

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

---

**ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ**

# **Топливо и процессы горения в теплоэнергетических установках**

## **Расчёт процессов горения в теплоэнергетических установках**

**Методические указания  
для самостоятельной работы студентов  
заочной формы обучения  
по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»**

**Санкт-Петербург  
2020**

УДК 621.1.01

Топливо и процессы горения в теплоэнергетических установках. Расчёт процессов горения в теплоэнергетических установках: методические указания для самостоятельной работы студентов заочной формы обучения / сост. В.Н. Белоусов, С.Н. Смородин, В.Д. Цимбал; ВШТЭ СПбГУПТД.- СПб., 2020. – 43 с.

В настоящих методических указаниях представлены основы расчётов процесса сжигания органического топлива, порядок выполнения курсовой работы и подготовки к контролю усвоения дисциплины, содержатся расчетные задания по следующим разделам: состав и теплотехнические характеристики топлива, материальный баланс процесса горения, тепловой баланс процесса горения.

Указания составлены в соответствии с требованиями государственных образовательных стандартов, охватывают минимально необходимый материал по дисциплине «Топливо и процессы горения в теплоэнергетических установках» для студентов заочной формы обучения по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Рецензент: кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры теплосиловых установок и термодинамики ВШТЭ  
Н.Н. Гладышев

© Высшая школа технологии и энергетики  
СПбГУПТД, 2020

© Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Цимбал В.Д.,  
2020

## ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

При изучении курса «Топливо и процессы горения в теплоэнергетических установках» необходимо ознакомиться с содержанием тем, представленных в пособии, а затем изучить материал по рекомендованной литературе. При изучении материала следует обращать внимание на физический смысл рассматриваемого явления и формулы, описывающие его.

При выполнении курсовой работы необходимо соблюдать следующие правила:

1. Переписать полностью текст каждого задания.
2. Указать словами, какая величина вычисляется, привести соответствующую формулу.
3. Для каждой найденной величины следует указать размерность.
4. В тексте решения каждого задания необходимо придерживаться терминов и обозначений, принятых в учебной литературе.
5. Выбор варианта задания производится по порядковому номеру студента в списке или по заданию преподавателя.

Курсовая работа для студентов заочного отделения состоит из трёх частей и базируется на следующей тематике:

Часть 1. Состав и теплотехнические характеристики твёрдого топлива, классификация твёрдого топлива, условное топливо, материальный баланс процесса горения твёрдого топлива.

Часть 2. Материальный баланс процесса горения газа, расчёт газовой горелки.

Часть 3. Тепловой баланс процесса горения, определение температуры горения.

## Часть 1

# Определение расчётных характеристик твёрдого топлива и расчёт материального баланса процесса горения

Вид и состав топлива выбираются в соответствии с вариантом из табл. 1.

*Задание 1.* Исходя из заданного состава твёрдого топлива, сделать мотивированное заключение, к какому виду углей (*бурый* или *каменный*) относится данное топливо?

### Рекомендации:

- по формуле Менделеева рассчитать *низшую* теплоту сгорания *рабочей* массы топлива [1];
- пересчитать *низшую* теплоту сгорания *рабочей* массы на *высшую* [1];
- пересчитать *высшую* теплоту сгорания *рабочей* массы топлива на *беззольную* массу [1];
- по полученной высшей теплоте сгорания беззольной массы сделать вывод о принадлежности данного топлива к *бурым* или *каменным* углям [1].

*Задание 2.* Определить содержание углерода в *горючей* массе топлива и зольность *сухой* массы топлива [1].

*Задание 3.* В чём заключается принципиальное различие между *высшей* и *низшей* теплотой сгорания? Какова математическая связь между ними? [1].

*Задание 4.* Что такое *условное топливо*? Определить расход *условного* и *заданного* топлива ( $B_T$ , кг/с), если проектная мощность теплотехнической установки составляет  $N = 10n$ , МВт, где  $n$  – номер варианта (потери не учитывать) [1].

*Задание 5.* Определить теоретический объём воздуха, необходимого для полного сгорания заданного топлива, и теоретический объём образовавшихся продуктов сгорания [2].

Задание 6. Определить действительные объёмы воздуха и продуктов сгорания при выбранном согласно рекомендациям значении коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  [2].

Таблица 1

Состав рабочей массы твёрдого топлива, %

№	W <sup>r</sup>	A <sup>r</sup>	S <sup>r</sup>	C <sup>r</sup>	H <sup>r</sup>	N <sup>r</sup>	O <sup>r</sup>
1	10.5	17.9	1.7	55.8	3.7	0.6	9.8
2	14.5	21.4	1.2	48.4	3.3	0.8	10.4
3	22.0	13.3	0.5	50.1	2.6	0.5	11.0
4	28.0	14.4	0.9	44.4	2.4	0.5	9.4
5	19.0	8.1	0.7	55.0	3.1	0.6	13.5
6	29.5	9.2	1.0	47.2	2.2	0.5	10.4
7	21.5	14.1	1.2	47.3	3.0	0.6	12.3
8	33.0	6.0	0.2	43.7	3.0	0.6	13.5
9	39.0	7.3	0.4	37.6	2.6	0.4	12.7
10	33.0	4.7	0.2	44.3	3.0	0.4	14.4
11	44.0	6.7	0.5	34.3	2.4	0.4	11.7
12	33.5	8.0	0.4	41.5	2.9	0.6	13.1
13	40.5	6.8	0.4	36.6	2.6	0.4	12.7
14	37.0	4.4	0.2	41.9	2.9	0.4	13.2
15	14.0	15.5	0.5	54.9	3.7	1.4	10.0
16	13.0	27.0	1.1	45.9	3.4	0.7	8.9
17	25.0	12.8	0.4	46.0	3.3	0.9	11.6
18	22.0	14.8	0.9	46.6	3.7	0.9	11.1
19	23.5	16.8	0.5	43.9	3.2	0.7	11.4
20	22.0	12.5	0.3	46.5	3.3	0.7	14.7
21	23.0	15.4	0.5	47.5	3.4	0.9	9.3
22	8.0	9.2	0.6	67.9	4.7	0.8	8.8
23	33.5	9.6	0.5	42.7	2.8	0.9	10.0
24	33.0	10.0	0.2	41.6	2.8	0.7	11.7
25	40.5	8.6	0.3	36.4	2.3	0.5	11.4
26	37.5	9.4	0.3	37.7	2.3	0.6	12.2
27	47.5	7.9	0.3	30.4	1.7	0.5	12.2
28	7.5	29.6	0.4	50.9	3.6	0.6	7.4
29	6.0	33.8	0.4	46.1	3.6	0.5	9.6
30	5.5	34.0	0.4	49.8	3.2	0.8	6.3
31	5.5	32.1	0.4	52.7	3.2	0.7	5.4
32	12.0	18.9	0.4	59.1	3.4	1.7	4.5
33	8.0	27.6	0.8	54.7	3.3	0.8	4.8
34	10.0	38.7	0.9	42.1	2.7	0.7	4.9

Продолжение табл. 1

№	W <sup>r</sup>	A <sup>r</sup>	S <sup>r</sup>	C <sup>r</sup>	H <sup>r</sup>	N <sup>r</sup>	O <sup>r</sup>
35	7.0	38.1	0.8	43.4	2.9	0.8	7.0
36	29.0	11.4	1.7	45.0	2.6	0.4	9.9
37	32.0	25.2	2.7	28.7	2.2	0.6	8.6
38	11.0	25.4	2.8	47.7	3.2	1.3	8.8
39	11.5	15.9	0.4	56.4	4.0	1.9	9.9
40	32.1	30.6	2.5	24.3	1.9	0.4	8.2
41	8.0	29.4	1.0	52.5	3.3	1.5	4.2
42	18.0	24.6	0.5	41.6	3.0	0.6	11.7
43	10.5	17.9	1.7	55.8	3.7	0.6	9.8
44	14.5	21.4	1.2	48.4	3.3	0.8	10.4
45	22.0	13.3	0.5	50.1	2.6	0.5	11.0
46	28.0	14.4	0.9	44.4	2.4	0.5	9.4
47	19.0	8.1	0.7	55.0	3.1	0.6	13.5
48	29.5	9.2	1.0	47.2	2.2	0.5	10.4
49	21.5	14.1	1.2	47.3	3.0	0.6	12.3
50	33.0	6.0	0.2	43.7	3.0	0.6	13.5
51	39.0	7.3	0.4	37.6	2.6	0.4	12.7
52	33.0	4.7	0.2	44.3	3.0	0.4	14.4
53	44.0	6.7	0.5	34.3	2.4	0.4	11.7
54	33.5	8.0	0.4	41.5	2.9	0.6	13.1
55	40.5	6.8	0.4	36.6	2.6	0.4	12.7
56	37.0	4.4	0.2	41.9	2.9	0.4	13.2
57	14.0	15.5	0.5	54.9	3.7	1.4	10.0
58	13.0	27.0	1.1	45.9	3.4	0.7	8.9
59	25.0	12.8	0.4	46.0	3.3	0.9	11.6
60	22.0	14.8	0.9	46.6	3.7	0.9	11.1
61	23.5	16.8	0.5	43.9	3.2	0.7	11.4
62	22.0	12.5	0.3	46.5	3.3	0.7	14.7
63	23.0	15.4	0.5	47.5	3.4	0.9	9.3
64	8.0	9.2	0.6	67.9	4.7	0.8	8.8
65	33.5	9.6	0.5	42.7	2.8	0.9	10.0
66	33.0	10.0	0.2	41.6	2.8	0.7	11.7
67	40.5	8.6	0.3	36.4	2.3	0.5	11.4
68	37.5	9.4	0.3	37.7	2.3	0.6	12.2
69	47.5	7.9	0.3	30.4	1.7	0.5	12.2
70	7.5	29.6	0.4	50.9	3.6	0.6	7.4
71	6.0	33.8	0.4	46.1	3.6	0.5	9.6
72	5.5	34.0	0.4	49.8	3.2	0.8	6.3
73	5.5	32.1	0.4	52.7	3.2	0.7	5.4
74	12.0	18.9	0.4	59.1	3.4	1.7	4.5

Окончание табл. 1

№	W <sup>r</sup>	A <sup>r</sup>	S <sup>r</sup>	C <sup>r</sup>	H <sup>r</sup>	N <sup>r</sup>	O <sup>r</sup>
75	8.0	27.6	0.8	54.7	3.3	0.8	4.8
76	10.0	38.7	0.9	42.1	2.7	0.7	4.9
77	7.0	38.1	0.8	43.4	2.9	0.8	7.0
78	29.0	11.4	1.7	45.0	2.6	0.4	9.9
79	32.0	25.2	2.7	28.7	2.2	0.6	8.6
80	11.0	25.4	2.8	47.7	3.2	1.3	8.8
81	11.5	15.9	0.4	56.4	4.0	1.9	9.9
82	32.1	30.6	2.5	24.3	1.9	0.4	8.2
83	8.0	29.4	1.0	52.5	3.3	1.5	4.2
84	18.0	24.6	0.5	41.6	3.0	0.6	11.7
85	10.5	17.9	1.7	55.8	3.7	0.6	9.8
86	14.5	21.4	1.2	48.4	3.3	0.8	10.4
87	22.0	13.3	0.5	50.1	2.6	0.5	11.0
88	28.0	14.4	0.9	44.4	2.4	0.5	9.4
89	19.0	8.1	0.7	55.0	3.1	0.6	13.5
90	29.5	9.2	1.0	47.2	2.2	0.5	10.4
91	21.5	14.1	1.2	47.3	3.0	0.6	12.3
92	33.0	6.0	0.2	43.7	3.0	0.6	13.5
93	44.0	6.7	0.5	34.3	2.4	0.4	11.7
94	33.5	8.0	0.4	41.5	2.9	0.6	13.1
95	40.5	6.8	0.4	36.6	2.6	0.4	12.7
96	37.0	4.4	0.2	41.9	2.9	0.4	13.2
97	14.0	15.5	0.5	54.9	3.7	1.4	10.0
98	13.0	27.0	1.1	45.9	3.4	0.7	8.9
99	25.0	12.8	0.4	46.0	3.3	0.9	11.6
100	22.0	14.8	0.9	46.6	3.7	0.9	11.1

## Часть 2

### Расчёт газовой горелки

Точный расчёт газовых горелок представляет собой задачу неоправданной сложности, поэтому практикой разработаны различные методы приближённого расчёта, которые дают вполне приемлемые результаты [2, 3].

Большое распространение в энергетических установках получили газовые горелки, в которых воздушный поток поперечно пересекается мелкими струями газа, при этом газ может подаваться по центральной трубе (горелка типа “труба в трубе”) (рис. 1а) или с периферии (рис. 1б).

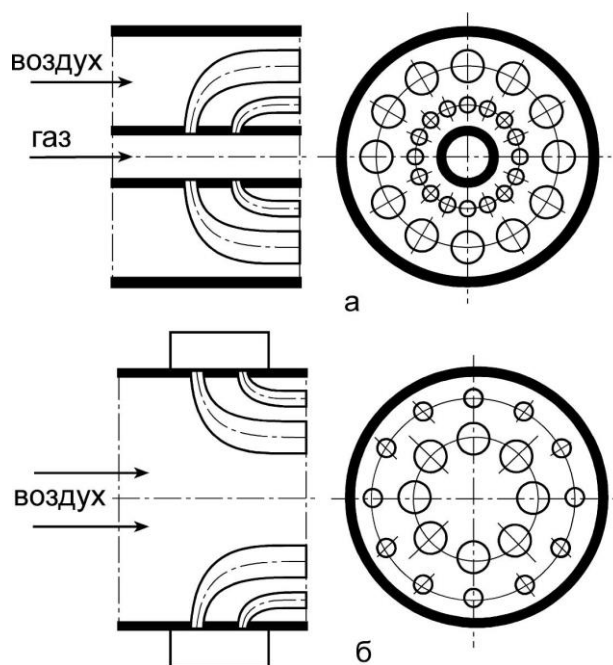


Рис. 1. Схемы подачи газа в поперечный поток воздуха:

а – по центру, б – с периферии

Струи газа по мере проникновения в поток воздуха будут сноситься этим потоком. При достижении определённого расстояния от стенки газового коллектора  $h$  осевая линия струи газа будет совпадать с направлением сносящего потока воздуха. Это расстояние называется



глубиной проникновения струи в сносящий поток и зависит от диаметра сопла  $d_c$  вытекающей струи и отношения скоростей ( $W_z$ ,  $W_в$ ) и плотностей ( $\rho_z$ ,  $\rho_в$ ) газа и воздуха. Для более равномерного распределения газовых струй по сечению горелки и для лучшего смешения газа с воздухом газовые сопла выполняются **в два ряда**, причём первый (по ходу воздуха) ряд сопел имеет **бóльший диаметр**, чем второй.

Базовой формулой при расчёте таких горелок является полученная на основании многочисленных экспериментов Ю.В. Ивановым зависимость для определения **относительной глубины проникновения газовых струй** в поперечный поток воздуха:

$$\frac{h}{d_c} = K_s \frac{W_z}{W_в} \sqrt{\frac{\rho_z}{\rho_в}}, \quad (1)$$

где  $K_s$  – эмпирический коэффициент, зависящий от относительного шага между соплами, расположенными в одном ряду.

На рис. 2 представлен примерный характер геометрии струй газа, истекающих в поперечный поток воздуха.

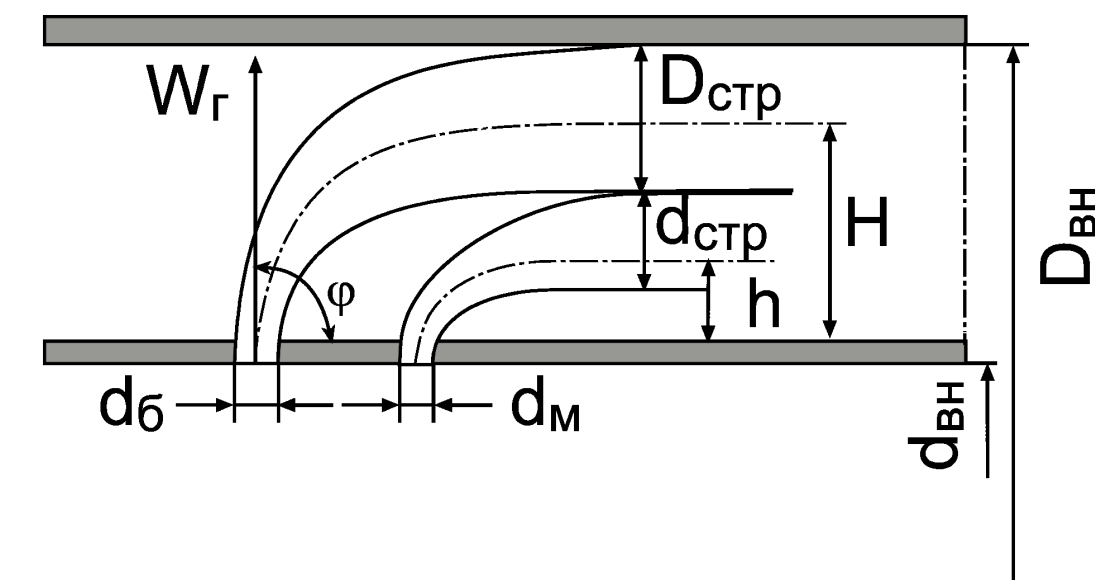


Рис. 2. Схема распространения струй газа в поперечном потоке воздуха

Под действием воздушного потока траектория струи искривляется и сама струя становится шире за счёт диффузионного размытия. В том

сечении, где ось струи газа принимает направление потока воздуха, её условный диаметр, согласно опытным данным, составляет:

$$d_{cmp} = 0,75h. \quad (2)$$

Отверстия (сопла) для выхода газа должны быть расположены таким образом, чтобы струи в том сечении, где они принимают направление потока, перекрывали всё сечение.

При расчёте газовых горелок для определения глубины проникновения струи по формуле (1) приходится предварительно задаваться значениями скоростей газа и воздуха, а также исходить из полученных опытным путём рекомендаций.

### Методика расчёта газовой горелки

Принципиальная схема горелки типа “труба в трубе” представлена на рис. 3.

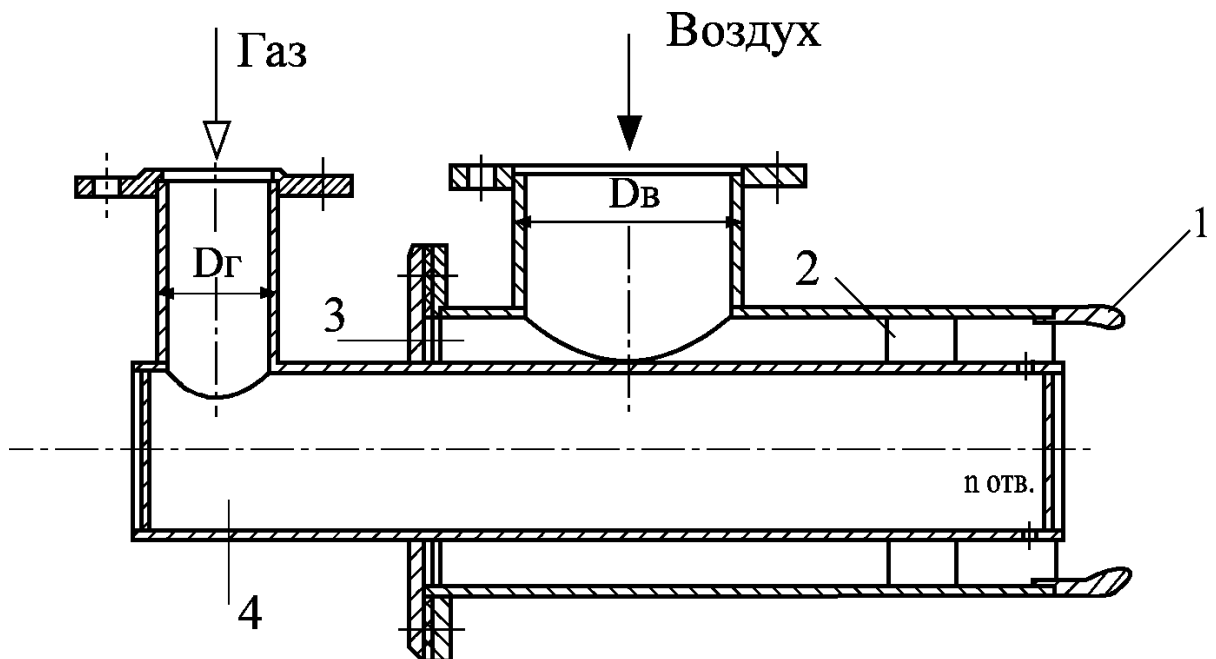


Рис. 3. Коаксиальная горелка типа “труба в трубе”:

- 1 – огневой насадок с пережимом, 2 – лопатки, 3 – воздушная камера,
- 4 – газовый коллектор

## Исходные данные для расчета

Исходные данные выбираются в соответствии с вариантом из табл. 2:

Коэффициент избытка воздуха,  $\alpha$ .

Скорость воздуха,  $W_B$ , м/с.

Скорость газа на выходе из сопел,  $W_G$ , м/с.

Температура горячего воздуха,  $t_B$ , °С.

Температура газа,  $t_G$ , °С.

Объемный расход газа на горелку (при н.у.),  $G^0_G$ , м<sup>3</sup>/ч.

Скорость газа в трубе (в газовом коллекторе),  $W_{г.тр}$ , м/с.

Состав газа по объему, % :  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_3H_8$ ,  $C_4H_{10}$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ .

Плотность газа (при 0 °С),  $\rho^0_G$ , кг/м<sup>3</sup>.

Теплота сгорания газа,  $Q_i^d$ , МДж/м<sup>3</sup>.

## Порядок расчёта

1. Согласно материальному балансу процесса горения газа, определяются [2]:

1.1. Объём воздуха, теоретически необходимого для сжигания газа,  $V^0$ , м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

1.2. Теоретический объём продуктов сгорания:

1.2.1. Объём трёхатомных газов,  $V_{RO_2}$ , м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

1.2.2. Объём азота,  $V_{N_2}^0$ , м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

1.2.3. Объём водяных паров,  $V_{H_2O}^0$ , м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

1.2.4. Суммарный теоретический объём продуктов сгорания,  $V^0_G$ , м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

1.3. Действительный объём воздуха,  $V$ , м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

1.4. Действительный объём продуктов сгорания:

1.4.1. Объём трёхатомных газов,  $V_{RO_2}$ , м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

1.4.2. Объём двухатомных газов,  $V_{R_2}$ , м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

1.4.3. Объём водяных паров,  $V_{H_2O}$ , м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

1.4.4. Суммарный действительный объём продуктов сгорания,  $V_r$ , м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

2. Действительный объёмный расход воздуха (при заданной температуре воздуха),  $G_v$ , м<sup>3</sup>/с

$$G_v = V \cdot G_2^o \cdot \frac{t_g + 273}{273}.$$

3. Действительный объёмный расход газа (при заданной температуре газа),  $G_r$ , м<sup>3</sup>/с

$$G_r = G_2^o \cdot \frac{t_g + 273}{273}.$$

4. Из уравнения расхода газа определяется внутренний диаметр газоподводящей трубы (газового коллектора) (см. рис. 2)  $d_{вн}$ :

$$G_r = \frac{\pi d_{вн}^2}{4} \cdot W_{г.мп},$$

где  $W_{г.мп}$  – скорость газа в коллекторе.

5. Наружный диаметр газового коллектора

$$d_n = d_{вн} + 2\delta_{ст},$$

где толщина стенки газового коллектора  $\delta_{ст} = 4$  мм.

6. Из уравнения расхода воздуха

$$G_v = \frac{\pi}{4} (D_{вн}^2 - d_n^2) \cdot W_v$$

определяется внутренний диаметр наружной воздухоподводящей трубы  $D_{вн}$ .

7. Определение **глубины проникновения больших и малых струй газа** в воздушный поток.

При расчёте глубины проникновения струй газа, истекающих из больших и малых сопел, исходят из предположения, что в том сечении, где большие и малые струи принимают направление потока воздуха, они соприкасаются друг с другом, а внешняя граница больших струй достигает внешней границы кольцевого канала. При этом диаметры струй, согласно формуле (2):

$$D_{стр} = 0,75H \quad \text{и} \quad d_{стр} = 0,75h .$$

Из схемы распространения струй в кольцевом канале (см. рис.2) следует, что глубина проникновения

*больших струй*

$$H + \frac{D_{стр}}{2} = \frac{D_{вн} - d_n}{2} \rightarrow H + 0,375H = \frac{D_{вн} - d_n}{2} \rightarrow$$

$$H = \frac{D_{вн} - d_n}{2,75} ,$$

а *малых*  $h + \frac{d_{стр}}{2} = H - \frac{D_{стр}}{2} \rightarrow h + 0,375h = H - 0,375H \rightarrow$

$$h = \frac{0,625}{1,375} H .$$

8. По формуле (1) определяются диаметры *больших*  $d_b$  и *малых сопел*  $d_m$  (при этом принимается  $K_s=1,6$ ).

9. Принимая, что, согласно рекомендациям, при центральной подаче газа 80 % его объёма подаётся через большие сопла, а 20 % – через малые, определяются геометрические характеристики горелки:

суммарная площадь больших и малых сопел

$$\sum f_{\bar{o}} = 0,8 \frac{G_2}{W_2} , \quad \sum f_m = 0,2 \frac{G_2}{W_2} ;$$

количество больших и малых сопел

$$n_{\bar{o}} = \frac{4 \sum f_{\bar{o}}}{\pi d_{\bar{o}}^2} , \quad n_m = \frac{4 \sum f_m}{\pi d_m^2} ;$$

шаг установки больших и малых сопел

$$S_{\bar{b}} = \frac{\pi d_n}{n_{\bar{b}}} \quad , \quad S_m = \frac{\pi d_n}{n_m} \quad .$$

*Количество больших и малых сопел принимается **кратным 4**.*

Данные для расчета газовой горелки типа "труба в трубе"

Вар.	$\alpha$	$W_B, \text{ м/с}$	$W_T, \text{ м/с}$	$t_B, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_T, \text{ }^\circ\text{C}$	$G_{TO}, \text{ м}^3/\text{ч}$	$W_{T.TP}, \text{ м/с}$	Состав газа по объему						$\rho_T^0, \text{ кг/м}^3$	$Q_i^d, \text{ МДж/м}^3$
								$\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_3\text{H}_8$	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	$\text{N}_2$	$\text{CO}_2$		
1	1,05	25	100	300	10	1000	20	84,5	3,8	1,9	1,2	7,8	0,8	0,837	35,82
2	1,06	25	120	300	10	1100	20	90,4	3,6	2,6	1,1	2,2	0,1	0,952	36,40
3	1,07	25	130	300	10	1200	20	91,9	2,1	1,3	0,5	3	1,2	0,786	36,16
4	1,05	25	140	300	10	1300	20	93,8	2,0	0,8	0,4	2,6	0,4	0,764	36,12
5	1,05	25	150	300	10	1400	20	92,8	2,8	0,9	0,5	2,5	0,5	0,772	36,58
6	1,06	20	110	200	10	1500	15	91,2	3,9	1,2	0,6	2,6	0,5	0,786	37,04
7	1,07	20	100	200	10	1000	15	89,7	5,2	1,7	0,6	2,7	0,1	0,799	37,46
8	1,05	25	110	200	10	1100	20	85,8	0,2	0,1	0,1	13,7	0,1	0,789	31,00
9	1,06	20	120	250	10	1200	15	98,9	0,3	0,1	0,1	0,4	0,2	0,712	35,91
10	1,07	20	130	200	10	1300	15	95,6	0,7	0,4	0,4	2,8	0,1	0,74	35,53
11	1,05	25	140	200	10	1400	20	98,5	0,2	0,1	0,0	1,0	0,2	0,722	35,53
12	1,05	25	150	300	10	1500	20	92,8	3,9	1,1	0,5	1,6	0,1	0,776	37,33
13	1,06	25	140	300	10	1000	20	92,8	3,9	1,0	0,7	1,5	0,1	0,781	37,33
14	1,07	25	130	300	10	1100	20	94,1	3,1	0,6	1,0	1,2	0,0	0,776	37,89
15	1,05	25	120	300	10	1200	20	81,7	5,3	2,9	1,2	8,8	0,1	0,858	36,83
16	1,06	20	110	250	10	1300	15	97,1	0,3	0,1	0,0	2,4	0,1	0,733	35,07
17	1,07	25	100	250	10	1400	20	95,4	2,6	0,3	0,4	1,1	0,2	0,750	36,62
18	1,05	20	100	250	10	1500	15	85,9	6,1	1,5	1,4	5,0	0,1	0,832	38,38
19	1,05	20	100	300	10	1000	15	95,5	2,7	0,4	0,3	1,0	0,1	0,748	36,70
20	1,05	20	110	250	10	1100	15	94,0	2,8	0,4	0,4	2,0	0,4	0,751	36,29
21	1,06	25	120	300	10	1200	20	98,2	0,4	0,1	0,1	1,0	0,2	0,728	35,66
22	1,07	25	100	250	10	1000	20	68,5	14,5	7,6	4,5	3,5	1,4	1,036	45,88
23	1,05	25	140	300	10	1400	20	96,1	0,7	0,1	0,1	2,8	0,2	0,741	35,15
24	1,05	25	130	300	10	1500	20	93,2	1,9	0,8	0,4	3,0	0,7	0,766	35,87
25	1,05	25	100	300	10	1000	20	81,5	8,0	4,0	2,8	3,2	0,5	0,901	41,48
26	1,05	25	110	300	10	1100	20	93,9	3,1	1,1	0,4	1,3	0,2	0,766	37,12
27	1,06	25	120	300	10	1200	20	94,9	3,2	0,4	0,2	0,9	0,4	0,758	36,75
28	1,07	20	110	270	10	1300	15	91,9	2,4	1,1	0,9	3,2	0,5	0,789	36,5
29	1,05	20	100	270	10	1400	15	93,2	2,6	1,2	0,7	2,0	0,3	0,782	37,04
30	1,05	20	110	270	10	1200	15	93,8	3,6	0,7	0,6	0,7	0,6	0,776	37,58

Продолжение табл. 2

Вар.	$\alpha$	$W_B, \text{ м/с}$	$W_T, \text{ м/с}$	$t_B, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_T, \text{ }^\circ\text{C}$	$G_{TO}, \text{ м}^3/\text{ч}$	$W_{T,TP}, \text{ м/с}$	Состав газа по объему						$\rho_T^0, \text{ кг/м}^3$	$Q_i^d, \text{ МДж/м}^3$
								$\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_3\text{H}_8$	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	$\text{N}_2$	$\text{CO}_2$		
31	1,07	21	100	200	10	1300	20	92,8	2,8	0,9	0,5	2,5	0,5	0,772	36,58
32	1,06	22	105	210	10	1400	20	91,2	3,9	1,2	0,6	2,6	0,5	0,786	37,04
33	1,05	23	110	220	10	1500	15	89,7	5,2	1,7	0,6	2,7	0,1	0,799	37,46
34	1,04	24	115	230	10	1600	15	85,8	0,2	0,1	0,1	13,7	0,1	0,789	31,00
35	1,03	25	120	240	10	1700	20	98,9	0,3	0,1	0,1	0,4	0,2	0,712	35,91
36	1,04	26	125	250	10	1800	20	95,6	0,7	0,4	0,4	2,8	0,1	0,740	35,53
37	1,05	27	130	260	10	1900	15	98,5	0,2	0,1	0	1,0	0,2	0,722	35,53
38	1,06	28	135	270	10	2000	15	92,8	3,9	1,1	0,5	1,6	0,1	0,776	37,33
39	1,07	29	140	280	10	2100	20	93,6	3,1	1,0	0,7	1,5	0,1	0,781	37,33
40	1,06	30	145	290	10	2200	20	91,7	5,3	0,6	1,0	1,2	0,2	0,776	37,89
41	1,05	28	100	300	10	2300	15	87,1	0,7	2,9	1,2	8,0	0,1	0,858	36,83
42	1,05	26	110	310	10	2400	15	95,4	2,0	0,1	0	2,4	0,1	0,733	35,07
43	1,05	25	100	300	10	1000	20	84,5	3,8	1,9	1,2	7,8	0,8	0,837	35,82
44	1,06	25	120	300	10	1100	20	90,4	3,6	2,6	1,1	2,2	0,1	0,952	36,40
45	1,07	25	130	300	10	1200	20	91,9	2,1	1,3	0,5	3	1,2	0,786	36,16
46	1,05	25	140	300	10	1300	20	93,8	2,0	0,8	0,4	2,6	0,4	0,764	36,12
47	1,05	25	150	300	10	1400	20	92,8	2,8	0,9	0,5	2,5	0,5	0,772	36,58
48	1,06	20	110	200	10	1500	15	91,2	3,9	1,2	0,6	2,6	0,5	0,786	37,04
49	1,07	20	100	200	10	1000	15	89,7	5,2	1,7	0,6	2,7	0,1	0,799	37,46
50	1,05	25	110	200	10	1100	20	85,8	0,2	0,1	0,1	13,7	0,1	0,789	31,00
51	1,06	20	120	250	10	1200	15	98,9	0,3	0,1	0,1	0,4	0,2	0,712	35,91
52	1,07	20	130	200	10	1300	15	95,6	0,7	0,4	0,4	2,8	0,1	0,74	35,53
53	1,05	25	140	200	10	1400	20	98,5	0,2	0,1	0,0	1,0	0,2	0,722	35,53
54	1,05	25	150	300	10	1500	20	92,8	3,9	1,1	0,5	1,6	0,1	0,776	37,33
55	1,06	25	140	300	10	1000	20	92,8	3,9	1,0	0,7	1,5	0,1	0,781	37,33
56	1,07	25	130	300	10	1100	20	94,1	3,1	0,6	1,0	1,2	0,0	0,776	37,89
57	1,05	25	120	300	10	1200	20	81,7	5,3	2,9	1,2	8,8	0,1	0,858	36,83
58	1,06	20	110	250	10	1300	15	97,1	0,3	0,1	0,0	2,4	0,1	0,733	35,07
59	1,07	25	100	250	10	1400	20	95,4	2,6	0,3	0,4	1,1	0,2	0,750	36,62
60	1,05	20	100	250	10	1500	15	85,9	6,1	1,5	1,4	5,0	0,1	0,832	38,38



Продолжение табл. 2

Вар.	$\alpha$	$W_B$ , м/с	$W_T$ , м/с	$t_B$ , °C	$t_T$ , °C	$G_{TO}$ , м³/ч	$W_{T,TP}$ , м/с	Состав газа по объему						$\rho_T^0$ , кг/м³	$Q_i^d$ , МДж/м³
								CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>		
61	1,05	20	100	300	10	1000	15	95,5	2,7	0,4	0,3	1,0	0,1	0,748	36,70
62	1,05	20	110	250	10	1100	15	94,0	2,8	0,4	0,4	2,0	0,4	0,751	36,29
63	1,06	25	120	300	10	1200	20	98,2	0,4	0,1	0,1	1,0	0,2	0,728	35,66
64	1,07	25	100	250	10	1000	20	68,5	14,5	7,6	4,5	3,5	1,4	1,036	45,88
65	1,05	25	140	300	10	1400	20	96,1	0,7	0,1	0,1	2,8	0,2	0,741	35,15
66	1,05	25	130	300	10	1500	20	93,2	1,9	0,8	0,4	3,0	0,7	0,766	35,87
67	1,05	25	100	300	10	1000	20	81,5	8,0	4,0	2,8	3,2	0,5	0,901	41,48
68	1,05	25	110	300	10	1100	20	93,9	3,1	1,1	0,4	1,3	0,2	0,766	37,12
69	1,06	25	120	300	10	1200	20	94,9	3,2	0,4	0,2	0,9	0,4	0,758	36,75
70	1,07	20	110	270	10	1300	15	91,9	2,4	1,1	0,9	3,2	0,5	0,789	36,5
71	1,05	20	100	270	10	1400	15	93,2	2,6	1,2	0,7	2,0	0,3	0,782	37,04
72	1,05	20	110	270	10	1200	15	93,8	3,6	0,7	0,6	0,7	0,6	0,776	37,58
73	1,07	21	100	200	10	1300	20	92,8	2,8	0,9	0,5	2,5	0,5	0,772	36,58
74	1,06	22	105	210	10	1400	20	91,2	3,9	1,2	0,6	2,6	0,5	0,786	37,04
75	1,05	23	110	220	10	1500	15	89,7	5,2	1,7	0,6	2,7	0,1	0,799	37,46
76	1,04	24	115	230	10	1600	15	85,8	0,2	0,1	0,1	13,7	0,1	0,789	31,00
77	1,03	25	120	240	10	1700	20	98,9	0,3	0,1	0,1	0,4	0,2	0,712	35,91
78	1,04	26	125	250	10	1800	20	95,6	0,7	0,4	0,4	2,8	0,1	0,740	35,53
79	1,05	27	130	260	10	1900	15	98,5	0,2	0,1	0	1,0	0,2	0,722	35,53
80	1,06	28	135	270	10	2000	15	92,8	3,9	1,1	0,5	1,6	0,1	0,776	37,33
81	1,07	29	140	280	10	2100	20	93,6	3,1	1,0	0,7	1,5	0,1	0,781	37,33
82	1,06	30	145	290	10	2200	20	91,7	5,3	0,6	1,0	1,2	0,2	0,776	37,89
83	1,05	28	100	300	10	2300	15	87,1	0,7	2,9	1,2	8,0	0,1	0,858	36,83
84	1,05	26	110	310	10	2400	15	95,4	2,0	0,1	0	2,4	0,1	0,733	35,07
85	1,05	25	100	300	10	1000	20	84,5	3,8	1,9	1,2	7,8	0,8	0,837	35,82
86	1,06	25	120	300	10	1100	20	90,4	3,6	2,6	1,1	2,2	0,1	0,952	36,40
87	1,07	25	130	300	10	1200	20	91,9	2,1	1,3	0,5	3	1,2	0,786	36,16
88	1,05	25	140	300	10	1300	20	93,8	2,0	0,8	0,4	2,6	0,4	0,764	36,12
89	1,05	25	150	300	10	1400	20	92,8	2,8	0,9	0,5	2,5	0,5	0,772	36,58
90	1,06	20	110	200	10	1500	15	91,2	3,9	1,2	0,6	2,6	0,5	0,786	37,04

Окончание табл. 2

Вар.	$\alpha$	$W_B, \text{ м/с}$	$W_T, \text{ м/с}$	$t_B, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_T, \text{ }^\circ\text{C}$	$G_{\text{го}}, \text{ м}^3/\text{ч}$	$W_{\text{г.тр}}, \text{ м/с}$	Состав газа по объему						$\rho_{\text{г}}^0, \text{ кг/м}^3$	$Q_i^d, \text{ МДж/м}^3$
								$\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_3\text{H}_8$	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	$\text{N}_2$	$\text{CO}_2$		
91	1,07	20	100	200	10	1000	15	89,7	5,2	1,7	0,6	2,7	0,1	0,799	37,46
92	1,05	25	110	200	10	1100	20	85,8	0,2	0,1	0,1	13,7	0,1	0,789	31,00
93	1,06	20	120	250	10	1200	15	98,9	0,3	0,1	0,1	0,4	0,2	0,712	35,91
94	1,07	20	130	200	10	1300	15	95,6	0,7	0,4	0,4	2,8	0,1	0,74	35,53
95	1,05	25	140	200	10	1400	20	98,5	0,2	0,1	0,0	1,0	0,2	0,722	35,53
96	1,05	25	150	300	10	1500	20	92,8	3,9	1,1	0,5	1,6	0,1	0,776	37,33
97	1,06	25	140	300	10	1000	20	92,8	3,9	1,0	0,7	1,5	0,1	0,781	37,33
98	1,07	25	130	300	10	1100	20	94,1	3,1	0,6	1,0	1,2	0,0	0,776	37,89
99	1,05	25	120	300	10	1200	20	81,7	5,3	2,9	1,2	8,8	0,1	0,858	36,83
100	1,06	20	110	250	10	1300	15	97,1	0,3	0,1	0,0	2,4	0,1	0,733	35,07

## Часть 3

### Расчёт камеры сгорания

#### Цель работы

- Расчёт процесса горения различных видов топлива.
- Составление материального и теплового баланса процесса горения.
- Определение теоретических и действительных объёмов воздуха, необходимого для сгорания топлива, и продуктов сгорания.
- Расчёт температуры в камере сгорания.
- Расчёт камеры смешения.

#### Описание расчётной схемы

Установка предназначена для получения горячего сушильного агента, представляющего собой смесь продуктов сгорания и воздуха, для группы сушильных установок.

Схема процесса горения топлива и последующего разбавления продуктов сгорания воздухом с целью получения энергоносителя в виде смеси горячих газов в заданном количестве  $G_{эн}$  и с заданной температурой  $\vartheta_{эн}$  представлена на рис. 4.

В камеру сгорания подаются топливо и окислитель (воздух). Образовавшиеся в процессе горения продукты сгорания поступают в камеру смешения, где разбавляются дополнительным воздухом с целью получения энергоносителя с заданной температурой. Полученный энергоноситель поступает к потребителю (для сушки топлива или других сыпучих материалов).

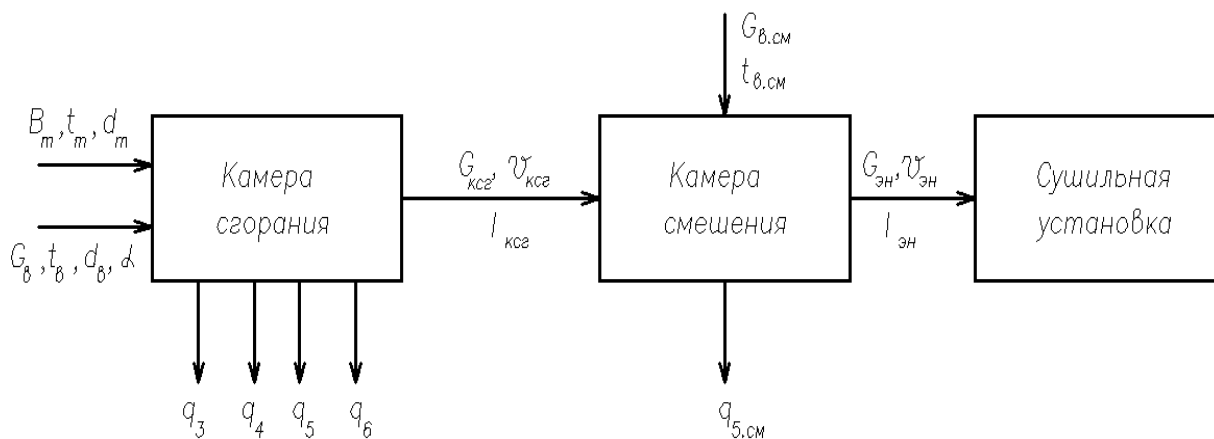


Рис. 4. Расчётная схема:

$B_m$  – расход топлива (кг/с; м<sup>3</sup>/с);  $t_m$  – температура топлива (°С);  $d_m$  – влагосодержание топлива (кг/кг; кг/м<sup>3</sup>);  $G_e$  – расход воздуха (окислителя), подаваемого в камеру сгорания (м<sup>3</sup>/с);  $t_e$  – температура воздуха, подаваемого на горение (°С);  $d_e$  – влагосодержание воздуха (кг/м<sup>3</sup>);  $q_3, q_4, q_5, q_6$  – потери теплоты в камере сгорания, соответственно, с химическим недожогом, механическим недожогом, в окружающую среду (через обмуровку) и с физическим теплом шлака (%);  $G_{кcg}$  – расход продуктов сгорания (м<sup>3</sup>/с);  $\vartheta_{кcg}$  – температура дымовых газов на выходе из камеры сгорания (°С);  $I_{кcg}$  – энтальпия продуктов сгорания (кДж/кг; кДж/м<sup>3</sup>);  $G_{в.см}$  – расход воздуха, подаваемого в камеру смешения для разбавления продуктов сгорания (м<sup>3</sup>/с);  $t_{в.см}$  – температура воздуха, подаваемого в камеру смешения (°С);  $q_{5.см}$  – потери теплоты в окружающую среду в камере смешения (%);  $G_{эн}$  – расход энергоносителя после камеры смешения (м<sup>3</sup>/с);  $\vartheta_{эн}$  – температура энергоносителя (°С);  $I_{эн}$  – энтальпия энергоносителя (кДж/кг; кДж/м<sup>3</sup>)

## Исходные данные для расчёта

Вид и состав топлива (%), расход  $G_{эн}$  (м<sup>3</sup>/с) и температура энергоносителя (сушильного агента)  $\vartheta_{эн}$  (температура газов за камерой

смешения), потери тепла в окружающую среду через обмуровку в камере сгорания  $q_5$  и в камере смешения  $q_{5,см}$  приводятся в Приложении.

$d_b = 0,01$  кг/м<sup>3</sup> – влагосодержание воздуха;

$t_b = 30$  °С – температура воздуха, подаваемого на горение в камеру сгорания и для разбавления продуктов сгорания в камере смешения;

$\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;

$q_3, q_4, q_6$  – потери теплоты в камере сгорания (%) – принимаются в соответствии с рекомендациями, приведёнными ниже.

## Определить

- Расход топлива –  $B_m$ , кг/с.
- Объёмный расход воздуха, подаваемого в камеру сгорания –  $G_6$ , м<sup>3</sup>/с.
- Объёмный расход воздуха, подаваемого в камеру смешения для обеспечения заданной температуры энергоносителя –  $G_{6,см}$ , м<sup>3</sup>/с.
- Температуру газов за камерой сгорания –  $\vartheta_{кст}$ , °С.
- Состав газов за камерой смешения, %;

## Порядок расчёта

1. Исходя из заданного вида топлива и его состава, определить теплоту сгорания топлива  $Q_i^r$  ( $Q_i^d$ ).
2. Рассчитать теоретический объём воздуха  $V_6^o$ , необходимого для полного сгорания топлива, и теоретический объём продуктов сгорания  $V_2^o$ .
3. Выбрать оптимальное (для данного вида топлива) значение коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  и рассчитать действительные объёмы воздуха  $V_6$  и продуктов сгорания  $V_2$ .

4. Составить уравнение теплового баланса камеры сгорания, выбрать или рассчитать потери тепла в камере сгорания  $q_3, q_4, q_5, q_6$  и определить температуру газов на выходе из камеры сгорания  $\vartheta_{кск}$ .
5. Составить уравнение теплового баланса всего процесса и на его основе определить объём воздуха, необходимый для разбавления продуктов сгорания  $V_{в.см}$ .
6. Составить материальный баланс процесса и на его основе определить расход топлива  $B_m$  и объёмные расходы воздуха, подаваемого в камеру сгорания  $G_в$  и камеру смешения  $G_{в.см}$ .
7. Рассчитать состав продуктов сгорания после камеры сгорания и состав энергоносителя после камеры смешения.

## Методика расчёта и рекомендации по выполнению курсовой работы

1. Теплота сгорания *твёрдого* и *жидкого* топлива  $Q_i^r$  (кДж/кг) определяется, исходя из состава топлива, с помощью эмпирической формулы Д.И. Менделеева [1].

Теплота сгорания *газообразного* топлива  $Q_i^d$  (кДж/м<sup>3</sup>) рассчитывается с учётом объёмных долей и теплоты сгорания отдельных компонентов [1].

2. Теоретические объёмы воздуха  $V_в^o$  (м<sup>3</sup>/кг) и продуктов сгорания *твёрдого* и *жидкого* топлива  $V_{RO_2}^o, V_{N_2}^o, V_{H_2O}^o, V_з^o$  (м<sup>3</sup>/кг) определяются, исходя из состава топлива, на основе материального баланса процесса горения [2].

Теоретические объёмы воздуха  $V_в^o$  (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>) и продуктов сгорания *газообразного* топлива  $V_{RO_2}^o, V_{N_2}^o, V_{H_2O}^o, V_з^o$  (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>) определяются, исходя

из состава топлива, на основе материального баланса процесса горения [2].

3. Действительные объёмы воздуха  $V_a$  ( $\text{м}^3/\text{кг}$ ;  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ) и продуктов сгорания топлива  $V_{RO_2}$ ,  $V_{R_2}$ ,  $V_{H_2O}$ ,  $V_z$  ( $\text{м}^3/\text{м}^3$ ) рассчитываются с учётом выбранного коэффициента избытка воздуха [2].

Выбор оптимального значения коэффициента избытка воздуха в камере сгорания  $\alpha$  осуществляется в соответствии с рекомендациями, приведёнными в табл. 3.

Таблица 3

Расчетные характеристики камер сгорания

Топливо	Коэффициент избытка воздуха на выходе из камеры сгорания, $\alpha$	Потери теплоты с химическим недожогом, $q_3$ , %	Потери теплоты с механическим недожогом, $q_4$ , %
Антрацит	1,2 – 1,25	0,5 – 1	3 – 6
Полуантрацит	1,2 – 1,25	0,5 – 1	3 – 5
Тощий уголь	1,2 – 1,25	0,5 – 1	2 – 5
Каменный уголь	1,2 – 1,25	0,5 – 1	2 – 4
Бурый уголь	1,15 – 1,2	0 – 0,5	1 – 3
Фрезерный торф	1,15 – 1,2	0 – 0,5	1 – 3
Сланец	1,15 – 1,2	0 – 0,5	2 – 3
Мазут	1,05 – 1,1	0,5	0
Природный газ	1,05 – 1,1	0,5	0
Попутный газ	1,1 – 1,15	0,5 – 1	0
Генераторный, коксовый и доменный газ	1,05 – 1,1	0,5	0
Биогаз	1,05 – 1,1	0,5	0

4. Температура газов на выходе из камеры сгорания определяется из уравнения теплового баланса камеры сгорания:

$$Q_p \cdot \frac{100 - \sum q_i^{КСГ}}{100} = I_{КСГ}, \quad (1)$$

где  $Q_p = Q_i^r + i_{мл} + Q_\phi + Q_в$  – располагаемая теплота,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \left( \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \right)$ ;

$\sum q_i^{КСГ} = q_3 + q_4 + q_5 + q_6$  – сумма потерь теплоты в камере сгорания, %;

$$I_{\text{КСЗ}} = I_2^o + (\alpha - 1) \cdot I_6^o - \text{энтальпия продуктов сгорания, } \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \left( \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \right).$$

Располагаемая теплота *газового* топлива принимается равной низшей теплоте сгорания сухого газа  $Q_p = Q_i^d$ , а для *твёрдого* и *жидкого* топлива учитывается физическая теплота топлива  $i_{\text{тл}}$ , которая зависит от температуры и теплоёмкости поступающего на горение топлива:

$$i_{\text{тл}} = c_{\text{тл}} t_{\text{тл}},$$

где  $c_{\text{тл}}$  – удельная теплоемкость топлива, кДж/(кг·°С);

$t_{\text{тл}}$  – температура топлива, °С.

Температура *твёрдого* топлива (для летнего периода) принимается  $t_{\text{тл}} = 20$  °С, а теплоёмкость топлива определяется по формуле

$$c_{\text{тл}} = 0,042 W^I + c_{\text{тл}}^d (1 - 0,01 W^I), \text{ кДж/(кг·°С)}.$$

Теплоёмкость сухой массы топлива  $c_{\text{тл}}^d$  принимается по среднестатистическим данным, кДж/(кг·°С):

- торф, сланец – 1,67;
- бурый уголь – 1,13;
- каменный уголь – 1,09;
- антрацит, полуантрацит, тощий уголь – 0,92.

Температура *мазута* для обеспечения тонкого распыла в форсунках котельного агрегата должна быть достаточно высокой и принимается в расчётах  $t_{\text{тл}} = 90 \div 140$  °С.

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

При распылении *мазута* с помощью паромеханических форсунок в камеру сгорания вместе с разогретым мазутом поступает пар, который вносит в камеру сгорания дополнительную теплоту  $Q_\phi$ , определяемую по формуле

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

где  $G_\phi$  – удельный расход пара, кг пара/кг мазута;



$i_{\phi}$  – энтальпия пара, поступающего в форсунку, кДж/кг.

Удельный расход пара принимается в диапазоне  $G_{\phi} = 0,03 \div 0,05$  кг/кг, а энтальпия пара  $i_{\phi}$ , поступающего на распыл мазута, определяется из соответствующих справочников или таблиц по давлению  $P_n = 0,3 \div 0,6$  МПа и температуре  $t_n = 280 \div 350$  °С. При отсутствии справочных данных можно принять  $i_{\phi} = 3000 \div 3200$  кДж/кг.

Тепло, вносимое с воздухом, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>):

$$Q_6 = \alpha \cdot V_6^o \cdot c_6 \cdot t_6 ,$$

где  $c_6$  – теплоёмкость воздуха при температуре  $t_6$ .

Потери теплоты с химическим и механическим недожогом  $q_3$  и  $q_4$  выбираются, в зависимости от вида сжигаемого топлива, по табл. 3.

Потери с физической теплотой удаляемого шлака  $q_6$  учитываются только для многозольных топлив, когда  $A^r > 2,5 Q_1^r$ , где  $Q_1^r$  выражено в МДж/кг. Расчёт потерь с физической теплотой шлаков ведётся по формуле

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

где  $a_{\text{шл}} = 0,05$  – доля золы в шлаке;

$(ct)_{\text{шл}} = 560$  кДж/кг – энтальпия шлака (принимается при  $t_{\text{шл}} = 600$  °С).

Энтальпии теоретических объёмов воздуха и продуктов сгорания при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha=1$  для всех видов топлива (кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>) определяются:

$$I_6^o = V_6^o (c\mathcal{G})_B ;$$

$$I_2^o = V_{\text{RO}_2} (c\mathcal{G})_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^o (c\mathcal{G})_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2}^o (c\mathcal{G})_{\text{N}_2} .$$

В приведенных формулах:  $(c\mathcal{G})_B$ ,  $(c\mathcal{G})_{\text{RO}_2}$ ,  $(c\mathcal{G})_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $(c\mathcal{G})_{\text{N}_2}$  – энтальпии 1 м<sup>3</sup>, соответственно, воздуха, трёхатомных газов, водяных паров и азота.

Таким образом, энтальпия продуктов сгорания при избытке воздуха  $\alpha > 1$  в камере сгорания:

$$I_{\text{КСЗ}} = I_2^o + (\alpha - 1) \cdot I_6^o = V_{\text{RO}_2} (c \vartheta)_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^o (c \vartheta)_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2}^o (c \vartheta)_{\text{N}_2} + (\alpha - 1) V_{\text{B}}^o (c \vartheta)_{\text{B}}.$$

При условии, что воздух состоит из 79 % азота и 21 % кислорода, а также имеет определённое влагосодержание, энтальпия продуктов сгорания:

$$\begin{aligned} I_{\text{КСЗ}} &= V_{\text{RO}_2} (c \vartheta)_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} (c \vartheta)_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} (c \vartheta)_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} (c \vartheta)_{\text{O}_2} = \\ &= (V_{\text{RO}_2} c_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} c_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} c_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} c_{\text{O}_2}) \cdot \vartheta_{\text{КСЗ}} = \vartheta_{\text{КСЗ}} \cdot \sum V_i c_i, \end{aligned}$$

$$\text{где } V_{\text{N}_2} = V_{\text{N}_2}^o + 0,79 \cdot (\alpha - 1) V_6^o; \quad V_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) V_6^o.$$

Таким образом, уравнение теплового баланса (1) преобразуется следующим образом:

$$Q_p \cdot \frac{100 - \sum q_i^{\text{КСЗ}}}{100} = \vartheta_{\text{КСЗ}} \cdot \sum V_i c_i. \quad (2)$$

Решение уравнения теплового баланса (2) относительно температуры в камере сгорания  $\vartheta_{\text{КСЗ}}$  в явном виде не имеет решения, поскольку входящие в это уравнение теплоёмкости продуктов сгорания сами являются функцией температуры  $\vartheta_{\text{КСЗ}}$ .

Определить  $\vartheta_{\text{КСЗ}}$  можно, используя метод *последовательных приближений*, или *графоаналитический* метод (рис. 5).

Из уравнения теплового баланса температура на выходе из камеры сгорания:

$$\vartheta_{\text{КСЗ}} = Q_p \cdot \frac{100 - \sum q_i^{\text{КСЗ}}}{100} \cdot \frac{1}{\sum V_i c_i}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Запишем эту зависимость в виде двух функций:

$$\begin{cases} y_1 = \vartheta_{\text{КСЗ}} \\ y_2 = Q_p \cdot \frac{100 - \sum q_i^{\text{КСЗ}}}{100} \cdot \frac{1}{\sum V_i c_i} \end{cases}$$

Решение задачи относительно  $\vartheta_{\text{КСЗ}}$  сводится к нахождению условий, при которых  $y_1 = y_2$ . Значение  $y_1$  и  $y_2$  рассчитываются не менее чем по трём значениям  $\vartheta_{\text{КСЗ}}$ , близким к ожидаемому. Пересечение прямой  $y_1$  и расчётной кривой  $y_2$  даёт искомую температуру на выходе из камеры

сгорания  $g_{КСГ}$ .

Средние теплоёмкости воздуха и продуктов сгорания, в зависимости от температуры, приведены в табл. 4, при этом принимается  $c_{RO_2} = c_{CO_2}$ .

Таблица 4

Теплоёмкости газов и воздуха

$t, ^\circ\text{C}$	$c_{CO_2}$	$c_{N_2}$	$c_{O_2}$	$c_{H_2O}$	$c_{С.В}$	$c_{В}$
	кДж/(м <sup>3</sup> ·К)					
0	1.6010	1.2955	1.3069	1.4954	1.2981	1.3198
100	1.7016	1.2968	1.3186	1.5063	1.3014	1.3253
200	1.7887	1.3006	1.3362	1.5235	1.3081	1.3328
300	1.8641	1.3077	1.3571	1.5436	1.3182	1.3433
400	1.9312	1.3173	1.3785	1.5666	1.3299	1.3555
500	1.9902	1.3286	1.3990	1.5909	1.3437	1.3693
600	2.0426	1.3412	1.4179	1.6161	1.3576	1.3840
700	2.0900	1.3546	1.4355	1.6425	1.3718	1.3986
800	2.1327	1.3680	1.4510	1.6693	1.3852	1.4124
900	2.1708	1.3806	1.4657	1.6969	1.3986	1.4259
1000	2.2052	1.3928	1.4786	1.7242	1.4108	1.4384
1100	2.2366	1.4045	1.4904	1.7514	1.4225	1.4594
1200	2.2655	1.4154	1.5017	1.7782	1.4338	1.4623
1300	2.2915	1.4263	1.5117	1.8042	1.4443	1.4736
1400	2.3154	1.4359	1.5214	1.8293	1.4539	1.4841
1500	2.3372	1.4451	1.5306	1.8541	1.4631	1.4937
1600	2.3573	1.4539	1.5390	1.8775	1.4719	1.5029
1700	2.3761	1.4623	1.5474	1.9010	1.4799	1.5113
1800	2.3933	1.4698	1.5553	1.9228	1.4879	1.5189
1900	2.4092	1.4770	1.5629	1.9437	1.4950	1.5268
2000	2.4239	1.4837	1.5704	1.9643	1.5021	1.5340
2100	2.4377	1.4904	1.5771	1.9840	1.5084	1.5411
2200	2.4503	1.4962	1.5842	2.0024	1.5147	1.5474
2300	2.4620	1.5021	1.5909	2.0204	1.5205	1.5536

Рассмотрим пример, проиллюстрированный на рис. 5.

Исходные (расчётные) данные:

- располагаемое тепло топлива  $Q_p$ ,
- суммарные потери в камере сгорания  $\sum q_i^{КСГ}$ ,
- объёмы трёхатомных газов  $V_{RO_2}$ , водяных паров  $V_{H_2O}$ , азота  $V_{N_2}$  и кислорода  $V_{O_2}$ .

Принимаем температуру  $g_{КСГ} = y_1 = 1700 ^\circ\text{C}$ .

Из табл. 4 находим теплоёмкости газов при данной температуре и определяем  $y_2 = 1773$  °С.

Принимаем ближайшее табличное значение температуры, превышающее 1773 °С  $\rightarrow \vartheta_{кст} = y_1 = 1800$  °С.

Из табл. 4 находим теплоёмкости газов при данной температуре и определяем  $y_2 = 1720$  °С.

На пересечении прямых находится примерное значение температуры в камере сгорания 1728 °С (см. рис. 5).

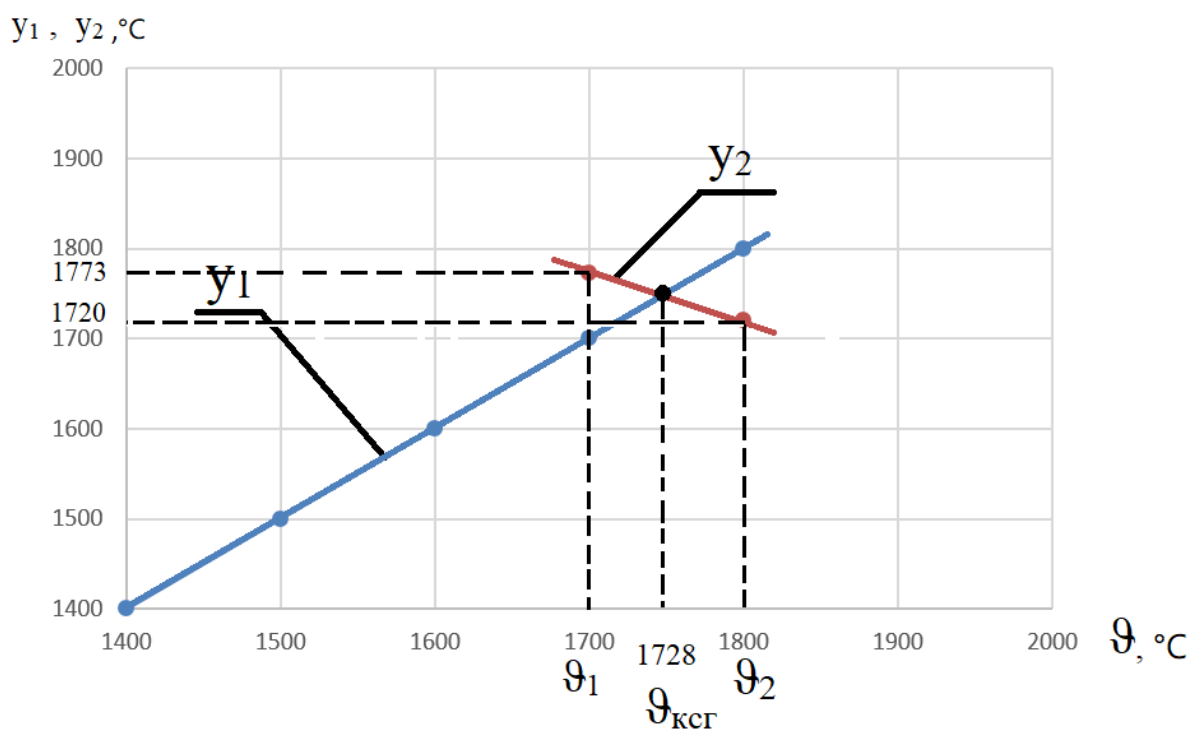


Рис. 5. Графоаналитический метод определения температуры в камере сгорания

Для уточнения определяются теплоёмкости газов при температуре 1728 °С (по табл. 5, путём линейной интерполяции) и рассчитывается уточнённое значение температуры.

Таблица 5

Теплоёмкость дымовых газов, кДж/(м<sup>3</sup>·°С)

	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
1700	2,3761	1,4623	1,5474	1,9010
1728	2,3809	1,4644	1,5496	1,9071
1800	2,3933	1,4698	1,5553	1,9228

$$\begin{cases}
 y_1 = 1700 \\
 y_2 = Q_p \cdot \frac{100 - \sum q_i^{ксз}}{100} \cdot \frac{1}{\sum V_i c_i} = \\
 = 19830 \cdot \frac{100 - 1,2}{100} \cdot \frac{1}{2,3761 \cdot 0,95 + 1,901 \cdot 1,207 + 1,4623 \cdot 4,51 + 1,5474 \cdot 0,11} = 1773
 \end{cases}$$

$$\begin{cases}
 y_1 = 1800 \\
 y_2 = Q_p \cdot \frac{100 - \sum q_i^{ксз}}{100} \cdot \frac{1}{\sum V_i c_i} = \\
 = 19830 \cdot \frac{100 - 1,2}{100} \cdot \frac{1}{2,3933 \cdot 0,95 + 1,9228 \cdot 1,207 + 1,4698 \cdot 4,51 + 1,5553 \cdot 0,11} = 1720
 \end{cases}$$

$$\begin{cases}
 y_1 = 1728 \\
 y_2 = Q_p \cdot \frac{100 - \sum q_i^{ксз}}{100} \cdot \frac{1}{\sum V_i c_i} = \\
 = 19830 \cdot \frac{100 - 1,2}{100} \cdot \frac{1}{2,3809 \cdot 0,95 + 1,9071 \cdot 1,207 + 1,4644 \cdot 4,51 + 1,5496 \cdot 0,11} = 1728
 \end{cases}$$

5. В уравнении теплового баланса всего процесса учитываются тепловые потери не только в камере сгорания, но и в камере смешения:

$$\left[ Q_p \cdot \frac{100 - \sum q_i^{ксз}}{100} + Q_{в.см} \right] \cdot \frac{100 - q_{5,см}}{100} = I_{эн} \quad (3)$$

где  $Q_{в.см}$  – тепло, вносимое в камеру смешения воздухом,

предназначенным для разбавления продуктов сгорания, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>);  $q_{5.см}$  – потери тепла через обмуровку в камере смешения, %;  $I_{эн}$  – энтальпия энергоносителя (смеси продуктов сгорания и воздуха), кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>).

Теплота, вносимая в камеру смешения воздухом, предназначенным для разбавления продуктов сгорания  $Q_{в.см}$ , складывается из теплоты сухого воздуха  $Q_{в.см}^c$  и теплоты водяных паров, содержащихся в нём  $Q_{в.см}^{H_2O}$ :

$$Q_{в.см} = Q_{в.см}^c + Q_{в.см}^{H_2O}.$$

При этом

$$Q_{в.см}^c = V_{в.см}^c \cdot c_{в}^c \cdot t_{в};$$

$$Q_{в.см}^{H_2O} = 1,24 \cdot V_{в.см}^c \cdot d_{в} \cdot c_{H_2O} \cdot t_{в},$$

где  $V_{в.см}^c$  – объём сухого воздуха, необходимого для разбавления продуктов сгорания, отнесенный к 1 кг (1 м<sup>3</sup>) топлива, м<sup>3</sup>/кг (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>);  $v_{H_2O} = 1,24 \text{ м}^3/\text{кг}$  – удельный объём водяного пара;  $c_{в}^c$ ,  $c_{H_2O}$  – теплоёмкости сухого воздуха и водяных паров при температуре  $t_{в}$ , кДж/(м<sup>3</sup>·°C),  $d_{в}$  – влагосодержание воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Таким образом:

$$Q_{в.см} = V_{в.см}^c \cdot (c_{в}^c + 1,24 \cdot d_{в} \cdot c_{H_2O}) \cdot t_{в}. \quad (4)$$

Энергоноситель (сушильный агент) в данном случае представляет собой смесь:

- продуктов сгорания топлива, полученных при  $\alpha=1$ ;
- избыточного количества сухого воздуха;
- сухого воздуха, вводимого в камеру смешения для разбавления продуктов сгорания;
- водяных паров, содержащихся в избыточном воздухе;
- водяных паров, содержащихся в воздухе, подаваемом в камеру смешения.

Следовательно, энтальпия энергоносителя, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>):

$$I_{эн} = I_{КСЗ}^o + (\alpha - 1)I_{г}^o + I_{в.см} . \quad (5)$$

Энтальпия теоретического объёма продуктов сгорания в энергоносителе:

$$I_{КСЗ}^o = (V_{RO_2} c_{RO_2} + V_{N_2}^o c_{N_2} + V_{H_2O}^o c_{H_2O}) \cdot \mathcal{G}_{эн} , \quad (6)$$

где теплоёмкости продуктов сгорания определяются по  $\mathcal{G}_{эн}$ .

Энтальпия воздуха, поступающего с дымовыми газами из камеры сгорания в камеру смешения, представляет собой сумму энтальпий сухого воздуха  $I_{г}^c$  и водяных паров  $I_{H_2O}^o$ :

$$I_{г}^o = I_{г}^c + I_{H_2O}^o = V_{г}^o \cdot (c_{г}^c + 1,24 \cdot d_{г} \cdot c_{H_2O}) \cdot \mathcal{G}_{эн} , \quad (7)$$

где  $c_{г}^c$  и  $c_{H_2O}$  – средние в интервале температур от  $t_{г}$  до  $\mathcal{G}_{эн}$  теплоёмкости, соответственно, сухого воздуха и энергоносителя.

Энтальпия воздуха, подаваемого в камеру смешения для разбавления продуктов сгорания:

$$I_{в.см} = V_{в.см}^c \cdot (c_{г}^c + 1,24 \cdot d_{г} \cdot c_{H_2O}) \cdot \mathcal{G}_{эн} , \quad (8)$$

где  $c_{г}^c$  и  $c_{H_2O}$  – определяются по температуре энергоносителя  $\mathcal{G}_{эн}$ .

Подставив в левую часть уравнения теплового баланса всего процесса (3) уравнение (4), а в правую часть – уравнения (6, 7, 8), можно получить зависимость с одним неизвестным и определить  $V_{в.см}^c$ .

Тогда удельный расход воздуха, необходимого для разбавления продуктов сгорания в камере смешения, м<sup>3</sup>/кг (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>):

$$V_{в.см} = V_{в.см}^c + 1,24 \cdot d_{г} \cdot V_{в.см}^c .$$

**6.** Расход топлива  $B_m$  (кг/с; м<sup>3</sup>/с) определяется из уравнения материального баланса процесса получения заданного количества энергоносителя после камеры смешения.

Объёмный расход энергоносителя, м<sup>3</sup>/с:

$$G_э = G_{ксс}^o + G_{в.изб} + G_{в.см} , \quad (9)$$

где  $G_{ксс}^o$  – объёмный расход продуктов сгорания, образующихся в камере сгорания при  $\alpha=1$ ;  $G_{в.изб}$  – объёмный расход избыточного воздуха, предназначенного для сжигания топлива;  $G_{в.см}$  – объёмный расход воздуха, подаваемого в камеру смешения для разбавления продуктов сгорания.

Все вышеперечисленные объёмные расходы могут быть выражены через расчётный расход топлива  $B_{т.р}$ :

$$G_{ксс}^o = V_г^o B_{т.р} ; \quad (10)$$

$$G_{в.изб} = G_{в.изб}^c + G_{в.изб}^{H_2O} ; \quad (11)$$

$$G_{в.см} = V_{в.см} B_{т.р} , \quad (12)$$

где  $G_{в.изб}^c = (\alpha - 1) \cdot V_г^o \cdot B_{т.р}$  – объёмный расход избыточного сухого воздуха, подаваемого в камеру сгорания;

$G_{в.изб}^{H_2O} = 1,24 \cdot V_г^o \cdot d_г \cdot B_{т.р}$  – объёмный расход водяных паров в избыточном воздухе.

При известном расходе энергоносителя  $G_э$ , подставив зависимости (10, 11, 12) в формулу (9), можно определить секундный расчётный расход топлива  $B_{т.р}$ , необходимого для получения заданного количества энергоносителя.

Тогда полный расход топлива, кг/с (м<sup>3</sup>/с):

$$B_m = B_{т.р} \cdot \frac{100}{100 - q_4} .$$

Объёмный расход воздуха, необходимого для сжигания топлива, определяется по найденному расчётному расходу топлива, м<sup>3</sup>/с:

$$G_э = \alpha V_г^o B_{т.р} (1 + 1,24 \cdot d_г) ,$$



а расход воздуха, подаваемого в камеру смешения для разбавления продуктов сгорания  $G_{в.см}$  по формуле (12).

7. Суммарный объём продуктов сгорания равен 100 %, поэтому состав продуктов сгорания, %:

$$RO_2 = \frac{V_{RO_2}}{V_2} \cdot 100 \% ; \quad N_2 = \frac{V_{N_2}}{V_2} \cdot 100 \% ; \quad O_2 = \frac{V_{O_2}}{V_2} \cdot 100 \% ; \quad H_2O = \frac{V_{H_2O}}{V_2} \cdot 100 \% .$$

В результате разбавления продуктов сгорания воздухом в камере смешения в энергоносителе увеличивается количество кислорода, азота и водяных паров,  $м^3/кг$  ( $м^3/м^3$ ):

$$V_{N_2}^3 = V_{N_2} + 0,79V_{в.см}^c ;$$

$$V_{O_2}^3 = V_{O_2} + 0,21V_{в.см}^c ;$$

$$V_{H_2O}^3 = V_{H_2O} + 1,24 \cdot d_g \cdot V_{в.см}^c .$$

Общий выход энергоносителя:

$$V_3 = V_{RO_2} + V_{N_2}^3 + V_{O_2}^3 + V_{H_2O}^3 .$$

Состав энергоносителя, %:

$$RO_2^3 = \frac{V_{RO_2}}{V_3} \cdot 100 \% ; \quad N_2^3 = \frac{V_{N_2}^3}{V_3} \cdot 100 \% ;$$

$$O_2^3 = \frac{V_{O_2}^3}{V_3} \cdot 100 \% ; \quad H_2O^3 = \frac{V_{H_2O}^3}{V_3} \cdot 100 \% .$$

## Приложение

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Расход энергоносителя, $G_{эн}$ , м <sup>3</sup> /с	1	2	3	4	5	1,2	2,2	3,2	4,2	2,5	3,5	4,5	5,5
Температура энергоносителя, $\vartheta_{эн}$ , °С	450	900	500	850	550	800	600	750	700	650	450	900	500
Потери тепла $q_5$ в камере сгорания, %	1,5	1,6	1,7	1,2	1,4	1,3	0,8	0,9	1	1,5	1,5	1,6	1,7
Потери тепла $q_{5,см}$ в камере смешения, %	1,7	2	1,4	1,9	1,5	1,8	1,2	1,3	0,9	0,4	1,5	2,5	2,1
Вид топлива	Антрацит	Полуантрацит	Тощий уголь	Камен.уголь	Камен.уголь	Камен.уголь	Бурый уголь	Бурый уголь	Торф	Сланец	Мазут	Мазут	Мазут
Бассейн / марка	Донецкий	Егоршинское	Кузнецкий Т	Интинский Д	Кузнецкий Г	Печорский Ж	Берёзов. Б2	Челябин. Б3	фрезерный	Лен.обл.	низкосернист.	сернистый	высокосерни.
Состав твёрдого и жидкого топлива, %													
Влажность, $W^r$	8,5	8,0	7,0	11,5	8,0	5,5	33,0	17,0	50,0	11,5	3,00	3,0	3,0
Зольность, $A^r$	22,9	23,9	18,6	27,4	14,3	28,4	4,7	32,4	6,3	60,6	0,05	0,10	0,10
Сера, $S_{о+р}^r$	1,0	0,4	0,5	2,5	0,5	0,9	0,2	0,9	0,1	1,7	0,30	1,4	2,8
Углерод, $C^r$	63,8	60,3	67,0	45,8	63,3	55,5	44,2	35,9	24,7	20,6	84,7	83,8	83,0
Водород, $H^r$	1,2	2,5	2,8	3,1	4,4	3,6	3,1	2,6	2,6	2,7	11,7	11,2	10,4
Азот, $N^r$	1,3	0,9	1,6	1,5	2,1	1,7	0,4	1,0	1,1	0,1	0,15	0,25	0,35
Кислород, $O^r$	1,3	4,0	2,5	8,2	7,4	4,4	14,4	10,2	15,2	2,8	0,15	0,25	0,35

Вариант	14	15	16	17	18	19	20	21
Расход энергоносителя, $G_{эн}$ , $m^3/c$	1,6	2,6	3,6	4,6	1,8	2,8	3,8	4,8
Температура энергоносителя, $\vartheta_{эн}$ , °C	850	650	700	800	750	650	550	450
Потери тепла $q_5$ в камере сгорания, %	1,5	1,6	1,7	1,8	1	0,9	0,8	0,7
Потери тепла $q_{5,см}$ в камере смешения, %	2	2,2	2,4	3	2,5	2	1,5	1
Вид топлива	Природный газ	Природный газ	Природный газ	Попутный газ	Искусств. газ	Искусств. газ	Искусств. газ	Биогаз
Бассейн / марка	Медвежье	Ямбург	Уренгой	Самоглот	генераторный	кокосовый	доменный	свалочный
Состав газообразного топлива, %								
CH <sub>4</sub>	98,78	89,67	98,84	53,4	5,5	25	0,3	55
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,10	4,39	0,10	7,2	0	2	0	0
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,02	2,36	0,03	15,1	0	0	0	0
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0	1,64	0,02	8,3	0	0	0	0
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0	0,74	0,01	6,3	0	0	0	0
H <sub>2</sub>	0	0	0	0	49	58	2,7	1
CO	0	0	0	0	42	7	28	0
H <sub>2</sub> S	0	0	0	0	0	0	0,3	0
CO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	3	10,5	40
N <sub>2</sub>	1,0	0,26	0,70	9,6	3,5	4	58,2	2
O <sub>2</sub>	0,10	0,94	0,30	0,1	0	1	0	2

Вариант	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Расход энергоносителя, $G_{эн}$ , $M^3/c$	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	1,2	2,2	3,2	4,2
Температура энергоносителя, $\vartheta_{эн}$ , °C	450	900	500	850	550	800	600	750	700
Потери тепла $q_5$ в камере сгорания, %	1,5	1,6	1,7	1,2	1,4	1,3	0,8	0,9	1
Потери тепла $q_{5,см}$ в камере смешения, %	1,7	2	1,4	1,9	1,5	1,8	1,2	1,3	0,9
Вид топлива	Антрацит	Полуантрацит	Тоший уголь	Камен.уголь	Камен.уголь	Камен.уголь	Бурий уголь	Бурий уголь	Торф
	Донецкий	Егоршинское	Кузнецкий Т	Интинский Д	Кузнецкий Г	Печорский Ж	Берёзов. Б2	Челябин. Б3	фрезерный
Бассейн / марка									
Состав твёрдого и жидкого топлива, %									
Влажность, $W^r$	8,5	8,0	7,0	11,5	8,0	5,5	33,0	17,0	50,0
Зольность, $A^r$	22,9	23,9	18,6	27,4	14,3	28,4	4,7	32,4	6,3
Сера, $S^r_{o+p}$	1,0	0,4	0,5	2,5	0,5	0,9	0,2	0,9	0,1
Углерод, $C^r$	63,8	60,3	67,0	45,8	63,3	55,5	44,2	35,9	24,7
Водород, $H^r$	1,2	2,5	2,8	3,1	4,4	3,6	3,1	2,6	2,6
Азот, $N^r$	1,3	0,9	1,6	1,5	2,1	1,7	0,4	1,0	1,1
Кислород, $O^r$	1,3	4,0	2,5	8,2	7,4	4,4	14,4	10,2	15,2

Вариант	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43
Расход энергоносителя, $G_{эн}, м^3/с$	1	2	3	4	5	1,2	2,2	3,2	4,2	2,5	3,5	4,5	5,5
Температура энергоносителя, $\vartheta_{эн}, °C$	450	900	500	850	550	800	600	750	700	650	450	900	500
Потери тепла $q_5$ в камере сгорания, %	1,5	1,6	1,7	1,2	1,4	1,3	0,8	0,9	1	1,5	1,5	1,6	1,7
Потери тепла $q_{5.см}$ в камере смешения, %	1,7	2	1,4	1,9	1,5	1,8	1,2	1,3	0,9	0,4	1,5	2,5	2,1

### Вид топлива

Антрацит	Полуантрацит	Тощий уголь	Камен.уголь	Камен.уголь	Камен.уголь	Бурый уголь	Бурый уголь	Торф	Сланец	Мазут	Мазут	Мазут
Донецкий	Егоршинское	Кузнецкий Т	Интинский Д	Кузнецкий Г	Печорский Ж	Берёзов. Б2	Челябин. Б3	Фрезерный	Лен.обл.	низкосернист.	сернистый	высокосерни.

### Бассейн / марка

#### Состав твёрдого и жидкого топлива, %

Влажность, $W^r$	8,5	8,0	7,0	11,5	8,0	5,5	33,0	17,0	50,0	11,5	3,00	3,0	3,0
Зольность, $A^r$	22,9	23,9	18,6	27,4	14,3	28,4	4,7	32,4	6,3	60,6	0,05	0,10	0,10
Сера, $S^r_{o+p}$	1,0	0,4	0,5	2,5	0,5	0,9	0,2	0,9	0,1	1,7	0,30	1,4	2,8
Углерод, $C^r$	63,8	60,3	67,0	45,8	63,3	55,5	44,2	35,9	24,7	20,6	84,7	83,8	83,0
Водород, $H^r$	1,2	2,5	2,8	3,1	4,4	3,6	3,1	2,6	2,6	2,7	11,7	11,2	10,4
Азот, $N^r$	1,3	0,9	1,6	1,5	2,1	1,7	0,4	1,0	1,1	0,1	0,15	0,25	0,35
Кислород, $O^r$	1,3	4,0	2,5	8,2	7,4	4,4	14,4	10,2	15,2	2,8	0,15	0,25	0,35

Вариант	44	45	46	47	48	49	50	51
Расход энергоносителя, $G_{эн}$ , м <sup>3</sup> /с	1,6	2,6	3,6	4,6	1,8	2,8	3,8	4,8
Температура энергоносителя, $\vartheta_{эн}$ , °С	850	650	700	800	750	650	550	450
Потери тепла $q_5$ в камере сгорания, %	1,5	1,6	1,7	1,8	1	0,9	0,8	0,7
Потери тепла $q_{5,см}$ в камере смешения, %	2	2,2	2,4	3	2,5	2	1,5	1
Вид топлива	Природный газ	Природный газ	Природный газ	Попутный газ	Искусств. газ	Искусств. газ	Искусств. газ	Биогаз
Бассейн / марка	Медвежье	Ямбург	Уренгой	Самотлор	генераторный	кокосовый	доменный	свалочный
Состав газообразного топлива, %								
CH <sub>4</sub>	98,78	89,67	98,84	53,4	5,5	25	0,3	55
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,10	4,39	0,10	7,2	0	2	0	0
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,02	2,36	0,03	15,1	0	0	0	0
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0	1,64	0,02	8,3	0	0	0	0
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0	0,74	0,01	6,3	0	0	0	0
H <sub>2</sub>	0	0	0	0	49	58	2,7	1
CO	0	0	0	0	42	7	28	0
H <sub>2</sub> S	0	0	0	0	0	0	0,3	0
CO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	3	10,5	40
N <sub>2</sub>	1,0	0,26	0,70	9,6	3,5	4	58,2	2
O <sub>2</sub>	0,10	0,94	0,30	0,1	0	1	0	2

Вариант	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Расход энергоносителя, $G_{эн}, м^3/с$	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	1,2	2,2	3,2	4,2
Температура энергоносителя, $\theta_{эн}, ^\circ C$	450	900	500	850	550	800	600	750	700
Потери тепла $q_5$ в камере сгорания, %	1,5	1,6	1,7	1,2	1,4	1,3	0,8	0,9	1
Потери тепла $q_{5,см}$ в камере смешения, %	1,7	2	1,4	1,9	1,5	1,8	1,2	1,3	0,9

### Вид топлива

Антрацит	Полуантрацит	Тощий уголь	Камен.уголь	Камен.уголь	Камен.уголь	Камен.уголь	Бурый уголь	Бурый уголь	Торф
Донецкий	Егоршинское	Кузнецкий Т	Интинский Д	Кузнецкий Г	Печорский Ж	Берёзов. Б2	Челябин. Б3	Фрезерный	

### Бассейн / марка

Состав твёрдого и жидкого топлива, %									
Влажность, $W^r$	8,5	8,0	7,0	11,5	8,0	5,5	33,0	17,0	50,0
Зольность, $A^r$	22,9	23,9	18,6	27,4	14,3	28,4	4,7	32,4	6,3
Сера, $S^r_{о+р}$	1,0	0,4	0,5	2,5	0,5	0,9	0,2	0,9	0,1
Углерод, $C^r$	63,8	60,3	67,0	45,8	63,3	55,5	44,2	35,9	24,7
Водород, $H^r$	1,2	2,5	2,8	3,1	4,4	3,6	3,1	2,6	2,6
Азот, $N^r$	1,3	0,9	1,6	1,5	2,1	1,7	0,4	1,0	1,1
Кислород, $O^r$	1,3	4,0	2,5	8,2	7,4	4,4	14,4	10,2	15,2

Вариант	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73
Расход энергоносителя, $G_{эн}, м^3/с$	1	2	3	4	5	1,2	2,2	3,2	4,2	2,5	3,5	4,5	5,5
Температура энергоносителя, $\vartheta_{эн}, ^\circ C$	450	900	500	850	550	800	600	750	700	650	450	900	500
Потери тепла $q_5$ в камере сгорания, %	1,5	1,6	1,7	1,2	1,4	1,3	0,8	0,9	1	1,5	1,5	1,6	1,7
Потери тепла $q_{5,см}$ в камере смешения, %	1,7	2	1,4	1,9	1,5	1,8	1,2	1,3	0,9	0,4	1,5	2,5	2,1

### Вид топлива

Антрацит	Полуантрацит	Тощий уголь	Камен.уголь	Камен.уголь	Камен.уголь	Бурый уголь	Бурый уголь	Торф	Сланец	Мазут	Мазут	Мазут
Донецкий	Егоршинское	Кузнецкий Т	Интинский Д	Кузнецкий Г	Печорский Ж	Берёзов. Б2	Челябин. Б3	фрезерный	Лен.обл.	низкосернист.	сернистый	высокосерни.

### Бассейн / марка

#### Состав твёрдого и жидкого топлива, %

Влажность, $W^r$	8,5	8,0	7,0	11,5	8,0	5,5	33,0	17,0	50,0	11,5	3,00	3,0	3,0
Зольность, $A^r$	22,9	23,9	18,6	27,4	14,3	28,4	4,7	32,4	6,3	60,6	0,05	0,10	0,10
Сера, $S^r_{о+р}$	1,0	0,4	0,5	2,5	0,5	0,9	0,2	0,9	0,1	1,7	0,30	1,4	2,8
Углерод, $C^r$	63,8	60,3	67,0	45,8	63,3	55,5	44,2	35,9	24,7	20,6	84,7	83,8	83,0
Водород, $H^r$	1,2	2,5	2,8	3,1	4,4	3,6	3,1	2,6	2,6	2,7	11,7	11,2	10,4
Азот, $N^r$	1,3	0,9	1,6	1,5	2,1	1,7	0,4	1,0	1,1	0,1	0,15	0,25	0,35
Кислород, $O^r$	1,3	4,0	2,5	8,2	7,4	4,4	14,4	10,2	15,2	2,8	0,15	0,25	0,35



Вариант	74	75	76	77	78	79	80	81
Расход энергоносителя, $G_{эн}$ , м <sup>3</sup> /с	1,6	2,6	3,6	4,6	1,8	2,8	3,8	4,8
Температура энергоносителя, $\vartheta_{эн}$ , °С	850	650	700	800	750	650	550	450
Потери тепла $q_5$ в камере сгорания, %	1,5	1,6	1,7	1,8	1	0,9	0,8	0,7
Потери тепла $q_{5,см}$ в камере смешения, %	2	2,2	2,4	3	2,5	2	1,5	1
Вид топлива	Природный газ	Природный газ	Природный газ	Попутный газ	Искусств. газ	Искусств. газ	Искусств. газ	Биогаз
Бассейн / марка	Медвежье	Ямбург	Уренгой	Самоглот	генераторный	кокосовый	доменный	свалочный
Состав газообразного топлива, %								
CH <sub>4</sub>	98,78	89,67	98,84	53,4	5,5	25	0,3	55
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,10	4,39	0,10	7,2	0	2	0	0
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,02	2,36	0,03	15,1	0	0	0	0
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0	1,64	0,02	8,3	0	0	0	0
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0	0,74	0,01	6,3	0	0	0	0
H <sub>2</sub>	0	0	0	0	49	58	2,7	1
CO	0	0	0	0	42	7	28	0
H <sub>2</sub> S	0	0	0	0	0	0	0,3	0
CO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	3	10,5	40
N <sub>2</sub>	1,0	0,26	0,70	9,6	3,5	4	58,2	2
O <sub>2</sub>	0,10	0,94	0,30	0,1	0	1	0	2

Вариант	82	83	84	85	86	87	88	89	90
Расход энергоносителя, $G_{эн}, м^3/с$	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	1,2	2,2	3,2	4,2
Температура энергоносителя, $\vartheta_{эн}, ^\circ C$	450	900	500	850	550	800	600	750	700
Потери тепла $q_5$ в камере сгорания, %	1,5	1,6	1,7	1,2	1,4	1,3	0,8	0,9	1
Потери тепла $q_{5,см}$ в камере смешения, %	1,7	2	1,4	1,9	1,5	1,8	1,2	1,3	0,9
Вид топлива	Антрацит	Полуантрацит	Тощий уголь	Камен.уголь	Камен.уголь	Камен.уголь	Бурый уголь	Бурый уголь	Торф
	Донецкий	Егоршинское	Кузнецкий Т	Интинский Д	Кузнецкий Г	Печорский Ж	Берёзов. Б2	Челябин. Б3	фрезерный
Бассейн / марка									
Состав твёрдого и жидкого топлива, %									
Влажность, $W^r$	8,5	8,0	7,0	11,5	8,0	5,5	33,0	17,0	50,0
Зольность, $A^r$	22,9	23,9	18,6	27,4	14,3	28,4	4,7	32,4	6,3
Сера, $S^r_{o+p}$	1,0	0,4	0,5	2,5	0,5	0,9	0,2	0,9	0,1
Углерод, $C^r$	63,8	60,3	67,0	45,8	63,3	55,5	44,2	35,9	24,7
Водород, $H^r$	1,2	2,5	2,8	3,1	4,4	3,6	3,1	2,6	2,6
Азот, $N^r$	1,3	0,9	1,6	1,5	2,1	1,7	0,4	1,0	1,1
Кислород, $O^r$	1,3	4,0	2,5	8,2	7,4	4,4	14,4	10,2	15,2

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Топливо и теория горения. Ч.І. Топливо: учебное пособие / СПбГТУРП. – СПб., 2011.
2. Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Топливо и теория горения. Ч.ІІ. Основы процессов горения: учебное пособие / СПбГТУРП. – СПб., 2011.
3. Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Основы сжигания газа: учебное пособие / СПбГТУРП. – СПб., 2009.
4. Белоусов В.Н., Сергеев В.В. Топливо и теория горения: учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – 231 с.
5. Смородин С.Н., Иванов А.Н. Тепловой и аэродинамический расчеты котельных установок: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб., 2018.

## СОДЕРЖАНИЕ

Общие методические указания . . . . .	3
Часть 1. Определение расчётных характеристик твёрдого топлива и расчёт материального баланса процесса горения . . . . .	4
Часть 2. Расчёт газовой горелки . . . . .	8
Часть 3. Расчёт камеры сгорания . . . . .	19
Приложение . . . . .	34
Библиографический список . . . . .	43

---

Редактор Н.П. Новикова

Темплан 2020 г., поз. 62

---

Подп.к печати 20.05.2020. Формат 60×84/16. Бумага тип. № 1.  
Печать офсетная. 2,75 печ.л.; 2,75 уч.-изд.л. ЭИ. Изд. № 62. Заказ №

---

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД,  
198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.