_1 и Y_2 – соответствующие t_1 и t_2 значения теплоёмкости C_1 и C_2 .

После вычисления теплоёмкости продуктов сгорания из балансовых соотношений (3.1), (3.2), (3.3) определяется соответствующая температура горения топлива.

Затем определяется относительная погрешность приближения по формуле

$$\delta t = \frac{|t_1 - t_2|}{t_1} \cdot 100, \% \quad (3.6)$$

где t_1 – заданное значение температуры горения топлива, °С;

t_2 – вычисленное значение температуры горения, °С.

Если погрешность $\delta t < 5 \%$, то в качестве температуры горения топлива принимается вычисленная температура t_2 . Если $\delta t > 5 \%$, то выполняется второе приближение в том же порядке, что и в первом приближении;

2) графическим методом, построив $h-t$ -диаграмму продуктов сгорания.

При данном методе на оси энтальпий $h-t$ -диаграммы откладывается значение теплоты, соответствующее искомой температуре (рис. 3.1).

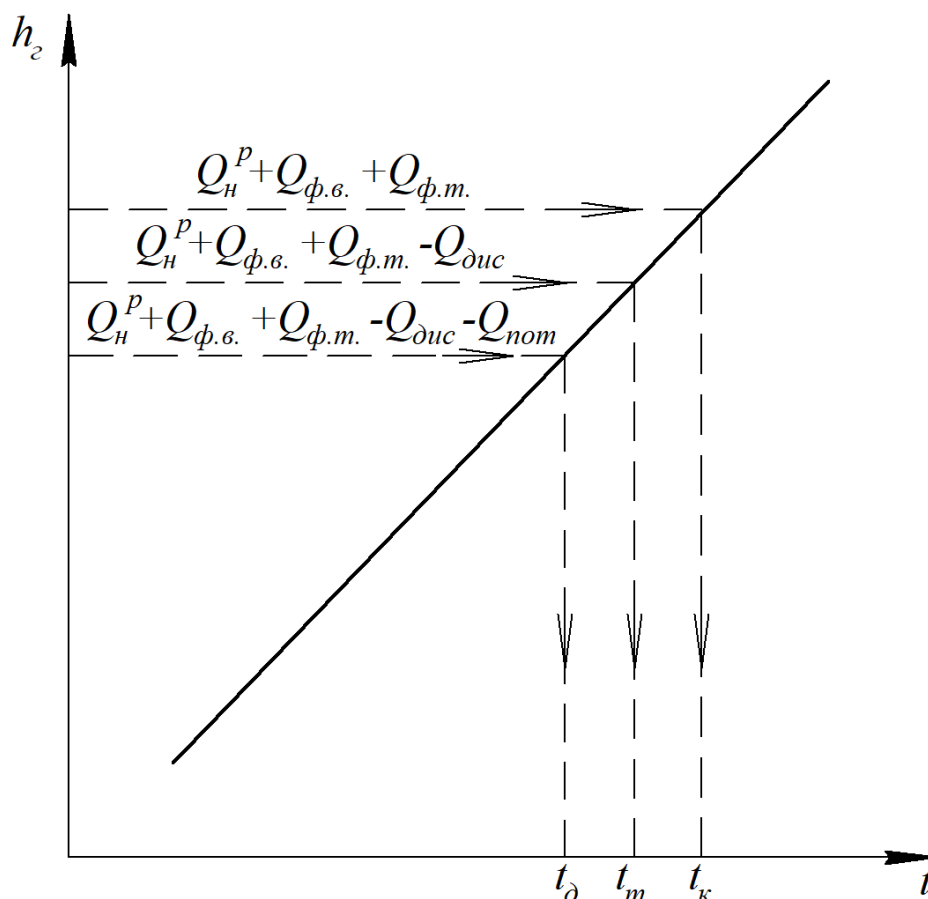


Рис. 3.1. $h-t$ -диаграмма продуктов сгорания топлива

Расчёт действительной температуры горения по формуле (3.1) затруднён из-за отсутствия точных данных по величине $Q_{ном}$, которая зависит от условий теплообмена продуктов сгорания с окружающей средой. Поэтому на практике действительную температуру определяют по формуле

$$t_0 = t_k \cdot \eta_{нур}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3.7)$$

где $\eta_{нур}$ – пирометрический коэффициент, определяемый опытным путём. Он зависит от конструкции топливопотребляющей установки и её режима работы и имеет значение от 0,65 до 0,8.

Величина энтальпии продуктов сгорания вычисляется по формуле

$$h_2 = h_2^o + (\alpha - 1) \cdot h_6^o + h_{зл}, \text{ кДж/кг (кДж/м}^3\text{)}, \quad (3.8)$$

где h_2^o – энтальпия теоретического объёма продуктов сгорания, кДж/кг (кДж/м³);

h_6^o – энтальпия теоретически необходимого для процесса горения воздуха, кДж/кг (кДж/м³);

$h_{зл}$ – энтальпия летучей золы, кДж/кг (кДж/м³).

Значения этих энтальпий вычисляются по следующим формулам:

$$h_2^o = (V_{\text{RO}_2} \cdot C_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^o \cdot C_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2}^o \cdot C_{\text{N}_2}) \cdot t; \quad (3.9)$$

$$h_6^o = V_6^o \cdot C_6 \cdot t; \quad (3.10)$$

$$h_{зл} = \frac{A^p \cdot a_{ун}}{100} \cdot C_{зл} \cdot t, \quad (3.11)$$

где t – температура продуктов сгорания, удаляемого воздуха и золы, $^\circ\text{C}$;

V_6^o – теоретический объём воздуха, м³/кг (м³/м³);

C_6 – изобарная теплоёмкость воздуха, кДж/(м³·К);

$C_{зл}$ – изобарная теплоёмкость золы, кДж/(кг·К).

Средние изобарные теплоёмкости воздуха и летучей золы приведены в прил. 6.

Энтальпия золы учитывается только при сжигании твёрдого топлива, и только в случае, если выполняется условие

$$\frac{A^p \cdot a_{ун}}{Q_n^p} > 1,43, \text{ } (\% \cdot \text{кг})/\text{МДж}. \quad (3.12)$$

При подаче атмосферного воздуха на горение обычно осуществляется его предварительный подогрев, например, в воздухоподогревателе котельного агрегата. Это позволяет повысить экономичность сжигания любого топлива, независимо от его теплоты сгорания. Физическое тепло воздуха в этом случае вычисляется по формуле

$$Q_{ф.в.} = \alpha \cdot V_6^o \cdot C_6 \cdot t_6, \text{ кДж/кг (кДж/м}^3\text{)}, \quad (3.13)$$

где t_6 – температура воздуха, подаваемого на горение, °С.

Физическое тепло топлива в случае его предварительного нагрева вычисляется по формуле

$$Q_{ф.т.} = C_{мл} \cdot t_{мл}, \text{ кДж/кг (кДж/м}^3\text{)}, \quad (3.14)$$

где $t_{мл}$ – температура топлива, °С;

$C_{мл}$ – теплоёмкость топлива, кДж/(кг·К) (кДж/(м³·К)).

Теплоёмкость рабочей массы твёрдого топлива вычисляется по следующей формуле:

$$C_{мл}^p = \frac{W^p}{100} + C_{мл}^c \cdot \frac{100 - W^p}{100}, \text{ кДж/(кг·К)}, \quad (3.15)$$

где $C_{мл}^c$ – теплоёмкость сухой массы твёрдого топлива, кДж/(кг·К). Значение теплоёмкости принимается по данным табл. 3.1.

Таблица 3.1

Теплоёмкость сухой массы топлива

Топливо	Температура топлива, °С				
	0	100	200	300	400
Антрацит и тощие угли	0,9209	0,9630	1,0467	1,1304	1,1723
Каменный уголь	0,9630	1,0886	1,2560	1,4235	-
Бурый уголь	1,0886	1,2560	1,4654	-	-
Сланцы	1,0467	1,1304	1,2979	-	-
Фрезерный торф	1,2979	1,5073	1,8003	-	-

Теплоёмкость мазута вычисляется по общей формуле

$$C_{мл} = 0,415 + 0,0006 \cdot t_m, \text{ кДж/(кг·К)}, \quad (3.16)$$

где t_m – температура мазута, °С.

Теплоёмкость газообразного топлива, отнесённая к 1 м³ сухого газа, определяется по формуле

$$C_{мл} = 0,01 \cdot (C_{H_2} \cdot H_2 + C_{CO} \cdot CO + C_{CH_4} \cdot CH_4 + C_{CO_2} \cdot CO_2 + \dots) + 0,00124 \cdot C_{H_2O} \cdot d_2, \text{ кДж/ (м}^3 \cdot \text{К)}, \quad (3.17)$$

где C_{H_2} , C_{CO} , C_{CH_4} , C_{CO_2} , C_{H_2O} – соответственно теплоёмкости водорода, окиси углерода, метана, углекислого газа и водяного пара, кДж/ (м³·К);

H_2 , CO , CH_4 , CO_2 – процентное содержание водорода, окиси углерода, метана, углекислого газа в 1 м³ сухого газового топлива, %.

При определении теплоёмкости газообразного топлива по формуле (3.17) необходимо учитывать все газы, составляющие топливо. Значения теплоёмкостей негорючих газов приведены в прил. 6, горючих газов – в прил. 7.

Количество теплоты, затраченное на диссоциацию продуктов сгорания, определяется по формуле

$$Q_{дис} = 12640 \cdot k_{\delta}^{CO_2} \cdot V_{CO_2} + 10800 \cdot k_{\delta}^{H_2O} \cdot V_{H_2O}, \text{ кДж/кг (кДж/м}^3), \quad (3.18)$$

где $k_{\delta}^{CO_2}$, $k_{\delta}^{H_2O}$ – константы (степень) диссоциации соответственно двуокиси углерода и водяного пара, выраженные в долях (прил. 5).

Для вычисления степени диссоциации двуокиси углерода и водяного пара необходимо определить их парциальные давления в продуктах сгорания. При общем абсолютном давлении продуктов сгорания, равном атмосферному давлению, они определяются по формулам

$$\begin{aligned} p_{CO_2} &= r_{CO_2} \cdot P, \text{ Па;} \\ p_{H_2O} &= r_{H_2O} \cdot P, \text{ Па.} \end{aligned} \quad (3.19)$$

где P – нормальное атмосферное давление, Па.

r_{CO_2} , r_{H_2O} – доля двуокиси углерода и водяного пара в продуктах сгорания.

Доля газов определяется по формулам

$$r_{CO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_2}; \quad r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}^o}{V_2}. \quad (3.20)$$

Степень диссоциации соответствующего газа определяется с помощью табл. Д.1 и Д.2 по двум параметрам – парциальному давлению и calorиметрической температуре горения топлива t_k . Для вычисления степени диссоциации необходимо воспользоваться формулой линейной интерполяции (3.5).

При этом интерполяция осуществляется в три этапа:

1) интерполяция степени диссоциации по вычисленному парциальному давлению газа при фиксированном значении температуры горения, расположенной ниже температуры t_k по таблице;

2) интерполяция степени диссоциации по вычисленному парциальному давлению газа при фиксированном значении температуры горения расположенной выше температуры t_k по таблице;

3) интерполяция степени диссоциации по температуре горения t_k для вычисленных значений степени диссоциации.

3.2. Практические задания

3.1 Для угля Донбасского месторождения марки Д, класса Р (состав указан в прил. 1), вычислить методом последовательных приближений калориметрическую температуру горения, если компоненты топлива не подогреваются.

3.2. Применительно к задаче 3.1 вычислить методом последовательных приближений калориметрическую температуру горения, если температура воздуха, подаваемого на горение, равна $235\text{ }^{\circ}\text{C}$, а топливо подогрето до температуры $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.3. Применительно к условию задачи 2.1 вычислить энтальпию продуктов сгорания топлива при температурах 500 и $2500\text{ }^{\circ}\text{C}$, построить $h-t$ -диаграмму и определить калориметрическую температуру горения, если

- компоненты горения не подогреваются;
- температура топлива (мазута) составляет $250\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.4. Применительно к условию задачи 2.2 вычислить энтальпию продуктов сгорания газообразного топлива при температурах 500 и $2500\text{ }^{\circ}\text{C}$, построить $h-t$ -диаграмму и определить калориметрическую и теоретическую температуры горения топлива, если температура воздуха, подаваемого на горение, равна $500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.5. Применительно к задаче 3.4 определить калориметрическую температуру горения, если воздух не подогревается, топливо нагрето до температуры $100; 300; 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, а влагосодержание газа составляет 50 г/м^3 .

3.6. Применительно к условию задачи 2.4 построить $h-t$ -диаграмму продуктов сгорания и определить калориметрическую и действительную температуры горения топлива, если пирометрический коэффициент равен $0,8$.

3.7. Применительно к условию задачи 1.11 определить температуру воздуха, поступающего в зону горения, если калориметрическая температура горения топлива равна $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$, а коэффициент избытка воздуха составляет $1,1$.

3.8. Для угля Донбасского месторождения марки Д, класса Р определить на сколько изменится тепло, затрачиваемое на процесс диссоциации продуктов сгорания, если его влажность снизилась до 5% . Коэффициент избытка воздуха равен $1,25$.

3.9. В топке котельного агрегата сжигается 1 кг угля, имеющего следующий состав: $C^p = 63,8 \%$; $H^p = 1,2 \%$; $S_{o+k}^p = 1,7 \%$; $N^p = 0,6 \%$; $O^p = 1,3 \%$; $A^p = 22,9 \%$; $W^p = 8,5 \%$. Определить энтальпию избыточного воздуха на выходе из топки при полном сгорании угля, если известно, что температура продуктов сгорания на выходе из топки составляет $1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Коэффициент избытка воздуха в топке $\alpha = 1,3$.

3.10. Определить энтальпию продуктов сгорания на выходе из топки, получаемых при полном сгорании 1 м^3 природного газа, имеющего следующий состав: $CO_2 = 0,4 \%$; $CH_4 = 94,0 \%$; $C_2H_6 = 2,8 \%$; $C_3H_8 = 0,4 \%$; $C_4H_{10} = 0,3 \%$; $C_5H_{12} = 0,1 \%$; $N_2 = 2,0 \%$, если известно, что температура газов на выходе из топки составляет $1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Коэффициент избытка воздуха в топке $\alpha = 1,1$.

3.11. Определить энтальпию продуктов сгорания на выходе из топки, получаемых при полном сгорании 1 кг угля имеющего следующий состав: $C^p = 54,7 \%$; $H^p = 3,3 \%$; $S_{o+k}^p = 0,8 \%$; $N^p = 0,8 \%$; $O^p = 4,8 \%$; $A^p = 27,6 \%$; $W^p = 8,0 \%$. Известно, что температура газов на выходе из топки равна составляет $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, доля золы топлива, уносимой продуктами сгорания $a_{ун} = 0,85$ и приведённая величина уноса золы сжигаемого топлива $A_{ун}^{np} = 4,6 \text{ (кг}\cdot\text{\%)/МДж}$. Коэффициент избытка воздуха в топке $\alpha = 1,3$.

3.12. Определить энтальпию избыточного воздуха и золы на выходе из топки при полном сгорании угля, имеющего состав: $C^p = 55,2 \%$; $H^p = 3,8 \%$; $S_{o+k}^p = 3,2 \%$; $N^p = 1,0 \%$; $O^p = 5,8\%$; $A^p = 23,0 \%$; $W^p = 8,0 \%$. Известно, что температура газов на выходе из топки составляет $1100 \text{ }^\circ\text{C}$, $a_{ун} = 0,85$, $A_{ун}^{np} = 3,72 \text{ (кг}\cdot\text{\%)/МДж}$. Коэффициент избытка воздуха в топке $\alpha = 1,1$.

3.3. Задание № 3 на курсовой проект

1. Для заданного вида твёрдого топлива вычислить энтальпию продуктов сгорания, если температура продуктов сгорания равна 500 ; 1000 ; 1500 ; 2000 ; $2500 \text{ }^\circ\text{C}$, коэффициент избытка воздуха равен $1,25$, а коэффициент уноса золы составляет $0,95$. Результаты вычислений занести в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Энтальпия продуктов сгорания твёрдого топлива

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	500	1000	1500	2000	2500
$h_2^o, \text{ кДж/кг}$					
$h_8^o, \text{ кДж/кг}$					
$h_{3л}, \text{ кДж/кг}$					
$h_2, \text{ кДж/кг}$					

2. Для заданного вида газообразного топлива вычислить энтальпию продуктов сгорания, если температура продуктов сгорания соответственно равна 500; 1000; 1500; 2000; 2500 °С, а коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,05$. Результаты вычислений занести в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Энтальпия продуктов сгорания газообразного топлива

$t, ^\circ\text{C}$	500	1000	1500	2000	2500
$h_2^o, \text{кДж/м}^3$					
$h_6^o, \text{кДж/м}^3$					
$h_2, \text{кДж/м}^3$					

3. Для заданного твёрдого и газообразного топлива построить $h-t$ -диаграммы продуктов сгорания.

4. С помощью $h-t$ -диаграммы продуктов сгорания (графическим методом) для заданных видов топлива определить:

а) калориметрическую температуру горения $t_{\kappa 1}$, если воздух не подогревается;

б) калориметрическую температуру горения $t_{\kappa 2}$, если воздух нагрет до температуры 500 °С;

в) теоретическую температуру горения t_m , если воздух, поступающий в зону горения, нагрет до температуры 500 °С;

г) температуру воздуха, поступающего в зону горения t'_e , необходимую для получения заданной действительной температуры горения при заданном пирометрическом коэффициенте.

5. Отобразить на $h-t$ -диаграмме процесс вычисления температур в соответствии с рис. 3.2.

6. Для заданного твёрдого и газообразного топлива занести вычисленные значения температур в табл. 3.4 и 3.5.

Таблица 3.4

Значения температур для твёрдого топлива

$t_{\kappa 1}, ^\circ\text{C}$	$t_{\kappa 2}, ^\circ\text{C}$	$t_m, ^\circ\text{C}$	$t'_e, ^\circ\text{C}$

Таблица 3.5

Значения температур для газообразного топлива

$t_{\kappa 1}, ^\circ\text{C}$	$t_{\kappa 2}, ^\circ\text{C}$	$t_m, ^\circ\text{C}$	$t'_e, ^\circ\text{C}$

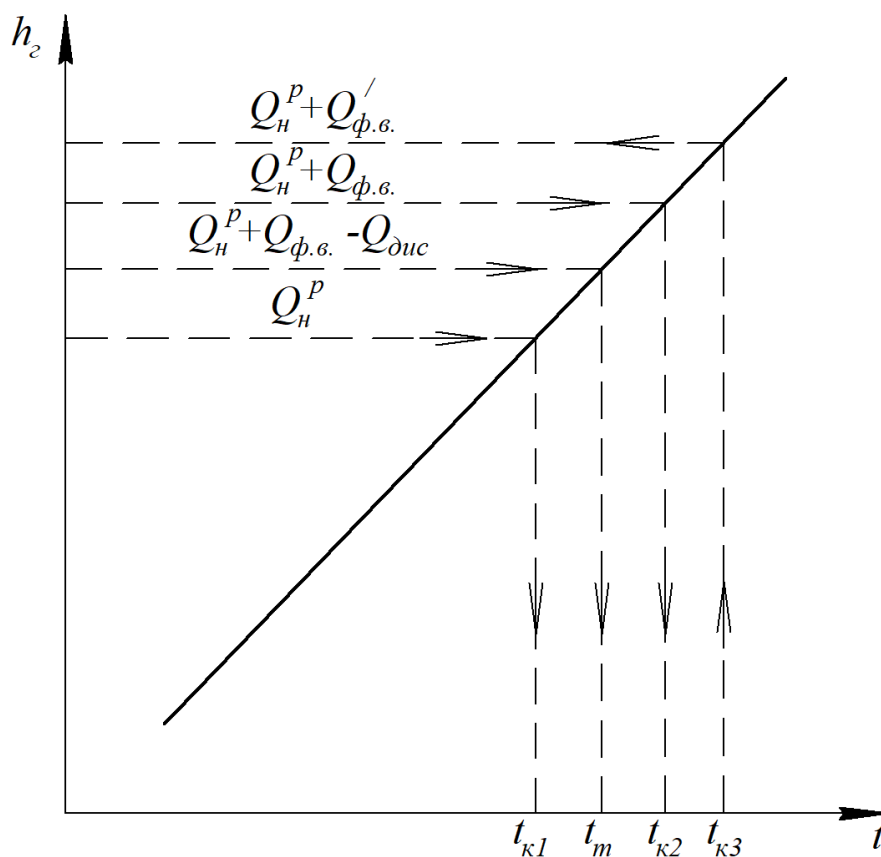


Рис. 3.2. $H - t$ -диаграмма продуктов сгорания топлива

4. ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ В ГОРЮЧИХ СМЕСЯХ

4.1. Краткие теоретические сведения

Основными количественными параметрами процесса зажигания являются концентрационные границы зажигания, т.е. объёмные концентрации топлива в предельно бедной и предельно богатой горючей смеси (смеси топлива и окислителя).

Концентрационные границы зажигания выражаются через соответствующие значения коэффициентов избытка окислителя в предельных горючих смесях:

$$\alpha_n = \frac{100 - L_n}{L_n \cdot V_{ок}^o}; \quad \alpha_в = \frac{100 - L_в}{L_в \cdot V_{ок}^o}, \quad (4.1)$$

где L_n , $L_в$ – нижняя и верхняя концентрационные границы зажигания, соответственно (прил. 8), %.

Концентрационные границы зажигания различных газов в смеси с воздухом и кислородом при нормальной температуре 293 °С и нормальном атмосферном давлении 101325 Па приведены в прил. 8.

Концентрационные границы зажигания смеси горючих газов, не содержащих балласт, вычисляются по правилу Ле-Шателье:

$$L = \frac{C_1 + C_2 + \dots + C_i}{\frac{C_1}{L_1} + \frac{C_2}{L_2} + \dots + \frac{C_i}{L_i}}, \%, \quad (4.2)$$

где C_i – объёмное содержание i -го горючего компонента, %;

L_i – концентрационные границы зажигания этого компонента, %.

Если в смеси содержатся балластирующие компоненты (CO_2, N_2) и их суммарная концентрация не превышает 10 %, то концентрационная граница вычисляется по формуле

$$L^\circ = L \cdot \frac{\left(1 + \frac{B}{100 - B}\right) \cdot 100}{100 + L \cdot \frac{B}{100 - B}}, \%, \quad (4.3)$$

где B – суммарное объёмное содержание балластирующих компонентов в топливе, %.

На концентрационные границы зажигания существенное влияние оказывают такие параметры как давление, температура, содержание в горючей смеси различных инертных примесей, скорость горения горючей смеси, а также мощность источника её зажигания, что, в свою очередь, влияет на область воспламенения.

Основным количественным параметром процесса горения является скорость нормального распространения пламени, то есть скорость ламинарного перемещения элемента фронта пламени относительно свежей смеси и направленная по нормали к поверхности фронта в данном месте.

Исходя из условия, что количество подаваемой горючей смеси должно равняться количеству смеси, сгорающей на конусообразном фронте пламени, получим

$$U_n = \frac{V_{см}}{\pi \cdot R \cdot \sqrt{h^2 + R^2}}, \text{ м/с}, \quad (4.4)$$

где U_n – скорость нормального распространения пламени, м/с;

$V_{см}$ – объёмный расход горючей смеси м³/с;

R – радиус горелки, м;

h – высота конусообразного фронта пламени, м.

Повышение начальной температуры смеси сопровождается ростом скорости распространения пламени в соответствии с формулой

$$U_n = U_{n0} \cdot \left(\frac{T_1}{T_0} \right)^n, \text{ м/с}, \quad (4.5)$$

где U_n , U_{n0} – скорость распространения пламени при температуре смеси T_1 и T_0 , соответственно, м/с;

T_0 , T_1 – начальная и конечная температура смеси, соответственно, К.

Коэффициент n принимается равным от 1,7 до 1,8.

Повышение начального давления смеси снижает скорость распространения пламени:

$$U_n = U_{n0} \cdot \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{-m}, \text{ м/с}, \quad (4.6)$$

где U_n , U_{n0} – скорость распространения пламени при давлении смеси P_1 и P_0 , соответственно, м/с;

P_0 , P_1 – начальное и конечное давление смеси, соответственно, Па.

Коэффициент m принимается равным от 0,20 до 0,25.

Значение скорости распространения пламени для смеси горючих газов, не содержащих балластирующих компонентов (CO_2 , N_2), вычисляется по правилу Ле-Шателье:

$$U_n = \frac{C_1 \cdot U_{n1} + C_2 \cdot U_{n2} + \dots + C_i \cdot U_{ni}}{C_1 + C_2 + \dots + C_i}, \text{ м/с}, \quad (4.7)$$

где C_i – объёмная концентрация i -го горючего компонента, %;

U_{ni} – скорость нормального распространения пламени i -го компонента в горючей смеси, %.

Значения скорости нормального распространения пламени для различных газов в смеси с воздухом приведены в прил. 9.

При наличии в газе балласта в количестве не более 5 % значение скорости распространения пламени вычисляют по формуле

$$U_n^\delta = U_n \cdot (1 - 0,01 \cdot C_{\text{N}_2} - 0,012 \cdot C_{\text{CO}_2}), \quad (4.8)$$

где C_{N_2} , C_{CO_2} – объёмные концентрации азота и углекислого газа в топливе, %.

Размеры канала горелочного устройства влияют на скорость распространения пламени за счёт охлаждающего действия его стенок. Для каждой горючей смеси существует минимальное (критическое) значение диаметра канала, по которому распространение пламени становится невозможным. Оно вычисляется по формуле

$$d_{кр} = 46 \cdot \frac{a_{см}}{U_n}, \text{ м.} \quad (4.9)$$

где $a_{см}$ – коэффициент температуропроводности горючей смеси, $\text{м}^2/\text{с}$.

Скорость распространения пламени в турбулентном потоке можно найти из соотношения

$$U_T = A \cdot \bar{w}_{ном} \cdot U_n^{0.3}, \text{ м/с,} \quad (4.10)$$

где $\bar{w}_{ном}$ – средняя скорость потока горючей смеси, м/с ;

A – коэффициент, принимаемый равным от 0,9 до 1,0.

Связь скорости U_T и температуры горючей смеси устанавливается эмпирическим соотношением

$$U_T = U_T^o \cdot \left(\frac{T_1}{T_o} \right)^n, \text{ м/с,} \quad (5.21)$$

где U_T^o , U_T – скорость турбулентного распространения пламени при температуре T_o и T_1 , соответственно, м/с ;

Коэффициент n принимается равным от 0,6 до 1,65.

4.2. Практические задания

4.1. Для топлива, состав которого приведён в задаче 1.9, определить концентрационные границы зажигания и соответствующие им коэффициенты избытка окислителя в воздушной и кислородной смеси при нормальных атмосферных условиях.

4.2. Определить нормальную скорость распространения пламени, если при проведении экспериментального исследования процесса горения на цилиндрической горелке радиусом 10 мм было получено пламя высотой 20 мм. В горелку подавалось $3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ водорода. Окислителем являлся с воздух. Коэффициент избытка воздуха составлял 1,10.

4.3. Применительно к условию задачи 4.2 определить скорость нормального распространения пламени, если горючая смесь перед сжиганием подогрелась до температуры 500 К.

4.4. Применительно к условию задачи 4.2 определить скорость распространения пламени, если расход горючей смеси возрастёт 10 раз.

4.5. Для топлива, состав которого приведён в задаче 1.9, определить скорость нормального распространения пламени, если оно сгорает в стехиометрической смеси с воздухом.

4.6. Для топлива, состав которого приведён в задаче 1.7, определить концентрационные границы зажигания и соответствующие им коэффициенты избытка воздуха в воздушной смеси при нормальных атмосферных условиях, для случая сухого и влажного газов.

4.7. Для газообразного топлива газопровода Брянск-Москва вычислить концентрационные границы зажигания и соответствующие им коэффициенты избытка воздуха в воздушной смеси при нормальных атмосферных условиях, если газ имеет влагосодержание 60 и 90 г/м³.

4.3. Задание № 4 на курсовой проект

1. Для заданного газообразного топлива определить:

- концентрационные границы зажигания без учёта влияния балластирующих компонентов;

- концентрационные границы зажигания с учётом влияния балластирующих компонентов;

- коэффициенты избытка воздуха, соответствующие концентрационным границам зажигания.

2. Для заданного газообразного топлива определить скорость нормального распространения пламени, если оно сгорает в стехиометрической смеси с воздухом при нормальных условиях.

3. Определить скорости нормального распространения пламени, если температура стехиометрической горючей смеси составляет 100; 180; 260; 340; 420; 500 °С. Результаты вычислений занести в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Скорость нормального распространения пламени

$t, ^\circ\text{C}$	20	100	180	260	340	420	500
$U_n, \text{м/с}$							

4. Построить график зависимости $U_n = f(t)$.

5. ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО, ЖИДКОГО И ТВЁРДОГО ТОПЛИВА

5.1. Краткие теоретические сведения

Газообразное топливо.

В зависимости от режима движения газообразного топлива и окислителя при любом способе сжигания топлива (кинетического или диффузионного) может формироваться ламинарный или турбулентный факел.

Длина (высота) кинетического ламинарного факела определяется из соотношения

$$l_{\phi}^k = \frac{\bar{w}_{см} \cdot d}{U_n}, \text{ м}, \quad (5.1)$$

где $\bar{w}_{см}$ – средняя скорость истечения горючей смеси из горелки, м/с;

d – диаметр устья горелки, м.

Длина диффузионного ламинарного факела определяется из формулы

$$l_{\phi}^d = \frac{\bar{w}_{см} \cdot d^2}{4 \cdot D_2}, \text{ м}, \quad (5.2)$$

где D_2 – коэффициент молекулярной диффузии газа в воздухе м²/с.

На практике длину диффузионного ламинарного факела определяют по эмпирической формуле

$$l_{\phi}^d = 0,0004 \cdot \sqrt{\frac{V_2 \cdot (V_2^o + 0,5)}{\nu_2 \cdot D_2}}, \text{ м}. \quad (5.3)$$

где ν_2 – коэффициент кинематической вязкости газа, м²/с.

Кинетический турбулентный факел не зависит от скорости истечения горючей смеси и составляет пять-шесть диаметров горелки, а длина диффузионного турбулентного факела определяется из соотношения

$$l_{\phi} = d \cdot 20 \cdot K \cdot \left(\frac{\bar{w}_{см}}{g \cdot d} \right)^{0,17}, \text{ м}, \quad (5.4)$$

где K – эмпирический коэффициент (для природного газа $K = 1,5$, для генераторного газа $K = 0,6$; для коксового газа $K = 1$).

Жидкое топливо.

Горение жидкого топлива происходит в паровой фазе, т.е. горение носит гомогенный характер (топливо и окислитель находятся в одном агрегатном состоянии). Процессу смесеобразования предшествует процесс испарения жидкого топлива.

Время испарения капли жидкого топлива зависит от режима её движения в потоке несущей среды. В случае испарения каплей при малой скорости их движения (при критерии Рейнольдса $Re < 5$) коэффициент теплообмена вычисляется из уравнения

$$Nu = \frac{\alpha \cdot D}{\lambda_c} = 2, \quad (5.5)$$

где Nu – критерий Нуссельта;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² К);

D – диаметр капли, м;

λ_c – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м² К).

При $Re > 5$ значение коэффициента теплоотдачи определяется из соотношения

$$Nu = 0,33 \cdot Re^{0,6}. \quad (5.6)$$

Плотность теплового потока на поверхность капли

$$q = \alpha \cdot (T_z - T_k), \text{ Вт/м}^2, \quad (5.7)$$

где T_z – температура горения топлива, К;

T_k – температура кипения жидкого топлива, К.

Время полного выгорания капли

$$\tau = \int_{R_0}^0 \frac{\rho_m \cdot [(T_k - T_0) \cdot c_m + r_n]}{q} dR, \text{ с}, \quad (5.8)$$

где ρ_m – плотность жидкого топлива, кг/м³;

c_m – теплоёмкость жидкого топлива, кДж/(кг К);

r_n – теплота парообразования жидкого топлива, кДж/кг.

R_0 – начальный радиус капли, м;

T_0 – начальная температура жидкого топлива, К.

Например, если $Re < 5$, то соотношение (5.8) с учётом (5.5) и (5.7) будет иметь следующий вид

$$\tau = \frac{\rho_m \cdot [(T_k - T_o) \cdot c_m + r_n]}{2 \cdot \lambda_c \cdot (T_z - T_k)} \cdot R^2, \text{ с.} \quad (5.9)$$

Твёрдое топливо.

В промышленности применяется два способа сжигания твёрдого топлива: слоевое и камерное.

При слоевом сжигании топливо в топке лежит плотным слоем или находится в псевдооживленном состоянии. Установки, реализующие этот вид сжигания, подразделяются на топки с псевдооживленным и плотным слоем.

При камерном сжигании топливо предварительно размалывается в тонкий порошок в специальных пылеприготовительных установках – углеразмельных мельницах. Установки, реализующие этот вид сжигания, разделяются на факельные и циклонные.

Твёрдое топливо сгорает в плотном слое, если скорость окислителя (воздуха) в топке

$$w_0 < w'_{кр}, \text{ м/с,} \quad (5.10)$$

где w_0 – скорость окислителя на входе в топку, м/с;

$w'_{кр}$ – нижняя (первая) критическая скорость псевдооживления, м/с.

Для вычисления нижней скорости псевдооживления применяется следующая формула Годеса:

$$w'_{кр} = \frac{Ar}{1400 + 5,22 \cdot \sqrt{Ar}} \cdot \frac{\nu_\epsilon}{d_s}, \quad (5.11)$$

где d_s – эквивалентный диаметр частиц топлива, м;

ν_ϵ – кинематическая вязкость окислителя, м²/с. Значения вязкости воздуха в зависимости от его температуры приведены в прил. 10;

Ar – критерий (число) Архимеда.

При переходе в псевдооживленное состояние частицы топлива приобретают подвижность и с дальнейшим увеличением скорости воздуха w_0 происходит их расхождение друг с другом, слой топлива при этом расширяется. Потери давления в слое вычисляются по формуле

$$\Delta p = (\rho_m - \rho_\epsilon) \cdot g \cdot H_0 \cdot (1 - \epsilon_0), \text{ Па,} \quad (5.12)$$

где ρ_m – плотность топлива, кг/м³;

ρ_ϵ – плотность окислителя, кг/м³. Значения плотности воздуха в зависимости от его температуры приведены в прил. 11;

H_0 – высота плотного (стационарного) слоя, м;

ε_0 – порозность плотного (стационарного) слоя.

Перепад давления является одной из величин, по которым осуществляется выбор вентилятора для подачи воздуха в топку. Другая важная величина – необходимый расход окислителя.

Для частиц топлива неправильной формы эквивалентный диаметр вычисляется по формуле

$$d_э = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot a \cdot b \cdot c}{\pi}}, \text{ м}, \quad (5.13)$$

где a, b, c – характерные линейные размеры куска топлива, м.

Число Архимеда вычисляется по формуле

$$Ar = \frac{g \cdot d_э^3}{\nu_г^2} \cdot \left(\frac{\rho_m}{\rho_г} - 1 \right). \quad (5.14)$$

Плотность органической массы твёрдого топлива зависит от его химической структуры, обусловленной происхождением и степенью углефикации. Значение плотности можно определить по эмпирическим формулам:

- для антрацитов и каменных углей марки Т

$$\rho_m = \frac{10^5}{0,53 \cdot C^Г + 5 \cdot H^Г}, \text{ кг/ м}^3, \quad (5.15)$$

где $C^Г, H^Г$ – содержание углерода и водорода в горючей массе топлива, %;

- для остальных типов углей

$$\rho_m = \frac{10^5}{0,354 \cdot C^Г + 4,25 \cdot H^Г + 23}, \text{ кг/ м}^3. \quad (5.16)$$

Если выполняется условие

$$w'_{кр} < w_0 < w''_{кр}, \text{ м/с}, \quad (5.17)$$

то твёрдое топливо сгорает в псевдооживленном слое.

Здесь $w''_{кр}$ – верхняя (вторая) критическая скорость псевдооживления, м/с.

При приближении к данной скорости начинается унос самых мелких части топлива из слоя. При её превышении все частицы уносятся потоком воздуха.

Для вычисления верхней скорости псевдоожигения применяется следующая формула Годеса:

$$w''_{кр} = \frac{Ar}{18 + 0,61 \cdot \sqrt{Ar}} \cdot \frac{v_g}{d_s} \quad (5.18)$$

При скорости воздуха

$$w_0 > w''_{кр} \quad (5.19)$$

имеет место факельное или циклонное сжигание твёрдого топлива.

5.2. Практические задания

5.1. Определить длину кинетического факела стехиометрической метано-воздушной смеси, если она сгорает в горелке диаметром 15 мм, а её расход составляет 0,00035 м³/с.

5.2. Применительно к условию задачи 4.1 определить длину кинетического факела, если горючая смесь перед сжиганием подогревалась до 300 °С.

5.3. Определить длину диффузионного ламинарного факела водородно-кислородной смеси, если расход водорода составляет 0,0003 м³/с, а диаметр устья горелки равна 10 мм.

5.4. Определить время испарения капли топлива начального радиуса 0,01 мм при температуре горения 1500 °С, если теплофизические параметры топлива: $\rho_m = 830$ кг/м³; $c_m = 2$ кДж/(кг·К); $r_m = 3,85 \cdot 10^5$ кДж/кг; $t_{кин} = 350$ °С, а скорость движения капле составляет 5 м/с.

5.5. Определить критические скорости псевдоожигения каменного угля, если средний размер кусков составил 25 мм, а в качестве окислителя применяется атмосферный воздух, подогретый до температуры 300 °С. Плотность угля равна 820 кг/м³.

5.6. Определить скорости потока воздуха, при которых возможно существование монофракционного псевдоожигенного слоя, состоящего из частиц угля с эквивалентным диаметром $d_s = 5$ мм. Псевдоожигение осуществляется холодным воздухом с $\rho_g = 1,29$ кг/м³ и $v_g = 1,4 \cdot 10^{-5}$ м²/с. Плотность угля составляет 1500 кг/м³.

5.7. Оценить необходимый напор дутья для вывода на рабочий режим псевдоожигенного слоя, монофракционной засыпки угля с диаметром частиц $d_s = 10$ мм. Коэффициент сопротивления газораспределительной решётки принять равным 5. Начальная высота, слоя $H_0 = 0,2$ м при $\varepsilon_0 = 0,4$. Плотность газа равна 1 кг/м³, а плотность угля 1500 кг/м³. Кинематическая вязкость газа $\nu_g = 2 \cdot 10^{-5}$ м²/с.

5.3. Задание № 5 на курсовой проект

1. Для заданного газообразного топлива построить зависимость ламинарного длины кинетического факела от скорости стехиометрической смеси топлива с воздухом, если диаметр устья горелки равен 20 мм. Результаты вычислений занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Длина кинетического факела

$w_{см}$, м/с	0,5	0,75	1	1,25	1,5
$l_{ф}$, м					

2. Построить график зависимости $l_{ф} = f(w_{см})$.

3. Для заданного твёрдого топлива определить критические скорости псевдооживления, если в качестве окислителя используется атмосферный воздух, подогретый до температуры 400 °С, а эквивалентный диаметр частиц твёрдого топлива составляет 0,025 м.

6. ТОПЛИВОСЖИГАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Графическая часть курсового проекта включает чертёж топливосжигающего устройства, выполняемый на листе формата А3 с помощью программ для черчения КОМПАС-3D или AutoCAD.

Основная надпись чертежа заполняется в соответствии с прил. 12. Центральное поле основной надписи должно содержать полное название топливосжигающего устройства. Ниже центрального поля располагается название курсового проекта. Выше центрального поля располагается номер направления подготовки, номер студенческого билета и год выполнения курсового проекта.

Топливосжигающее устройство – это специальное техническое устройство, с помощью которого осуществляется сжигание газообразного и жидкого топлива. Данные устройства, горелки (применяемые для сжигания газа) и форсунки (для мазута), предназначены для подачи топлива и воздуха в топку котельного агрегата или рабочее пространство высокотемпературной печи, перемешивания горючего с окислителем (воздухом или кислородом) и воспламенения горючей смеси. Основная задача данных устройств – обеспечение оптимальных условий образования горючей смеси топлива с окислителем.

Конструкции горелок и форсунок, применяемых в промышленности, достаточно разнообразны, однако к ним предъявляются схожие требования, определяемые характером устройства.

Горелочное устройство должно обеспечивать: стабильную подачу компонентов горения в необходимом количестве и их максимальное перемешивание

между собой; устойчивое зажигание горючей смеси (включая стабилизацию процесса горения); достаточную полноту сжигания топлива с минимальной величиной химического недожога; формирование стабильного факела с заданными параметрами.

Ко всем форсункам предъявляются следующие требования: хорошее распыливание жидкого топлива и его максимальное перемешивание с окислителем; обеспечение хорошего горения и формирование факела заданных параметров; полноту сжигания топлива с минимальной величиной химического и механического недожога; надёжность в эксплуатации и простота конструкции.

На рис. 5.1 - 5.16 представлены конструкции горелок и форсунок различных типов, а в табл. 5.1 - 5.12 приведены их геометрические размеры.

Чертёж топливосжигающего устройства выполняется в соответствии с выданным заданием на курсовой проект. Номер варианта в таблицах соответствует номеру задания. Чертёж горелки или форсунки выполняется по заданному в таблице геометрическим размерам. Диаметр устья горелки d_2 выбирается произвольно.

Таблица 5.1

Геометрические параметры инжекционной горелки с водоохлаждаемым носиком для газа с высокой теплотой сгорания (рис. 5.1), мм

№ варианта	Обозначение горелок	$d_{н.г}$	D	D_1	D_2	D_3	$D_{тр}$	$d_{тр}$	A	B	B
1	B86/ $d_г$	86	220	207	90	180	1"	1/2"	960	185	200
2	B100/ $d_г$	100	260	207	100	190	1"	1/2"	1095	255	200
3	B116/ $d_г$	116	300	242	115	205	1 1/4"	1/2"	1240	290	240
4	B134/ $d_г$	134	350	267	130	220	1 1/4"	3/4"	1420	380	240
5	B154/ $d_г$	154	410	297	145	235	1 1/2"	3/4"	1615	435	280
6	B178/ $d_г$	178	470	345	165	255	1 1/2"	1"	1840	550	280
7	B205/ $d_г$	205	490	390	190	280	2"	1"	2130	640	300
8	B235/ $d_г$	235	510	440	215	305	2"	1"	2400	805	300

Таблица 5.2

Геометрические параметры инжекционной горелки с водоохлаждаемым носиком для газа с высокой теплотой сгорания (рис. 5.1), мм

№ варианта	Обозначение горелок	Γ	Δ	E	$Ж$	$И$	K	L	M	H	Π	Масса, кг
1	B86/ $d_г$	190	130	90	55	50	25	145	40	11	285	58,7
2	B100/ $d_г$	190	130	90	55	50	25	150	40	11	285	81,0
3	B116/ $d_г$	220	160	110	65	50	25	200	50	11	330	107,0

Окончание табл. 5.2

№ варианта	Обозначение горелок	<i>Г</i>	<i>Д</i>	<i>Е</i>	<i>Ж</i>	<i>И</i>	<i>К</i>	<i>Л</i>	<i>М</i>	<i>Н</i>	<i>П</i>	Масса, кг
4	В134/ <i>d_Г</i>	220	160	110	65	50	25	200	50	11	360	151,0
5	В154/ <i>d_Г</i>	260	200	150	65	50	25	250	50	11	410	216,0
6	В178/ <i>d_Г</i>	260	200	150	65	50	25	250	55	11	475	240,0
7	В205/ <i>d_Г</i>	280	220	170	65	50	25	280	70	11	555	342,0
8	В235/ <i>d_Г</i>	280	220	170	65	50	25	280	70	11	605	401,0

Таблица 5.3

Геометрические параметры инжекционной горелки для газа с низкой теплотой сгорания (рис. 5.2), мм

№ варианта	Обозначение горелок	<i>d_{н.Г}</i>	<i>D</i>	<i>D₁</i>	<i>D₂</i>	<i>D₃</i>	<i>D₄</i>	<i>D₅</i>	<i>D₆</i>	<i>D_{тр}</i>	<i>d₁</i>	<i>n</i>	<i>A</i>	<i>Б</i>
9	Н85/ <i>d_Г</i>	86	220	210	105	195	220	180	100	1/2"	18	8	990	185
10	Н100/ <i>d_Г</i>	100	260	210	120	210	220	180	100	1/2"	18	8	1110	255
11	Н116/ <i>d_Г</i>	116	300	235	135	225	250	210	125	1/2"	18	8	1250	290
12	Н134/ <i>d_Г</i>	134	350	300	155	245	285	240	150	3/4"	23	8	1435	380
13	Н154/ <i>d_Г</i>	154	410	300	175	265	285	240	150	3/4"	23	8	1595	435
14	Н178/ <i>d_Г</i>	178	470	335	200	290	340	295	200	1"	23	8	1840	550
15	Н205/ <i>d_Г</i>	205	490	435	230	320	395	350	250	1"	23	12	2120	640
16	Н235/ <i>d_Г</i>	235	510	435	260	350	395	350	250	1"	23	12	2365	805

Таблица 5.4

Геометрические параметры инжекционной горелки для газа с низкой теплотой сгорания (рис. 5.2), мм

№ варианта	Обозначение горелок	<i>В</i>	<i>Г</i>	<i>Д</i>	<i>Е</i>	<i>Ж</i>	<i>И</i>	<i>К</i>	<i>Л</i>	<i>М</i>	<i>Н</i>	<i>П</i>	<i>Р</i>
9	Н85/ <i>d_Г</i>	200	190	130	90	55	50	25	145	20	40	22	305
10	Н100/ <i>d_Г</i>	200	190	130	90	55	50	25	150	20	40	22	305
11	Н116/ <i>d_Г</i>	240	220	160	110	65	50	25	200	20	50	22	330
12	Н134/ <i>d_Г</i>	240	220	160	110	65	50	25	200	20	50	24	420
13	Н154/ <i>d_Г</i>	280	260	200	150	65	50	25	250	20	50	24	420
14	Н178/ <i>d_Г</i>	280	260	200	150	65	50	25	250	20	55	26	470
15	Н205/ <i>d_Г</i>	300	280	220	170	65	50	25	280	20	70	28	610
16	Н235/ <i>d_Г</i>	300	280	220	170	65	50	25	280	20	70	28	610

Таблица 5.5

Геометрические параметры инжекционной горелки для газа с низкой теплотой сгорания (рис. 5.3), мм

№ варианта	Обозначение горелок	$d_{н.г}$	D	D_1	D_2	$D_{тр}$	d	A	B	B	Γ	Δ	E	$Ж$	$И$	Масса, кг
17	H42/ $d_{г}$	42	100	147	55	2"	M16	480	425	55	142	52	160	120	195	16,90
18	H48/ $d_{г}$	48	120	147	65	2"	M16	580	460	70	142	56	180	140	195	23,60
19	H56/ $d_{г}$	56	120	147	70	2"	M16	600	530	70	142	56	180	140	195	27,40

Таблица 5.6

Геометрические параметры инжекционной горелки для газа с низкой теплотой сгорания (рис. 5.4), мм

№ варианта	Обозначение горелок	$d_{н.г}$	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	d	d_1	Π	A	B	B	Γ	Δ	E	$Ж$	$И$	K	Масса, кг
20	H65/ $d_{г}$	65	140	175	85	200	160	75	M16	18	4	760	660	100	275	56	210	170	20	260	44,60
21	H75/ $d_{г}$	75	140	165	95	200	160	75	M16	18	4	845	745	100	265	56	210	170	20	260	44,70

Таблица 5.7

Геометрические параметры инжекционной горелки с неохлаждаемым носиком для газа с высокой теплотой сгорания (рис. 5.5), мм

№ варианта	Обозначение горелок	$d_{н.г}$	D	D_1	D_2	$D_{тр}$	d	A	B	B	Γ	E	$Ж$	$И$	K	Масса, кг
1	B15/ $d_{г}$	15	60	66	25	1/2"	M12	220	195	25	94	44	120	80	110	5,1
2	B18/ $d_{г}$	18	60	66	30	1/2"	M12	250	225	25	94	44	120	80	110	5,3
3	B21/ $d_{г}$	21	60	66	30	1/2"	M12	275	250	25	94	44	120	80	110	5,6
4	B24/ $d_{г}$	24	80	86	35	1/2"	M16	300	260	40	96	48	140	100	135	8,8
5	B28/ $d_{г}$	28	80	86	40	1/2"	M16	335	295	40	96	48	140	100	135	9,0

Окончание табл. 5.7

№ варианта	Обозначение горелок	$d_{н.г}$	D	D_1	D_2	$D_{тр}$	d	A	B	B	Γ	E	$Ж$	$И$	K	Масса, кг
6	B32/ $d_{г}$	32	80	86	40	1/2"	M16	375	335	40	96	48	140	100	135	9,8
7	B37/ $d_{г}$	37	100	116	45	1/2"	M16	440	385	55	113	52	160	120	165	14,3
8	B42/ $d_{г}$	42	100	116	50	1/2"	M16	490	435	55	113	52	160	120	165	14,8
9	B48/ $d_{г}$	48	120	116	55	1/2"	M16	545	475	70	113	56	180	140	165	21,0
10	B56/ $d_{г}$	56	120	166	60	3/4"	M16	625	555	70	113	56	180	140	215	26,0
11	B65/ $d_{г}$	65	140	166	70	3/4"	M16	700	600	100	113	56	210	170	215	33,5
12	B75/ $d_{г}$	75	140	166	80	3/4"	M16	800	700	100	113	56	210	170	215	35,2

Таблица 5.8

Геометрические параметры инжекционной горелки для газа с низкой теплотой сгорания (рис. 5.6), мм

№ варианта	Обозначение горелок	$d_{н.г}$	D	D_1	D_2	$D_{тр}$	d	A	B	B	Γ	D	E	$Ж$	$И$	Масса, кг
13	H15/ $d_{г}$	15	60	71	30	3/4"	M12	220	195	25	101	44	120	80	110	5,40
14	H18/ $d_{г}$	18	60	71	30	3/4"	M12	245	220	25	101	44	120	80	110	5,70
15	H21/ $d_{г}$	21	60	86	35	1"	M12	275	250	25	110	44	120	80	130	6,30
16	H24/ $d_{г}$	24	80	86	40	1"	M16	305	265	40	110	48	140	100	130	9,50
17	H28/ $d_{г}$	28	80	111	40	1 1/4"	M16	340	300	40	114	48	140	100	160	10,60
18	H32/ $d_{г}$	32	80	111	45	1 1/4"	M16	375	335	40	114	48	140	100	160	11,10
19	H37/ $d_{г}$	37	100	111	50	1 1/4"	M16	420	365	55	114	52	160	120	160	14,10

Таблица 5.9

Геометрические параметры горелки типа «труба в трубе» с присоединением газопроводов на резьбе (рис. 5.7), мм

№ варианта	Обозначение горелок	$d_{н.г}$	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	H	L	L_1	$V_B, \text{м}^3/\text{ч}$
20	ДВС60	60	130	1 1/2"	80	160	35	50	150	370	200	300
21	ДВС70	70	150	1 1/2"	100	180	35	50	150	370	200	450
22	ДВС90	90	170	2 1/2"	125	210	35	50	150	370	200	650
23	ДВС110	110	225	2 1/2"	150	240	70	90	200	473	260	950
24	ДВС130	130	225	2 1/2"	200	295	70	90	200	473	260	1300
25	ДВС150	150	225	2 1/2"	200	295	70	90	200	473	260	1750
26	ДВБ200	200	295	100	300	400	100	130	350	1333	500	2000
27	ДВБ250	250	350	100	350	460	100	130	350	1333	500	4000
28	ДВБ300	300	400	100	400	495	100	130	350	1333	500	6000
29	ДВБ350	350	460	150	500	600	125	155	400	1553	600	8300
30	ДВБ400	400	515	150	565	600	125	155	400	1553	600	11500
31	ДВБ425	425	530	150	580	600	125	155	400	1553	600	13500

Таблица 5.10

Геометрические параметры турбулентной горелки для газа
с низкой теплотой сгорания (рис. 5.8), мм

№ варианта	Обозначение горелок	D	D_{Γ}	$D_{\text{в}}$	A	B	B	Γ	E	Ж	И	K	L	M	H
Для газа 4-6 МДж/м ³															
1	ГТН-50	50	65	65	100	95,5	115	120,5	375	220	135	60	190	250	110
2	ГТН-60	60	75	75	110	100,5	125	132,5	405	220	150	70	190	250	128
3	ГТН-75	75	100	100	125	125	155	155	490	220	190	95	190	250	148
4	ГТН-100	100	125	125	140	140,5	185	183,5	570	280	230	120	250	310	178
5	ГТН-125	125	150	150	170	160	210	213	645	320	270	140	290	350	202
6	ГТН-150	150	200	200	190	190	260	255	770	420	350	190	400	460	258
7	ГТН-200	200	250	250	235	220	310	312	910	540	420	240	520	580	312
Для газа 6-9 МДж/м ³															
8	ГТН-50	50	50	65	100	90	110,5	120,5	365	220	135	60	190	250	90
9	ГТН-60	60	65	75	110	95,5	120	132,5	395	220	150	70	190	250	110
10	ГТН-75	75	75	100	125	99,5	140,5	155	450	220	190	95	190	250	128
11	ГТН-100	100	100	125	140	125	170,5	183,5	540	280	230	120	250	310	148
12	ГТН-125	125	125	150	170	139,5	200,5	213	615	320	270	140	290	350	178
13	ГТН-150	150	150	200	190	160	235	255	715	420	350	190	400	460	202
14	ГТН-200	200	200	250	235	190	285	312	855	540	420	240	520	580	258

Таблица 5.11

Геометрические параметры турбулентной горелки для газа
с низкой теплотой сгорания (рис. 5.8), мм

№ варианта	Обозначение горелок	O	P	T	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	a	b	c	m	n
Для газа 4-6 МДж/м ³														
1	ГТН-50	130	110	130	50	38	40	34	75	13	8	5	33	15
2	ГТН-60	150	128	150	60	45	48	40	90	15	10	e	40	18
3	ГТН-75	170	148	170	75	56	60	50	112	19	12	8	50	23
4	ГТН-100	200	178	200	100	75	80	68	150	25	16	10	66	30
5	ГТН-125	225	202	225	125	94	100	85	188	31	20	13	83	38
6	ГТН-150	280	258	280	150	113	120	100	225	38	24	15	100	45
7	ГТН-200	335	312	335	200	150	160	135	300	50	32	20	132	60

Окончание табл. 5.11

№ варианта	Обозначение горелок	<i>O</i>	<i>P</i>	<i>T</i>	<i>d</i> ₁	<i>d</i> ₂	<i>d</i> ₃	<i>d</i> ₄	<i>d</i> ₅	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>m</i>	<i>n</i>
Для газа 6-9 МДж/м ³														
8	ГТН-50	110	110	130	48	38	40	35	75	13	8	5	33	15
9	ГТН-60	130	128	150	57	45	48	42	90	15	10	e	40	18
10	ГТН-75	150	148	170	71	56	60	53	112	19	12	8	50	23
11	ГТН-100	170	178	200	95	75	80	70	150	25	16	10	60	30
12	ГТН-125	200	202	225	119	94	100	88	188	31	20	13	83	38
13	ГТН-150	225	258	280	142	113	120	105	225	38	24	15	100	45
14	ГТН-200	280	312	335	190	150	160	140	300	50	32	20	132	60

Таблица 5.12

Геометрические параметры радиационной горелки (рис. 5.9), мм

№ варианта	Обозначение горелок	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}	D_{11}	d	d_1	H	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6
15	ГР60-В/Н	86	18	37	39	79	50	110	140	65	90	50	110	14	12	3-6	340	147	95	279	45	47
16	ГР85-В/Н	104	22	44	45	86	65	130	160	65	90	55	128	14	12	3-8,5	375	150	95	312	45	55
17	ГР125-В/Н	122	26	52	54	94	65	130	160	75	100	65	146	14	12	4,5-11	440	170	110	357	60	65
18	ГР175-В/Н	150	29	61	63	103	80	150	185	90	120	75	174	18	14	4-15,5	495	175	111	409	60	74
19	ГР250-В/Н	176	44	77	79	119	94	170	205	100	130	90	200	18	14	6-21	540	184	113	435	75	94
20	ГР350-В/Н	212	50	90	93	133	125	200	235	110	140	110	236	18	14	6-22	575	193	113	465	75	109
21	ГР500-В/Н	250	65	105	108	148	150	225	260	130	160	130	274	18	14	8-25	660	209	119	530	75	140
22	ГР750-В/Н	300	76	127	130	170	200	280	315	150	185	140	328	18	18	12-36	745	240	139	605	75	165
23	ГР1050-В/Н	360	94	150	155	195	200	280	315	170	205	170	388	18	18	11-32	880	265	151	704	75	190
24	ГР1500-В/Н	430	128	190	195	235	300	395	435	200	235	210	458	23	18	10-45	980	300	153	773	75	244

Таблица 5.13

Геометрические параметры радиационной горелки (рис. 5.9), мм

№ варианта	Обозначение горелок	h	h_1	h_2	L	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	l	l_1	l_2	l_3	B	B_1	B_2	B_3	B_4	n	n_1	n_2
15	ГР60-В/Н	20	15	14	440	150	210	80	150	29	380	110	150	190	3;5;7	375	290	320	28	4	4	4
16	ГР85-В/Н	20	15	14	440	160	210	85	175	35	380	110	150	190	3;5;7	375	290	320	34	4	4	4
17	ГР125-В/Н	20	15	15	440	190	210	100	175	40	380	150	150	190	3;5	375	290	320	42	4	4	6
18	ГР175-В/Н	21	17	15	440	210	210	110	200	49	380	150	150	190	3;5	375	290	320	52	4	4	6
19	ГР250-В/Н	23	17	15	550	240	210	125	225	59	490	200	150	190	3;5	425	325	430	58	4	4	6

Окончание табл. 5.13

№ варианта	Обозначение горелок	h	h_1	h_2	L	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	l	l_1	l_2	l_3	B	B_1	B_2	B_3	B_4	n	n_1	n_2
20	ГР350-В/Н	23	19	15	580	290	210	150	250	70,5	520	240	150	250	3;5	425	325	460	71	8	4	8
21	ГР500-В/Н	24	19	15	600	330	210	170	325	85	540	250	150	250	3;5;7	450	325	480	80	8	4	8
22	ГР750-В/Н	24	22	17	620	328	210	200	400	100	560	250	150	290	3;5;7	465	360	500	100	8	4	8
23	ГР1050-В/Н	26	22	17	620	330	210	225	450	120	560	250	150	290	3;5;7	465	360	500	122	8	4	12
24	ГР1500-В/Н	28	22	19	750	350	210	260	500	147	690	250	150	330	5;7	500	400	630	136	12	8	12

Таблица 5.14

Геометрические параметры инжекционной горелки с подогревом воздуха (рис. 5.10), мм

№ варианта	Обозначение горелок	$d_{н.г}$	D	D_1	D_2	D_3	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	$d_{тр}$	A	B	B	Γ	Δ	E	$Ж$	n	n_1	Масса, кг
1	П65/ $d_{г}$	65	170	125	360	400	75	160	200	18	18	3/8"	1035	785	250	200	32	24	20	12	4	113,0
2	П75/ $d_{г}$	75	190	125	360	400	75	160	200	18	18	3/8"	1145	895	250	200	32	24	20	12	4	122,0
3	П86/ $d_{г}$	86	220	200	445	490	100	180	220	23	18	1/2"	1360	1035	325	230	40	26	22	12	8	206,0
4	П100/ $d_{г}$	100	260	200	445	490	100	180	220	23	18	1/2"	1530	1205	325	230	40	26	22	12	8	227,0
5	П116/ $d_{г}$	116	300	250	495	540	125	210	250	23	18	1/2"	1740	1395	345	250	50	28	22	16	8	282,0
6	П134/ $d_{г}$	134	350	300	655	705	150	240	285	25	23	3/4"	2000	1615	385	280	50	30	24	20	8	429,0
7	П154/ $d_{г}$	154	410	300	655	705	150	240	285	25	23	3/4"	2245	1860	385	280	50	30	24	20	8	489,0
8	П178/ $d_{г}$	178	470	350	705	755	200	295	340	25	23	1"	2585	2145	440	350	55	32	26	20	8	597,0
9	П205/ $d_{г}$	205	490	350	705	755	250	350	395	25	23	1"	2915	2475	440	350	65	32	28	20	12	920,0
10	П235/ $d_{г}$	235	510	350	705	755	250	350	395	25	23	1"	3290	2850	440	350	70	32	28	20	18	925,0
11	П270/ $d_{г}$	270	510	450	550	590	300	395	435	23	23	1"	3695	3230	465	460	70	36	28	16	12	1062,0

Таблица 5.15

Геометрические параметры форсунки высокого давления конструкции Шухова (рис. 5.11), мм

№ варианта	Номер форсунки	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	И	К	П	М	Н	α	β	Масса, кг	Производительность, кг/ч		
																	1	2	3
1	1	2	4	4,5	7,5	12	16	22	41	1/2" тр.	160	60	55			0,7	3	7	10
2	2	3	5	5,5	8,5											0,7	6	20	30
3	3	4	6	7	18											0,8	12	40	60
4	4	5	7	8	20											0,8	19	60	90
5	5	6	8	9	20	14	20	28	41	1/2" тр.	170	70	55	66°	28°	0,8	27	80	120
6	6	7	9	10	22											0,8	38	100	150
7	7	8	10	11	22											0,8	50	130	180
8	8	10	12	13	27											1,5	70	180	240
9	9	13	15	16	30											1,5	125	250	320
10	10	16	18	20	32	23	34	42	50	3/4" тр.	195	70	65	85°	35°	1,4	200	350	-

49

Таблица 5.16

Геометрические параметры форсунки высокого давления с двойным распылением (рис. 5.12), мм

№ варианта	Тип форсунки	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9	d_{10}	d_{11}	d_{12}	А	Б	В	Г	Д	Масса, кг
11	ФВД-100	1/2"	1"	1 1/2"	1/2"	1/2"	3,0	10	10,8	12	16	17	75	1270	170	20	1050	120	10,2
12	ФВД-150	1/2"	1"	1 1/2"	3/4"	1/2"	3,8	10	11,3	15	19	20	75	1270	170	20	1050	120	10,2
13	ФВД-200	1/2"	1 1/4"	1 1/2"	3/4"	1/2"	4,3	10	11,7	17	21	22	75	1270	170	20	1050	120	10,2
14	ФВД-300	1/2"	1 1/4"	2"	1"	3/4"	5,3	10	12,5	21	25	26	75	1270	170	20	1050	120	12,9
15	ФВД-400	1/2"	1 1/4"	2-	1"	3/4"	6,0	10	13,0	24	28	29	75	1270	170	20	1050	120	12,9
16	ФВД-500	1/2"	1 1/4"	2"	1 1/4"	1"	6,8	13	16,0	27	31	32	75	1470	170	20	1250	120	14,9
17	ФВД-600	1/2"	1 1/4"	2"	1 1/4"	1"	7,5	13	16,5	29	33	34	75	1470	170	20	1250	120	14,9

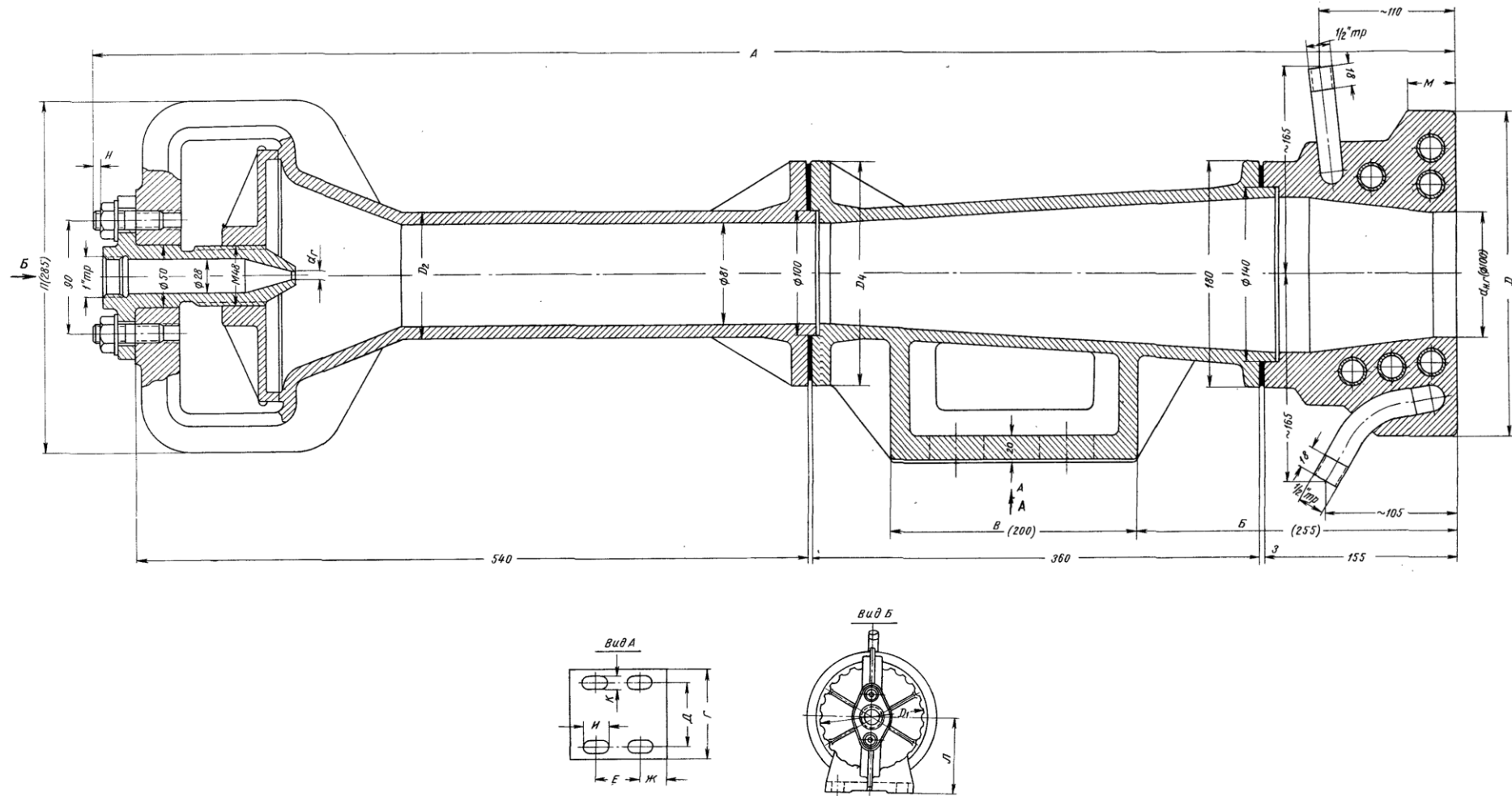


Рис. 5.1. Инжекционная горелка с водоохлаждаемым носиком для газа с высокой теплотой сгорания [6]

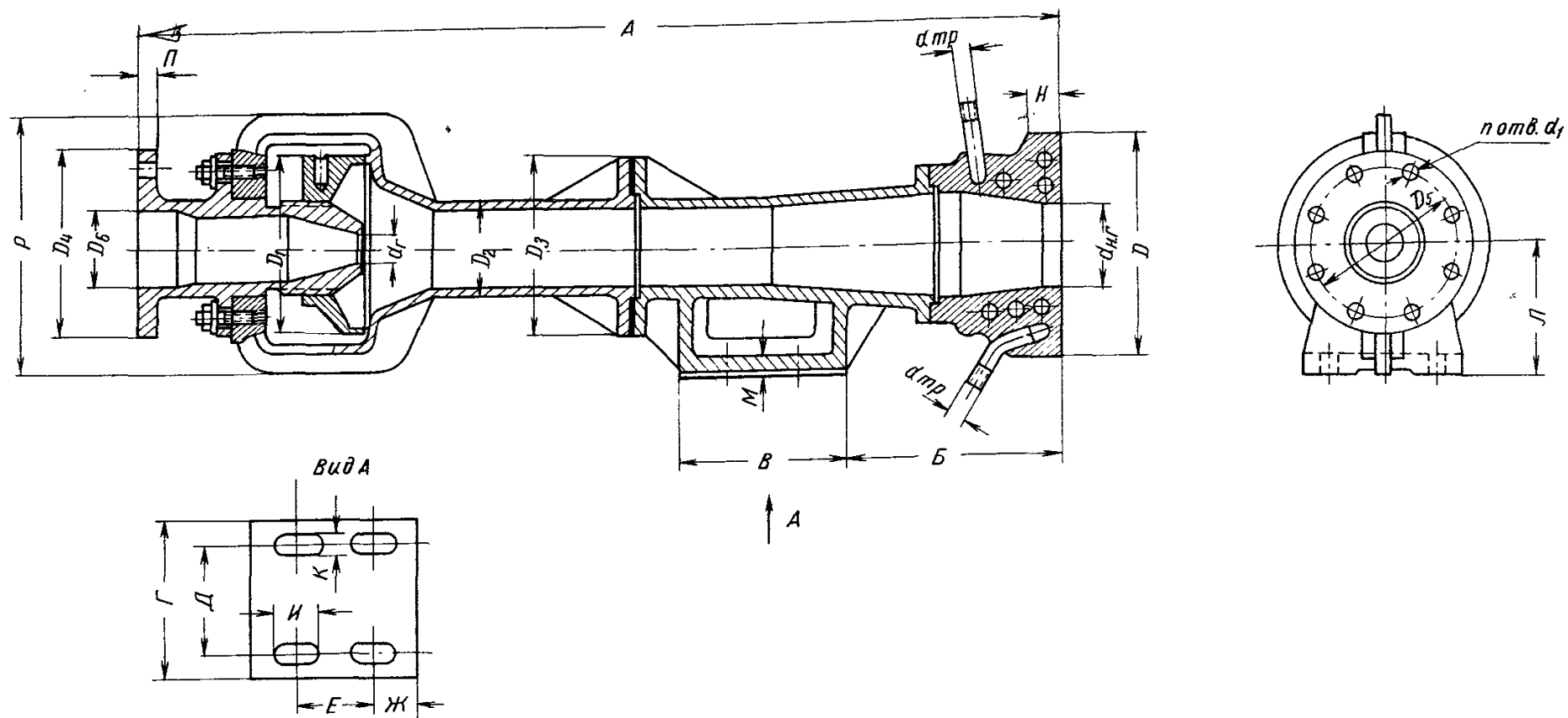


Рис. 5.2. Инжекционная горелка для газа с низкой теплотой сгорания [6]

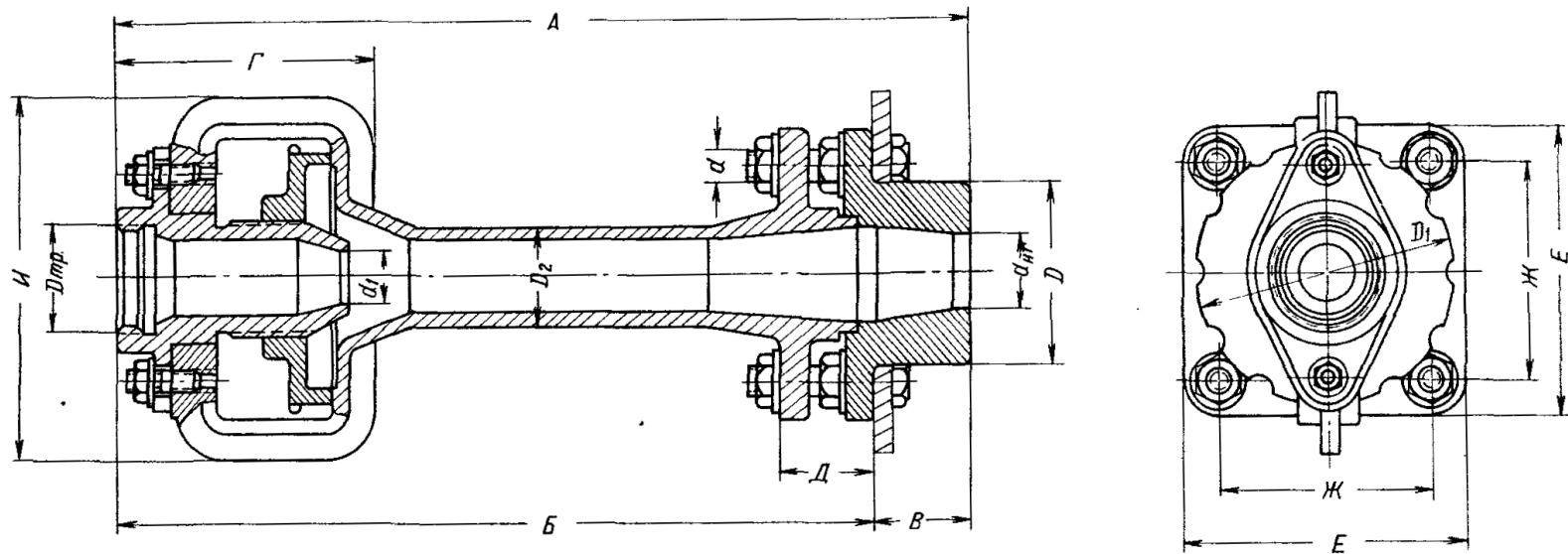


Рис. 5.3. Инжекционная горелка для газа с низкой теплотой сгорания [6]

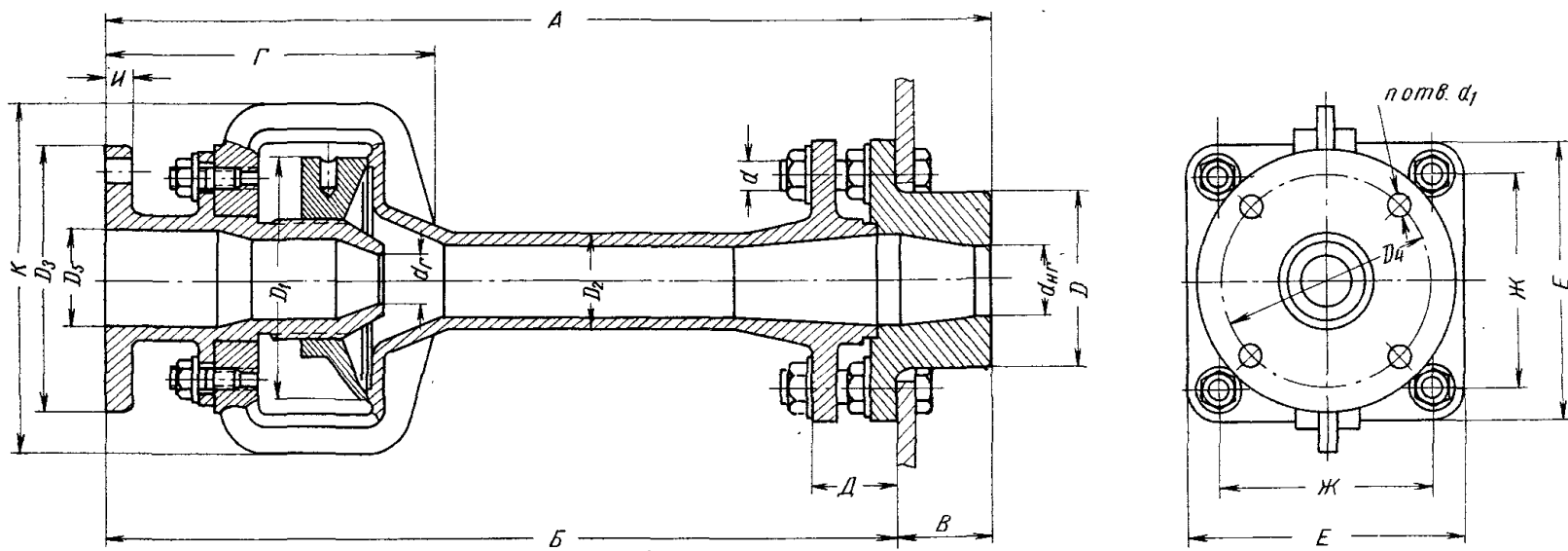


Рис. 5.4. Инжекционная горелка для газа с низкой теплотой сгорания [6]

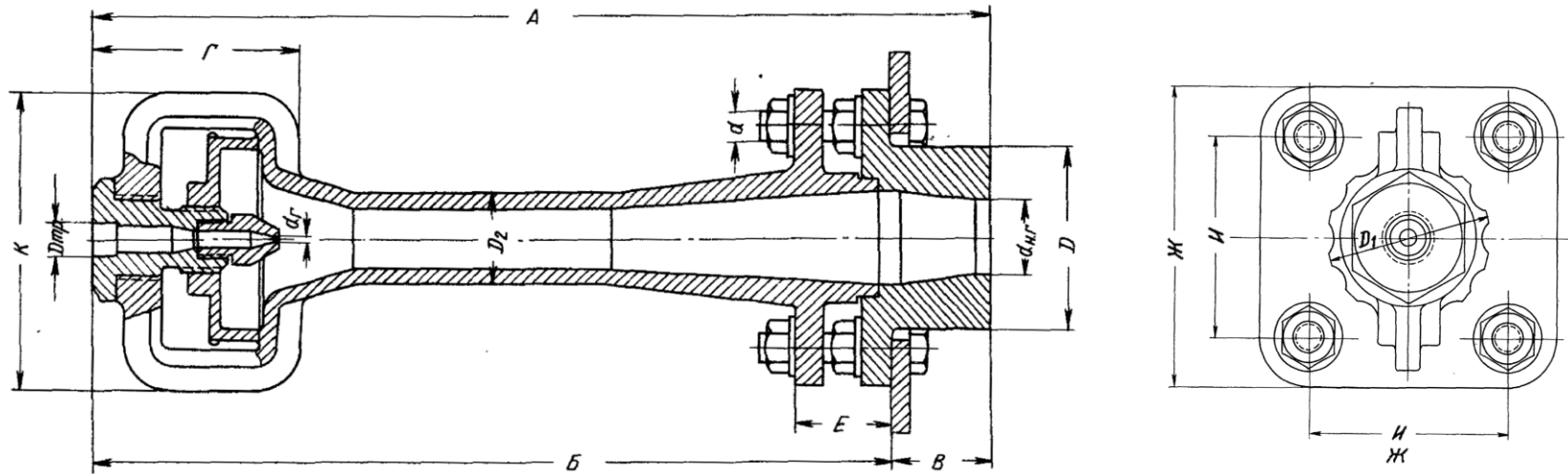


Рис. 5.5 Инжекционная горелка с неохлаждаемым носиком для газа с высокой теплотой сгорания [6]

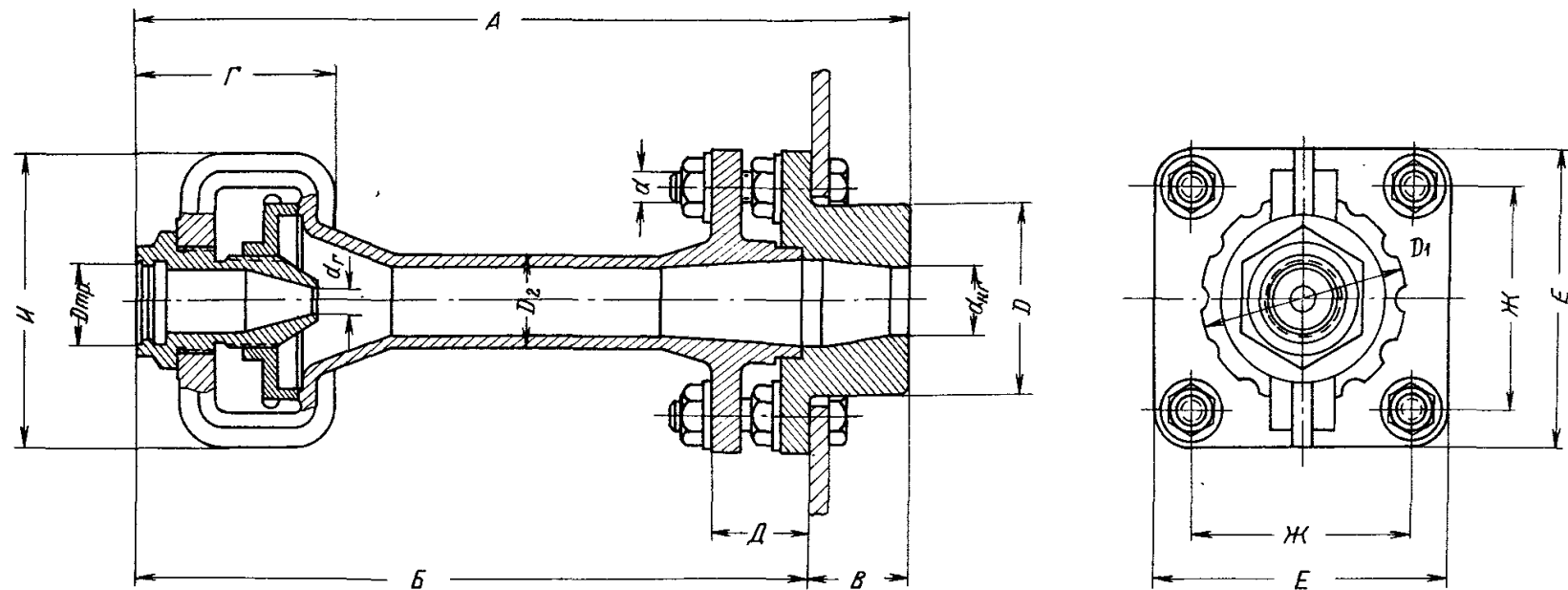


Рис. 5.6. Инжекционная горелка для газа с низкой теплотой сгорания [6]

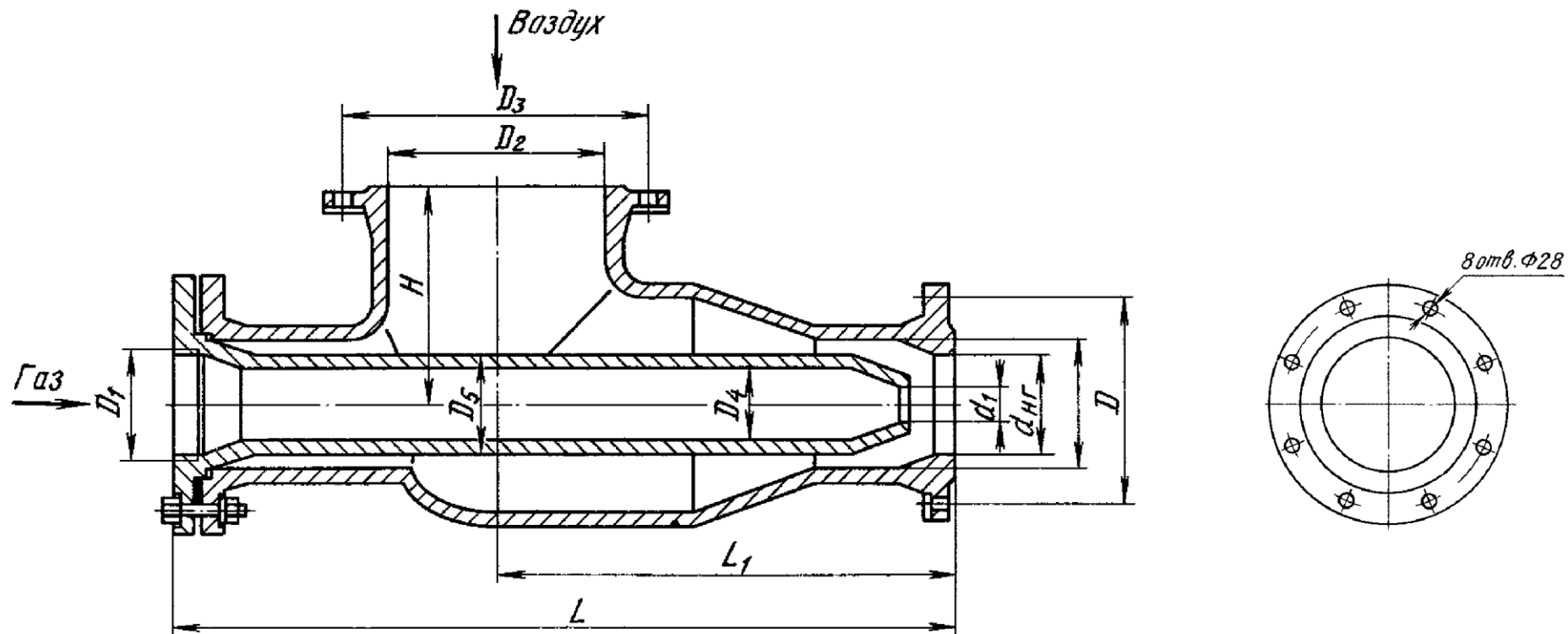


Рис. 5.7. Горелка типа «труба в трубе» с присоединением газопроводов на резьбе [6]

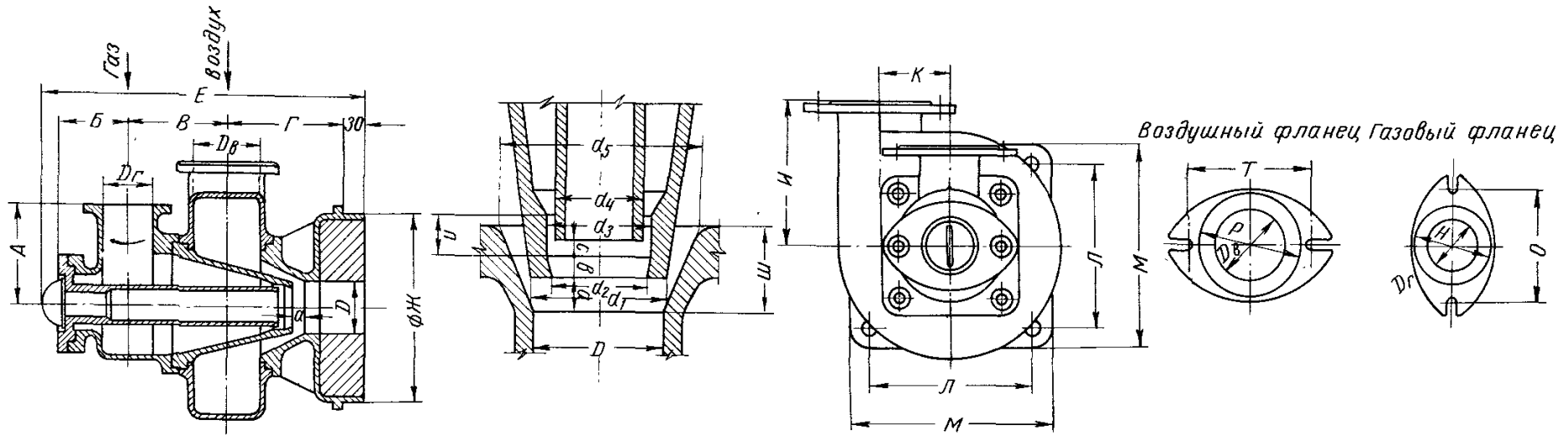


Рис. 5.8. Турбулентная горелка для газа с низкой теплотой сгорания [6]

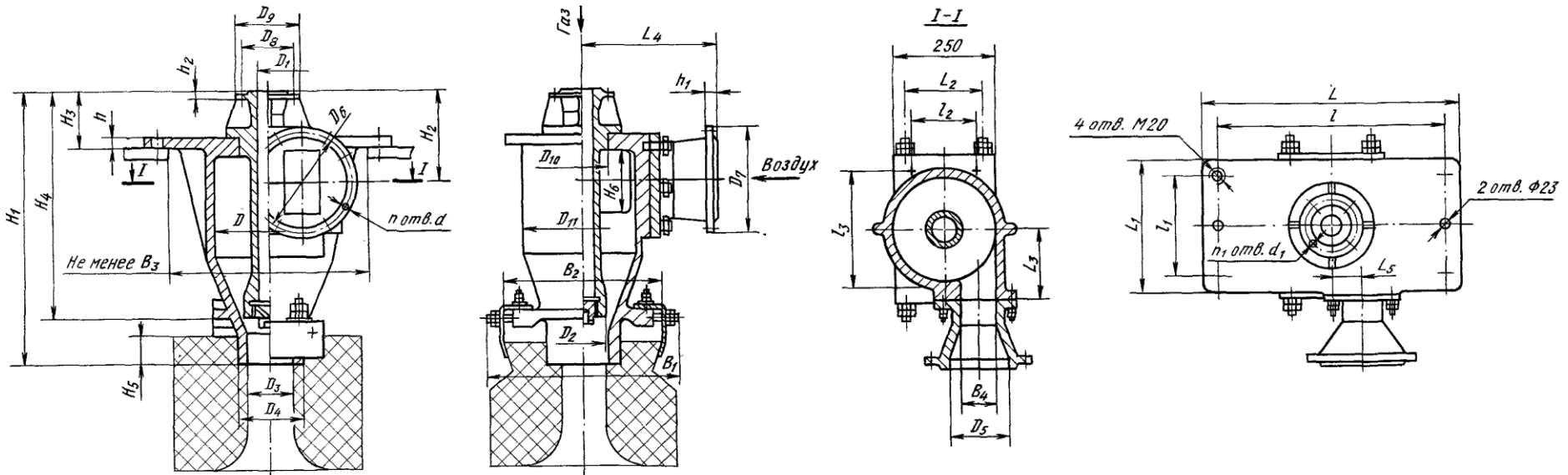


Рис. 5.9. Радиационная горелка [6]

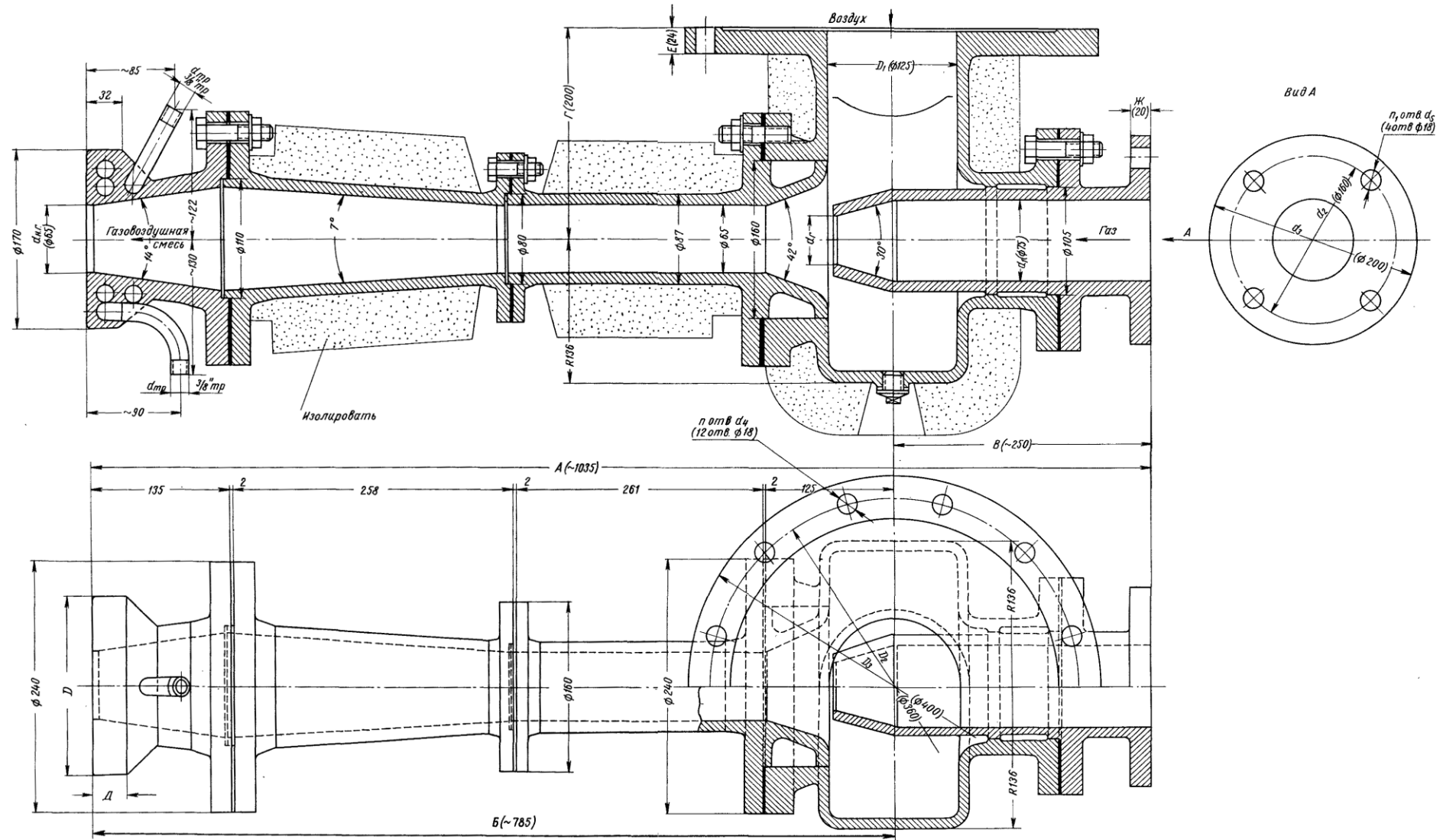


Рис. 5.10. Инжекционная горелка с подогревом воздуха [6]

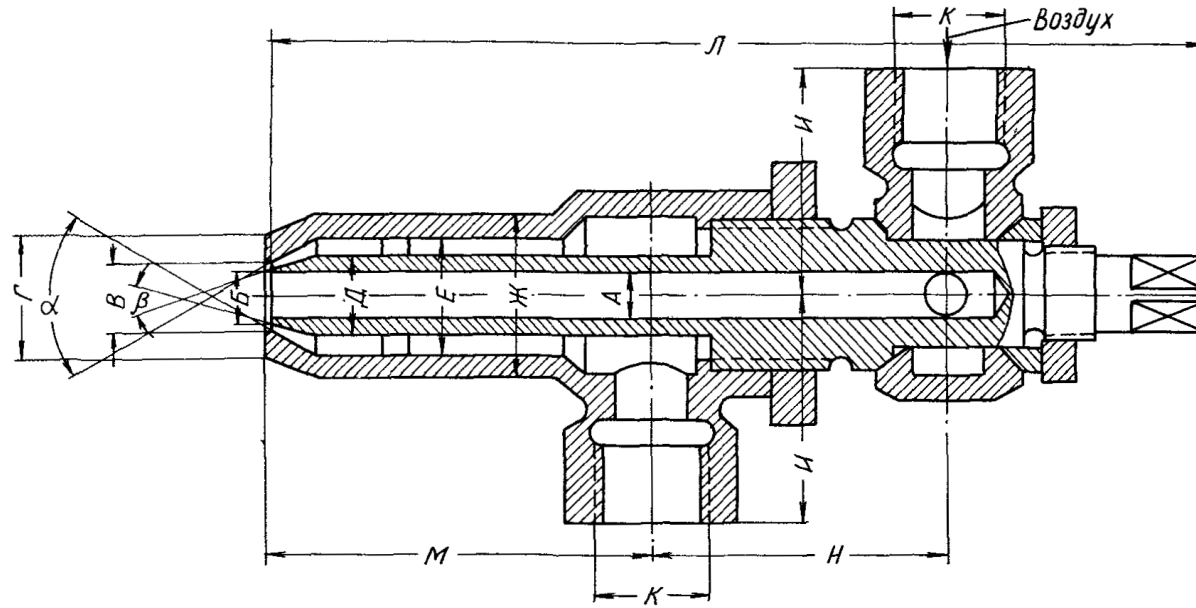


Рис. 5.11. Форсунка высокого давления конструкции Шухова [6]

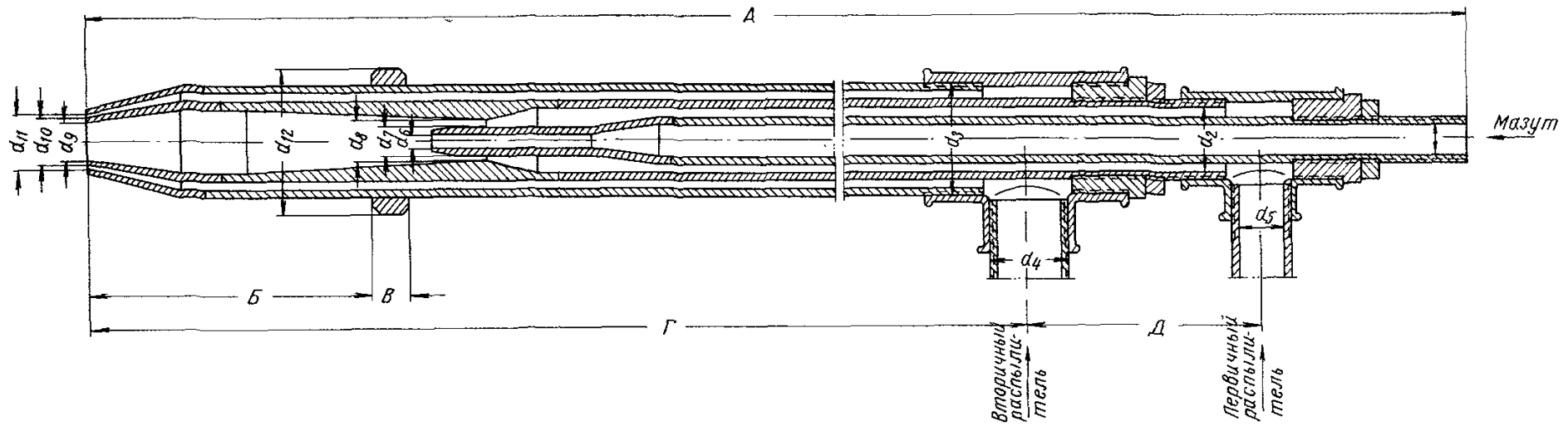


Рис. 5.12. Форсунка высокого давления с двойным распылением [6]

ОТВЕТЫ НА ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

К главе 1.

1.1. $C^P = 76,27 \%$; $H^P = 2,33 \%$; $O^P = 2,69 \%$; $S_{o+k}^P = 7,9 \%$; $N^P = 0,54 \%$; $A^P = 0,27 \%$; $W^P = 10,0 \%$. **1.2.** $C^r = 77,0 \%$; $H^r = 5,7 \%$; $S_{o+k}^r = 9,7 \%$; $N^r = 1,3 \%$; $O^r = 6,3 \%$. **1.3.** $C^P = 20,6 \%$; $H^P = 2,7 \%$; $O^P = 2,8 \%$; $S_{o+k}^P = 1,7 \%$; $N^P = 0,1 \%$; $A_u^P = 44,2 \%$; $W^P = 11,5 \%$. **1.4.** $C^r = 74,0 \%$; $H^r = 9,5 \%$; $S_{o+k}^r = 4,9 \%$; $N^r = 11,3 \%$; $O^r = 6,3 \%$. **1.5.** $C^P = 36,43 \%$; $H^P = 2,45 \%$; $O^P = 2,92 \%$; $S_{o+k}^P = 3,6 \%$; $N^P = 0,75 \%$; $A^P = 37,85 \%$; $W^P = 16,0 \%$. **1.6.** $C_{cm}^P = 52,8 \%$; $H_{cm}^P = 3,7 \%$; $O_{cm}^P = 6,8 \%$; $S_{o+k cm}^P = 3,1 \%$; $N_{cm}^P = 1,0 \%$; $A_{cm}^P = 22,6 \%$; $W_{cm}^P = 10,0 \%$. **1.7.** $CH_4^B = 82,52 \%$; $C_2H_6^B = 2,87 \%$; $C_3H_8^B = 1,2 \%$; $C_4H_{10}^B = 0,93 \%$; $N_2^B = 5,2 \%$; $H_2O = 7,28 \%$. **1.8.** $Q_H^P = 36068$ кДж/кг; $Q_B^P = 38743$ кДж/кг. **1.9.** $Q_H^P = 35343$ кДж/м³. **1.10.** $Q_H^P = 19961$ кДж/кг. **1.11.** $Q_H^P = 34581$ кДж/м³. **1.12.** $Q_{H cm}^P = 28080$ кДж/м³. **1.13.** $Q_H^P = 49981$ кДж/кг. **1.14.** $Q_H^P = 27803$ кДж/кг. **1.15.** $Q_B^P = 11811$ кДж/кг; $W^{np} = 3,04$ (кг·%) / МДж; $A^{np} = 3,04$ (кг·%) / МДж; $S^{np} = 0,257$ (кг·%) / МДж; $\varepsilon = 0,36$. **1.16.** $\tau_1 = 20,8$ ч; $\tau_2 = 20,1$ ч; **1.17.** $B_{ym} = 15170$ кг/ч.

К главе 2.

2.1. $V_g^o = 9,47$ м³/кг; $V_g = 11,84$ м³/кг; $V_{RO_2} = 1,46$ м³/кг; $V_{N_2}^o = 7,49$ м³/кг; $V_{H_2O}^o = 1,33$ м³/кг; $V_z^o = 10,28$ м³/кг; $V_z = 12,65$ м³/кг. **2.2.** $V_g^o = 9,4$ м³/м³; $V_g = 10,34$ м³/м³; $V_{RO_2} = 1,0$ м³/м³; $V_{N_2}^o = 7,47$ м³/м³; $V_{H_2O}^o = 2,1$ м³/м³; $V_z^o = 10,58$ м³/м³; $V_z = 11,53$ м³/м³. **2.3.** $V_g^o = 5830$ м³; $V_g = 7579$ м³. **2.4.** $V_{g cm}^o = 7,32$ м³/м³; $V_{g cm} = 8,05$ м³/м³; $V_{RO_2 cm} = 0,74$ м³/м³; $V_{N_2 cm}^o = 5,69$ м³/м³; $V_{H_2O cm}^o = 1,75$ м³/м³; $V_{z cm}^o = 8,2$ м³/м³; $V_{z cm} = 8,94$ м³/м³. **2.5.** $V_g = 7823$ м³/ч. **2.6.** $V_g^o = 29360$ м³/ч; $V_g = 33264$ м³/ч. **2.7.** $V_g^o = 3765$ м³. **2.8.** $V_{cz} = 7,84$ м³/кг. **2.9.** $V_{H_2O}^o = 963$ м³/ч; $V_{H_2O}^o = 965$ м³/ч. **2.10.** $\alpha = 1$. **2.11.** $\Delta\alpha = 0,08$. **2.12.** $V_g = 7,41$ м³/кг; $V_{RO_2} = 1,29$ м³/кг; $V_{N_2}^o = 5,86$ м³/кг; $V_{H_2O}^o = 0,18$ м³/кг; $V_{CO} = 0,5$ м³/кг. **2.13.** $V_{RO_2} = 1,19$ м³/кг; $V_{R_2} = 5,14$ м³/кг; $CO_2 = 18,5 \%$; $SO_2 = 0,31 \%$. **2.14.** $G_z = 9,21$ кг/кг; для пылеугольной топки $\mu = 29,66$ г/м³; для слоевой топки $\mu = 7,81$ г/м³. **2.15.** $G_z = 4,9$ кг/кг; $\mu = 108,4$ г/м³. **2.16.** $G_z = 14,36$ кг/м³.

К главе 3.

3.1. $t_k = 1700$ °С; **3.2.** $t_k = 1890$ °С. **3.3.** При 500 °С $h_z = 9081$ кДж/кг; при 2500 °С $h_z = 53225$ кДж/кг; $t_{k1} = 1744$ °С; $t_{k2} = 1750$ °С. **3.4.** При 500 °С $h_z = 8281$ кДж/м³; при 2500 °С $h_z = 48867$ кДж/м³; $t_k = 2198$ °С; $t_m = 1935$ °С.

3.5. $t_{к1} = 1854$ °С; $t_{к2} = 1875$ °С; $t_{к3} = 1901$ °С. **3.6.** $t_{к} = 1890$ °С; $t_{д} = 1542$ °С.
3.7. $t_{г} = 440$ °С. **3.8.** $Q_{дис1} = 460$ кДж/кг; $Q_{дис2} = 630$ кДж/кг; $\Delta Q_{дис} = 170$ кДж/кг.
3.9. $h_{г} = 2604$ кДж/кг. **3.10.** $h_{г} = 18030$ кДж/м³. **3.11.** $h_{г} = 12\ 060$ кДж/кг.
3.12. $h_{г} = 2790$ кДж/кг; $h_{з} = 215$ кДж/кг.

К главе 4.

4.1. Для воздушной смеси $L_{г} = 14,75$ %, $L_{н} = 4,82$ %, $\alpha_{г} = 0,61$, $\alpha_{н} = 2,1$; для кислородной смеси $L_{г} = 58,76$ %, $L_{н} = 5,24$ %, $\alpha_{г} = 0,075$, $\alpha_{н} = 1,92$. **4.2.** $U_{н} = 1,55$ м/с. **4.3.** $U_{н} = 3,83$ м/с. **4.4.** $U_{Т} = 55$ м/с. **4.5.** $U_{н} = 0,3$ м/с. **4.6.** Для сухого газа $L_{г} = 14,66$ %, $L_{н} = 4,75$ %, $\alpha_{г} = 0,61$, $\alpha_{н} = 2,1$; для влажного газа $L_{г} = 14,66$ %, $L_{н} = 4,75$ %, $\alpha_{г} = 0,65$, $\alpha_{н} = 2,25$. **4.7.** При $d_{г} = 60$ г/м³ $L_{г} = 14,73$ %, $L_{н} = 4,78$ %, $\alpha_{г} = 0,63$, $\alpha_{н} = 2,16$; при $d_{г} = 90$ г/м³ $L_{г} = 14,73$ %, $L_{н} = 4,78$ %, $\alpha_{г} = 0,65$, $\alpha_{н} = 2,23$.

К главе 5.

5.1. $l_{ф}^к = 0,1$ м. **5.2.** $l_{ф}^к = 0,03$ м. **5.3.** $l_{ф}^д = 1,37$ м; **5.4.** $\tau = 0,57$ с. **5.5.** $w'_{кр} = 3,36$ м/с; $w''_{кр} = 29,52$ м/с. **5.6.** $w'_{кр} = 1,1$ м/с; $w''_{кр} = 10,4$ м/с. **5.7.** $\Delta p = 1776$ Па.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данный практикум содержит краткие теоретические сведения по основным разделам лекционного курса «Топливо и теория горения» и «Сжигание и термическая переработка топлива», необходимые для выполнения соответствующих практических заданий. Выполнение заданий, а также курсового проекта позволит обучающимся закрепить теоретический материал и получить практические навыки в выполнении теплотехнических расчётов.

Последовательное изложение учебного материала должно способствовать глубокому усвоению студентами дисциплин «Топливо и теория горения» и «Сжигание и термическая переработка топлива». Оно предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки «Теплоэнергетика и теплотехника», а также может быть полезно студентам других направлений при изучении дисциплины «Теплотехника».

Умения и навыки, полученные при освоении данного учебного пособия необходимы обучающимся при изучении дисциплин «Котельные установки и парогенераторы», «Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки» и «Тепловые электрические станции».

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица П.1

Расчётные характеристики энергетических углей, добываемых в СССР

Республика, бассейн месторождение	Марка, класс	Рабочая масса топлива, состав, %								Низшая теплота сгорания, Q_n^p , кДж/кг
		W^p	A^p	S_k^p	S_{op}^p	C^p	H^p	N^p	O^p	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Донбасс	Д; Р	13	21,8	1,5	1,5	49,3	3,6	1	8,3	19600
УССР, Донецкая, Луганская обл. и РСФСР, Ростовская обл.	Д; отсев	14	25,8	2,5	1,4	44,8	3,4	1	7,1	17800
	Г; Р	8	23	2	1,2	55,2	3,8	1	5,8	21500
	Г; отсев	11	26,7	1,9	1,2	49,2	3,4	1	5,6	19800
	Г; промпродукт	9	34,6		3,2	44	3,1	0,8	5,3	17500
	Т; Р	5	23,8	2	0,8	62,7	3,1	0,9	1,7	24100
	А; Ш; СП	8,5	22,9	1	0,7	63,8	1,2	0,6	1,3	22500
	ПА; Р; отсев	5	20,9	1,7	0,7	66,6	2,6	1	1,5	25300
Ж; К; ОС; промпродукт	9	35,5	1,9	0,6	45,5	2,9	0,9	3,7	18000	
Кузбасс										
РСФСР, Кемеровская обл. Угли, добываемые в шахтах	Д; Р; СШ	12	13,2		0,3	58,7	4,2	1,9	9,7	22800
	Г; Р; СШ	8,5	11		0,5	66	4,7	1,8	7,5	26300
	1СС; Р; отсев	9	18,2		0,3	61,5	3,7	1,5	5,8	23900
	2СС; Р; С; Ш; отсев	9	18,2		0,4	64,1	3,3	1,5	3,5	24500

Продолжение табл. П.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
19	Т; Р; отсев	6,5	16,8	0,4		68,6	3,1	1,5	3,1	26100
	Ж; К; ОС; промпродукт	7	30,7	0,7		53,6	3,0	1,6	3,4	20900
	Угли, добываемые в углеразрезах: Грамотеннский, Колмогоровский и Байдаевский	14	9,5	0,5		59,5	4	1,5	11	22800
	Г; Р; окисленный									
	Кедровский, имени Вахрушева, Киселёвский № 8, Новосергеевский, Бачатский	10	11,3	0,5		67,7	3,6	1,6	5,3	25800
	1СС; 2СС; окисленный									
	Краснобродский, Красногорский, Листвянский	10	16,2	0,3		65,7	3	1,7	3,1	24700
	Т; окисленный									
	Томьусинский № 3, 4,7,8, Черниговский	12	18,9	0,4		59,1	3,4	1,7	4,5	22500
	1СС; 2СС; окисленный									
Грузинская ССР										
Ткварчельское	Ж; промпродукт	11,5	35	0,9	0,4	42,5	3,2	0,8	5,7	16800
Ткибульское	Г; промпродукт	13	27	0,7	0,6	45,4	3,5	0,9	8,9	17900
Казахская ССР										
Карагандинский	К; Р	8	27,6	0,8		54,7	3,3	0,8	4,8	21300

Продолжение табл. П.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	К; промпродукт	10	38,7	0,9		42,1	2,7	0,7	4,9	16500
Экибастузский:										
разрезы 1,2,3	СС; Р	7	38,1	0,8		43,4	2,9	0,8	7	16800
разрез 5/6	СС; Р	7	40,9	0,8		41,1	2,8	0,8	6,6	15800
Куучекинское	СС; Р	7	40,9	0,7		42,5	2,6	0,7	5,6	16400
Ленгерское	БЗ; Р; отсев	29	11,4	1,2	0,5	45	2,6	0,4	9,9	16000
Киргизская ССР										
Кок-Янгак	Д; Р; ОМ; СШ	10,5	17,9	1,7		55,8	3,7	0,6	9,8	21500
Таш-Кумыр	Д; Р; СШ	14,5	21,4	1,2		48,4	3,3	0,8	10,4	18400
Сулюкта	БЗ; ОМ; СШ	22	13,3	0,2	0,3	50,1	2,6	0,5	11	17900
Кызыл-Кия	БЗ; ОМ; СШ	28	14,4	0,6	0,3	44,4	2,4	0,5	9,4	15800
Кара-киче	БЗ; ОМ; СШ	19	8,1	0,7		55	3,1	0,6	13,5	19800
РСФСР										
Башкирская АССР										
Бабаевское	Б1; Р	56,5	7	0,5		25,4	2,4	0,2	8	8800
Бурятская АССР										
Гусиноозерское	БЗ; Р	23,5	16,8	0,5		43,9	3,2	0,7	11,4	16400
Холбольджинское	БЗ	22	12,5	0,3		46,5	3,3	0,7	14,7	16600
Баянгольское	Д; Р	23	15,4	0,5		47,5	3,4	0,9	9,3	18100

Продолжение табл. П.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Иркутская обл.										
Черемховское, Забитуйское	Д; Р; отсеv	13	27	1,1	45,9	3,4	0,7	8,9	17900	
Азейское	Б3; Р	25	12,8	0,4	46	3,3	0,9	11,6	17300	
Мигунское	Б3; Р	22	14,8	0,9	46,6	3,7	0,9	11,1	17600	
Канско-Ачинский бассейн										
Ирша-Бородинское	Б2; Р	33	6	0,2	43,7	3	0,6	13,5	15700	
Назаровское	Б2; Р	39	7,3	0,4	37,6	2,6	0,4	12,7	13000	
Березовское	Б2; Р	33	4,7	0,2	44,3	3	0,4	14,4	15700	
Боготольское	Б1; Р	44	6,7	0,5	34,3	2,4	0,4	11,7	11800	
Абанское	Б2; Р	33,5	8	0,4	41,5	2,9	0,6	13,1	14200	
Кемеровская обл.										
Итатское	Б1; Р	40,5	6,8	0,4	36,6	2,6	0,4	12,7	12800	
Барандатское	Б2; Р	37	4,4	0,2	41,9	2,9	0,4	13,2	14800	
Пермская обл.										
Кизеловский бассейн	Г; Р; отсеv; К; М	6	31	6,1	48,5	3,6	0,8	4	19700	
	Г; промпродукт	6,5	39	6,8	1,6	37,4	2,9	0,7	5,1	15900
Коми АССР										

Продолжение табл. П.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Печорский бассейн:										
Воркутинское	Ж; Р; отсеv	5,5	23,6	0,8		59,6	3,8	1,3	5,4	23600
Интитское	Д; Р; отсеv	11	25,4	2	0,6	47,7	3,2	1,3	8,8	18300
Магаданская обл.										
Нижнее-Аркагалинское	Д; Р	16,5	9,2	0,3		59,1	4,1	1	9,8	22900
Верхнее-Аркагалинское	Д; Р	19	13	0,1		50,1	3,4	0,7	13,7	18500
Анадырское	Б3; Р	21	11,9	0,1		50,1	4	0,7	12,2	19200
Минусинский бассейн:										
Черногорское	Д; Р	14	15,5	0,5		54,9	3,7	1,4	10	21100
Подмосковный бассейн:										
В целом по бассейну	Б2; Р; ОМСШ	32	25,2	1,5	1,2	28,7	2,2	0,6	8,6	10100
Трест «Черепетьуголь»	Б2; Р; ОМСШ	31	29	1,2	0,9	26	2,2	0,4	9,3	9300
Приморский край										
Липовецкое	Д; Р; СШ	6	33,8	0,4		46,1	3,6	0,5	9,6	18700
Сучанский	Г ₆ ; Р	5,5	34	0,4		49,8	3,2	0,8	6,3	19500
Сучанский	Ж ₆ ; Р	5,5	32,1	0,4		52,7	3,2	0,7	5,4	20500
Сучанский	Т; Р	5	22,8	0,5		64,6	2,9	0,8	3,4	24200
Подгороденское	Т; Р	4	40,3	0,4		48,7	2,6	0,3	3,7	18400
Артёмовское	Б3; Р; СШ	24	24,3	0,3		35,7	2,9	0,7	12,1	13400
Тавричанское	Б3; ОМ; СШ	14	24,9	0,4		44,6	3,5	1,3	11,3	17100
Ретиховское	Б1; К; ОМ; СШ	42,5	17,3	0,2		27,3	2,3	0,3	10,1	10100
Чихезское	Б1; Р	43	12,5	0,2		30,3	2,5	0,4	11,1	10700
Бикинское	Б2; Р	37	22,1	0,3		26,8	2,3	0,7	10,8	9200

Продолжение табл. П.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Свердловская обл.										
Егоршинское	ПА; Р	8	23,9	0,4		60,3	2,5	0,9	4	22500
Волчанское	БЗ; Р	22	33,2	0,2		28,7	2,3	0,5	13,1	10000
Веселовское и Богословское	БЗ; Р	24	30,4	0,4		29,9	2,3	0,5	12,5	10400
Хабаровский край										
Райчихинское	Б2; К; О; МСШ; Р	37,5	9,4	0,3		37,7	2,3	0,6	12,2	12700
Райчихинское	Б1; Р; окисленный	47	7,9	0,3		30,4	1,7	0,5	12,2	9500
Ургальское	Г; Р	7,5	29,6	0,4		50,9	3,6	0,6	7,4	20000
Челябинский бассейн	БЗ; Р; МСШ	18	29,5	1		37,3	2,8	0,9	10,5	14000
Читинская обл.										
Букачачинское	Г; Р	8	9,2	0,6		67,9	4,7	0,8	8,8	26600
Черновское	Б2; Р	33,5	9,6	0,5		42,7	2,8	0,9	10	14600
Татауровское	Б2; Р	33	10	0,2		41,6	2,8	0,7	11,7	14900
Южный Сахалин	Д; Р; ОМ; СШ	11,5	22,1	0,4		51,5	4	1	9,5	22900
	Г; Р; КО; МСШ; КОМОШ	9,5	12,7	0,5		63,9	4,7	1,4	7,3	25300
	БЗ; Р	20	20	0,2		43,4	3,4	0,8	12,2	16400

Окончание табл. П.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Таджикская ССР										
Шураб, шахта №8	Б2; К; ОМ; СШ	29,5	9,2	0,6	0,4	47,2	2,2	0,5	10,4	16200
Шураб, шахта №1/2	Б3; Р	21,5	14,1	0,8	0,4	47,3	3	0,6	12,3	17200
Узбекская ССР										
Ангренское	Б2; ОМСШ	34,2	13,1	1,6		39,8	2	0,2	9,1	13800
УССР										
Львовско-Волынский бассейн:										
Волыньское	Г; Р	10	19,8	1,8	0,8	55,5	3,7	0,9	7,5	22500
Межреченский	Г; Р	8	25,8	2,3	0,8	53,7	3,6	0,7	5,1	21600
Якутская АССР										
Джебарики Хая	Д; Р	11	11,1	0,2		60,5	4,2	0,5	12,5	23000
Нерюнгринское	СС; Р	9,5	12,7	0,2		66,1	3,3	0,7	7,5	25000
Сангарское	Д; Р	10	13,5	0,3		61,2	4,7	0,8	9,6	24200
Чульмаканское	Ж; Р	7,5	23,1	0,3		59,0	4,1	1,0	5	23300

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица П.2

Расчётные характеристики торфа и горючих сланцев, добываемых в СССР

Республика, бассейн месторождение	Марка, класс	Рабочая масса топлива, состав, %								Низшая теплота сгорания, Q_n^p , кДж/кг
		W^p	A^p	S_{κ}^p	S_o^p	C^p	H^p	N^p	O^p	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Сланцы горючие										
Эстонская ССР Шахты и разрез «Вивиконд» Разрезы № 1, «Сыргола» и «Вивиконд»	Энергетический мелкий	13	40+ +14,4	1,3	0,3	24,1	3,1	0,1	3,7	10900
	Энергетический	12,5	41,2+ +18,4	1,4		20,6	2,7	0,1	3,1	9600
	Крупный, средний, мелкий	11,5	44,2+ +16,4	1,4	0,3	20,6	2,7	0,1	2,8	9600
	-	17,5	49,7+ +9,5	1,8	1,6	13,5	1,8	0,3	4,3	5800
Торф										
	Фрезерный торф	50	6,3	0,1		24,7	2,6	1,1	15,2	8100

Окончание табл. П.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Древесина									
	Дрова	40	0,6	-	30,3	3,6	0,4	25,1	10200

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Таблица П.3

Расчётные характеристики топочного мазута

Марка мазута	W^p , не более	A^c , не более	Горючая масса топлива, состав, %				Низшая теплота сгорания, Q_n^p , кДж/кг
			S^r	C^r	H^r	$N^r + O^r$	
Высокосернистый							
40	2	0,12	2,5	85,5	11,2	0,8	38300
100	2	0,14	2,7	85,7	10,6	1	37900
200	1	0,3	3	85,9	10,2	0,9	37700
Высокосернистый							
40	2	0,12	0,4	87,5	11,5	0,6	39100
100	2	0,14	0,4	87,5	11,1	1	38700

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Таблица П.4

Природные газы (сухие)

Газопровод	Состав газа по объёму, %							Низшая теплота сгорания, Q_n^p , кДж/м ³
	СН ₄	С ₂ Н ₆	С ₃ Н ₈	С ₄ Н ₁₀	С ₅ Н ₁₂ и более тяжёлые	Н ₂	СО ₂	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Брянск – Москва	92,8	3,9	1,1	0,4	0,1	1,6	0,1	37400
Бухара – Урал	94,9	3,2	0,4	0,1	0,1	0,9	0,4	36700
Газли – Каган	95,4	2,6	0,3	0,2	0,2	1,1	0,2	36600
Газли – Каган – Ташкент	94	2,8	0,4	0,3	0,1	2	0,4	36300
Гоголево – Полтава	85,8	0,2	0,1	0,1	0	13,7	0,1	31000
Дашава – Киев	98,9	0,3	0,1	0,1	0	0,4	0,2	35800
Джаркак – Ташкент	95,5	2,7	0,4	0,2	0,1	1	0,1	36700
Игрим – Пунга – Серов – Нижний Тагил*	95,7	1,9	0,5	0,3	0,1	0	0	36500
Карабулак – Грозный	68,5	14,5	7,6	3,5	1	3,5	1,4	45800
Карадаг – Тбилиси – Ереван	93,9	3,1	1,1	0,3	0,1	1,3	0,2	37100
Коробки – Жирное – Камышин	81,5	8	4	2,3	0,5	3,2	0,5	41500
Коробки – Лог – Волгоград	93,2	1,9	0,8	0,3	0,1	3	0,7	35900
Кумертау – Ишимбай – Магнитогорск	81,7	5,3	2,9	0,9	0,3	8,8	0,1	36800
Ленево – Кологривовка – Вольск	93,2	2,6	1,2	0,7	0	2	0,3	37000
Оренбург – Совхозное**	91,4	4,1	1,9	0,6	0	0,2	0,7	38000
Первомайск – Сторожевка	62,4	3,6	2,6	0,9	0,2	30,2	0,1	28300

Окончание табл. П.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Промысловка – Астрахань	97,1	0,3	0,1	0	0	2,4	0,1	35100
Рудки – Минск – Вильнюс и Рудки – Самбор	95,6	0,7	0,4	0,2	0,2	2,8	0,1	35500
Саратов – Горький	91,9	2,1	1,3	0,4	0,1	3	1,2	36200
Саратов – Москва	84,5	3,8	1,9	0,9	0,3	7,8	0,8	35900
Саушино – Лог, Волгоград	96,1	0,7	0,1	0,1	0	2,8	0,2	35100
Серпухов – Ленинград	89,7	5,2	1,7	0,5	0,1	2,7	0,1	37500
Средняя Азия – Центр	93,8	3,6	0,7	0,2	0,4	0,7	0,6	37600
Ставрополь – Москва (I нитка)	93,8	2	0,8	0,3	0,1	2,6	0,4	36200
Ставрополь – Москва (II нитка)	92,8	2,8	0,9	0,4	0,1	2,5	0,5	36600
Ставрополь – Москва (III нитка)	91,2	3,9	1,2	0,5	0,1	2,6	0,5	37100
Ставрополь – Невинномысск – Грозный	98,2	0,4	0,1	0,1	0	1	0,2	35700
Угерско – Стрый, Угерско – Киев, Угерско – Львов	98,5	0,2	0,1	0	0	1	0,2	35500
Удрицк – Сторжевка	91,9	2,4	1,1	0,8	0,1	3,2	0,5	36500
Хаджи-Абад – Фергана	85,9	6,1	1,5	0,8	0,6	5	0,1	38400
Шебелинка – Брянск – Москва	94,1	3,1	0,6	0,2	0,8	1,2	0	37900
Шебелинка – Острогожск, Шебелинка – Днепропетровск, Шебелинка – Харьков	92,8	3,9	1	0,4	0,3	1,5	0,1	37400

70

* В составе газа содержится СО в объеме 0,2 % и Не в объеме 1,3 %.

** В составе газа содержится СО в объеме 1,1 %.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Таблица П.5.1

Степень диссоциации двуокиси углерода, $k_0^{\text{CO}_2}$, %

Температура, °С	Парциальное давление двуокиси углерода, кПа														
	2,942	3,923	4,903	5,884	6,865	7,845	8,826	9,806	15,69	19,61	29,42	39,23	58,84	78,45	98,06
1500	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
1600	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	1,55	1,5	1,35	1,3	1,1	0,95	0,83	0,75	0,7
1700	4,1	3,8	3,5	3,3	3,1	3,0	2,9	2,8	2,4	2,2	1,9	1,75	1,6	1,4	1,3
1800	6,9	6,3	5,9	5,5	5,2	5,0	4,8	4,6	4,0	3,7	3,3	3,0	2,6	2,4	2,2
1900	11,1	10,1	9,5	8,9	8,5	8,1	7,8	7,6	6,5	6,1	5,3	4,9	4,3	3,9	3,6
2000	18,0	16,5	15,4	14,6	13,9	13,4	12,9	12,5	10,8	10,0	8,8	8,0	7,1	6,5	6,0
2100	25,9	23,9	22,4	21,3	20,3	19,6	18,9	18,3	15,9	14,9	13,1	12,0	10,5	9,7	9,0
2200	37,6	35,1	33,1	31,5	30,3	29,2	28,3	27,5	24,1	22,6	20,1	18,5	16,4	15,0	14,0
2300	47,6	44,7	42,5	40,7	39,2	37,9	36,9	35,9	31,8	30,0	26,9	24,8	22,1	20,3	19,0
2400	59,0	56,0	53,7	51,8	50,2	48,8	47,6	46,5	41,8	39,6	35,8	33,3	29,9	27,7	26,0
2500	69,1	66,3	64,1	62,2	60,6	59,3	58,0	56,9	52,0	49,7	45,4	42,6	38,7	36,0	34,0

Таблица П.5.2

Степень диссоциации водяного пара, $k_0^{\text{H}_2\text{O}}$, %

Температура, °С	Парциальное давление водяного пара, кПа															
	2,942	3,923	4,903	5,884	6,865	7,845	8,826	9,806	15,69	19,61	29,42	39,23	49,03	58,84	78,45	98,96
1600	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,63	0,60	0,54	0,50	0,46	0,42	0,38	0,35	0,30	0,28
1700	1,60	1,45	1,35	1,27	1,20	1,16	1,12	1,08	0,90	0,80	0,73	0,67	0,62	0,60	0,54	0,50
1800	2,70	2,40	2,25	2,10	2,00	1,90	1,85	1,80	1,53	1,40	1,25	1,15	1,05	1,00	0,90	0,83
1900	4,45	4,05	3,80	3,60	3,40	3,25	3,10	3,00	2,60	2,40	2,10	1,90	1,70	1,63	1,50	1,40
2000	6,30	5,75	5,35	5,05	4,80	4,00	4,45	4,30	3,55	3,40	2,95	2,65	2,50	2,40	2,20	2,00
2100	9,35	8,55	7,95	7,50	7,10	6,80	6,55	6,35	5,45	5,10	4,55	4,10	3,70	3,55	3,25	3,00
2200	13,4	12,3	11,5	10,8	10,3	9,90	9,60	9,30	7,95	7,40	6,50	5,90	5,40	5,10	4,70	4,40
2300	17,5	16,0	15,4	15,0	14,3	13,7	13,3	12,9	11,1	10,4	9,10	8,40	7,70	7,30	6,70	6,20
2400	24,4	22,5	21,0	20,0	19,1	18,4	17,7	17,2	15,0	13,9	12,2	11,2	10,4	9,90	9,00	8,40
2500	30,9	28,5	26,8	25,6	24,5	23,5	22,7	22,1	19,3	18,0	15,9	14,6	13,7	12,9	11,7	11,0

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Таблица П.6

Средние изобарные теплоёмкости продуктов сгорания

$t, ^\circ\text{C}$	$C_{\text{CO}_2},$ кДж/(м ³ ·К)	$C_{\text{N}_2},$ кДж/(м ³ ·К)	$C_{\text{H}_2\text{O}},$ кДж/(м ³ ·К)	$C_{\text{e}},$ кДж/(м ³ ·К)	$C_{\text{зл}},$ кДж/(кг·К)
0	1,60	1,29	1,49	1,30	-
100	1,70	1,30	1,51	1,32	0,79
300	1,86	1,31	1,54	1,34	0,86
500	1,99	1,33	1,59	1,37	0,92
700	2,09	1,35	1,64	1,40	0,95
900	2,17	1,38	1,70	1,43	0,97
1100	2,23	1,40	1,75	1,46	1,02
1300	2,28	1,43	1,80	1,47	1,09
1500	2,34	1,44	1,85	1,49	1,18
1700	2,37	1,46	1,90	1,50	1,29
1900	2,41	1,47	1,94	1,52	1,38
2100	2,44	1,48	1,98	1,54	1,46
2300	2,46	1,50	2,02	1,55	-
2500	2,48	1,51	2,05	1,56	-

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Таблица П.7

Средние теплоёмкости горючих газов, кДж/(м³·К)

$t, ^\circ\text{C}$	CO	H ₂	H ₂ S	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂
0	1,300	1,278	1,508	1,548	2,210	3,049	4,129	5,130
100	1,303	1,289	1,534	1,642	2,495	3,510	4,705	5,836
200	1,307	1,300	1,562	1,757	2,776	3,964	5,256	6,516
300	1,314	1,300	1,595	1,883	3,046	4,370	5,774	7,135
400	1,328	1,303	1,634	2,012	3,308	4,759	6,268	7,740
500	1,343	1,307	1,670	2,138	3,557	5,094	6,689	8,255
600	1,357	1,307	1,710	2,261	3,776	5,429	7,114	8,784
700	1,372	1,310	1,746	2,380	3,985	5,724	7,484	9,230
800	1,386	1,314	1,782	2,495	4,183	5,987	7,808	9,626
900	1,397	1,325	1,818	2,603	4,363	6,232	8,114	9,990
1000	1,411	1,328	1,850	2,700	4,529	6,462	8,402	10,346

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Таблица П.8

Концентрационные границы зажигания газов (293 К; 101,3 кПа)

Горючий газ	Химическая формула	Концентр. границы зажигания в воздушной смеси, %		Концентр. границы зажигания в кислородной смеси, %	
		Нижняя	Верхняя	Нижняя	Верхняя
Водород	H ₂	4,0	74,2	4,65	93,9
Оксид углерода	CO	12,5	74,2	15,5	93,9
Метан	CH ₄	5,0	15,0	5,4	59,2
Этан	C ₂ H ₆	3,1	12,5	4,1	50,5
Пропан	C ₃ H ₈	2,4	9,5	2,4	57,0
Бутан	C ₄ H ₁₀	1,9	8,4	1,8	49,0
Пентан	C ₅ H ₁₂	1,4	7,8	-	-
Этилен	C ₂ H ₄	2,8	28,6	2,9	79,9
Ацетилен	C ₂ H ₂	2,5	80,0	3,5	89,4
Сероводород	H ₂ S	4,3	45,5	-	-

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Таблица П.9

Значение скорости нормального распространения пламени для различных газов в смеси с воздухом

Горючий газ	Химическая формула	Стехиометрическая смесь		Смесь, в которой $U_{n \max}$	
		Нижняя	Верхняя	Нижняя	Верхняя
Водород	H ₂	29,5	1,6	42,0	2,7
Оксид углерода	CO	29,5	0,3	43,0	0,4
Метан	CH ₄	9,5	0,3	10,5	0,4
Этан	C ₂ H ₆	5,6	-	6,3	0,4
Пропан	C ₃ H ₈	4,0	0,4	4,3	0,4
Бутан	C ₄ H ₁₀	3,1	-	3,5	0,4
Пентан	C ₅ H ₁₂	2,6	0,3	2,9	0,4
Этилен	C ₂ H ₄	6,5	0,5	7,0	0,6
Ацетилен	C ₂ H ₂	7,7	1,0	10,0	1,4

ПРИЛОЖЕНИЕ 10

Таблица П.10

Коэффициент кинематической вязкости газов $\nu \cdot 10^6$, м²/с

t , °С	H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₆	Воздух
0	93,0	13,3	14,3	6,3	13,2
100	157,0	22,6	25,4	11,7	23,2
300	323,0	47,0	54,2	25,7	48,2
500	534,0	78,0	89,6	45,1	79,3

ПРИЛОЖЕНИЕ 11

Таблица П.11

Плотность газов ρ , кг/м³

t , °С	H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₆	Воздух
0	0,090	1,252	0,717	1,341	1,293
100	0,066	0,915	0,525	0,982	0,946
300	0,043	0,595	0,341	0,639	0,616
500	0,032	0,441	0,253	0,474	0,456

ПРИЛОЖЕНИЕ 12

Пример заполнения основной надписи чертежа

					<i>13.03.01 18-дПТ-25 2020 КП</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>	<i>Чертеж горелки</i>	<i>Лит.</i>	<i>Масса</i>	<i>Масштаб</i>
<i>Разраб.</i>	<i>Иванов</i>					<i>у</i>	<i>8,8</i>	<i>1:2</i>
<i>Проб.</i>	<i>Надеев</i>					<i>Лист Листов 1</i>		
<i>Т.контр.</i>						<i>ВГТУ ФЭСУ</i> <i>ПТ дТТ-182</i>		
<i>Н.контр.</i>					<i>Расчёт горения топлива</i>			
<i>Утв.</i>	<i>Надеев</i>							

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хзмяян, Д. М. Теория горения и топочные устройства: учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / Д. М. Хзмяян, А. Я. Каган; под ред. Д. М. Хзмяяна. – М.: Энергия, 1976. – 488 с.
2. Тепловые и атомные электрические станции: Справочник / Под общ. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.
3. Сборник задач по теории горения: учебное пособие для вузов / Под ред. В. В. Померанцева. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. – 152 с.
4. Смирнов, А. Д. Справочная книжка энергетика / А. Д. Смирнов, К. М. Антипов. – 4-е изд. – М. Энергоатомиздат. – 1984. – 440 с.
5. Коробейничев, О. П. Физика и химия горения: учебное пособие / О. П. Коробейничев. – Новосибирск: Новосибирский гос. ун-т, 2011. - 249 с.
6. Metallurgical furnaces: Atlas. Учеб. пособие для вузов / В. И. Миткалинный, В. А. Кривандин, В. А. Морозов и др. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Metallurgy, 1987. – 384 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Состав и теплотехнические характеристики топлива	3
1.1. Краткие теоретические сведения.....	3
1.2. Практические задания.....	8
1.3 Задание № 1 на курсовой проект	10
2. Материальный баланс процесса горения.....	12
2.1. Краткие теоретические сведения.....	12
2.2. Практические задания.....	17
2.3. Задание № 2 на курсовой проект	18
3. Тепловой баланс процесса горения	20
3.1. Краткие теоретические сведения.....	20
3.2. Практические задания.....	26
3.3. Задание № 3 на курсовой проект	27
4. Воспламенение и распространение пламени в горючих смесях	29
4.1. Краткие теоретические сведения.....	29
4.2. Практические задания.....	32
4.3. Задание № 4 на курсовой проект	33
5. Особенности горения газообразного, жидкого и твёрдого топлива	34
5.1. Краткие теоретические сведения.....	34
5.2. Практические задания.....	38
5.3. Задание № 5 на курсовой проект	39
6. Топливосжигающие устройства	39
ответы на практические задания.....	58
Заключение.....	59
Приложение 1	60
Приложение 2	67
Приложение 3	68
Приложение 4	69
Приложение 5	71
Приложение 6	73
Приложение 7	73
Приложение 8	74
Приложение 9	74
Приложение 10	75
Приложение 11	75
Приложение 12	75
Библиографический список.....	76

Учебное издание

Бараков Александр Валентинович

Надеев Александр Александрович

ТОПЛИВО И ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ

Практикум

Редактор

Подписано в печать **25.01.2021.**

Формат 60×84 1/16. Бумага для множительных аппаратов.

Уч.-изд. л. **1,6.** Усл. печ. л. **1,6.** Тираж **60** экз. Зак. №

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026 Воронеж, Московский проспект, 14

Участок оперативной полиграфии издательства ВГТУ
394026 Воронеж, Московский проспект, 14