

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
Кафедра промышленной теплоэнергетики**

ТОПЛИВО И ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Выполнение курсовой работы

Методические указания для студентов очной формы обучения
по направлению подготовки:
13.03.01 — Теплоэнергетика и теплотехника

Составители:
В. Н. Белоусов
С. Н. Смородин
К. И. Мисютина

Санкт-Петербург
2024

Утверждено
на заседании кафедры ПТЭ
28.11.2023 г., протокол № 3

Рецензент Н. Н. Гладышев

Методические указания соответствуют программам и учебным планам дисциплины «Топливо и процессы горения в теплоэнергетических установках» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника». В методических указаниях представлены основы расчетов процесса сжигания органического топлива, порядок выполнения курсовой работы и подготовки к контролю усвоения дисциплины, а также содержатся расчетные задания по следующим разделам: состав и теплотехнические характеристики топлива, материальный баланс процесса горения, тепловой баланс процесса горения.

Методические указания предназначены для бакалавров очной формы обучения.

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД
в качестве методических указаний

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю.
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 20.02.2024 г. Рег.№ 5246/23

Высшая школа технологии и энергетики СПб ГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| Часть 1. Определение расчетных характеристик твердого топлива, классификация твердого топлива, условное топливо | 5 |
| Часть 2. Статика горения. Материальный и тепловой баланс процесса горения твердого, жидкого и газообразного топлива. Графоаналитический метод определения температуры горения | 6 |
| Часть 3. Расчет газовой горелки | 11 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК..... | 16 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ | 17 |

ВВЕДЕНИЕ

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, описывающей его.

При выполнении курсовой работы необходимо соблюдать следующие требования:

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

Курсовая работа для студентов очного отделения состоит из трех частей и базируется на следующих темах:

Часть 1. Состав и теплотехнические характеристики твердого топлива, классификация твердого топлива, условное топливо.

Часть 2. Статика горения. Материальный баланс процесса горения твердого, жидкого и газообразного топлива. Тепловой баланс процесса горения различных видов топлива, определение теоретической, адиабатической и действительной температур горения.

Часть 3. Расчет газовой горелки.

ЧАСТЬ 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДОГО ТОПЛИВА, КЛАССИФИКАЦИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА, УСЛОВНОЕ ТОПЛИВО

Состав рабочей массы топлива выбирается в соответствии с вариантом (порядковый номер в списке группы) из табл. 1.1.

Задание 1.1. Пересчитать состав топлива на сухую, беззольную и горючую (сухую беззольную) массу [1].

Задание 1.2. Исходя из заданного состава топлива, сделать мотивированное заключение, к какому виду углей (*бурый* или *каменный*) относится данное топливо? [1].

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 1.3. Рассчитать теплоту сгорания рабочей массы топлива пониженного качества (*повышенный внешний балласт*) – влажность и зольность увеличивается до ближайшего численного значения *кратного 5*.

Пример: $W_1 = 10.5 \% \rightarrow W_2 = 15 \% ,$
 $A_1 = 17.9 \% \rightarrow A_2 = 20 \% .$

Сделать вывод о влиянии внешнего балласта на теплотворную способность.

Задание 1.4. Определить расход *условного* и *заданного* (см. табл. 1.1) топлива (B_T , кг/с) для водогрейного котла со следующими расчетными характеристиками:

- расход воды $G_B = 50 + 75 \cdot n$, т/час;
- температура воды на входе $t_{вх} = 70$ °С;
- температура воды на выходе $t_{вых} = 150$ °С;
- давление воды $P_B = 2$ МПа;
- КПД котла $\eta = 92 + 0,1 \cdot n$ %.

Здесь: n – номер варианта.

Рекомендации:

Расчет выполняется на базе уравнения теплового баланса водогрейного котла:

$$Q_i^r \cdot B_T \cdot \eta = G_B \cdot (i_{вых} - i_{вх}),$$

где Q_i^r – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг,

B_T – расход топлива, кг/с,

η – КПД котла,

$i_{вх}$, $i_{вых}$ – энтальпия воды на входе и на выходе, кДж/кг.

ЧАСТЬ 2. СТАТИКА ГОРЕНИЯ. МАТЕРИАЛЬНЫЙ И ТЕПЛОВЫЙ БАЛАНС ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО, ЖИДКОГО И ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА. ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЕНИЯ

Цель и порядок расчета

1. Исходя из заданного вида топлива и его состава, рассчитать теплоту сгорания Q_i^r (Q_i^d) и располагаемую теплоту топлива Q_p (уголь, мазут, газ).
2. Рассчитать теоретический объем воздуха V_e^o , необходимого для полного сгорания топлива, и теоретический объем продуктов сгорания V_2^o .
3. Выбрать оптимальное (для данного вида топлива) значение коэффициента избытка воздуха α и рассчитать действительные объемы воздуха V_e 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 теоретическую, адиабатическую и действительную температуру газов на выходе из камеры сгорания $\vartheta_{ксг}$.

Исходные данные для расчета

Вид и состав расчетного топлива (табл. 2.1-2.3);

α – коэффициент избытка воздуха;

q_3, q_4, q_5, q_6 – потери теплоты в камере сгорания (%) – принимаются в соответствии с рекомендациями, приведенными ниже.

Схема процесса горения топлива представлена на рис. 2.1.

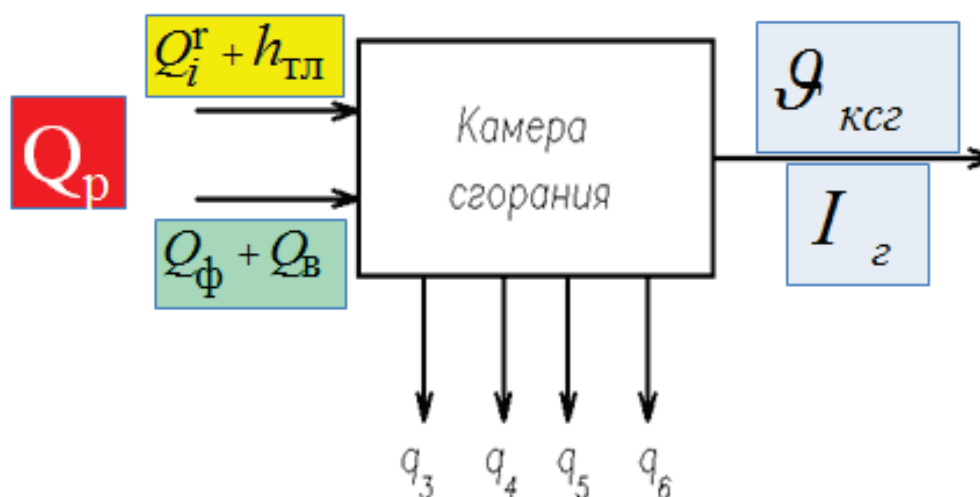


Рисунок 2.1 – Расчетная схема камеры сгорания

Методика расчета и рекомендации

1. Теплота сгорания *твердого* 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/м³) рассчитывается с учетом объемных долей и теплоты сгорания отдельных компонентов [1].

Располагаемая теплота *газового* топлива принимается равной низшей теплоте сгорания сухого газа $Q_p = Q_i^d$, а для *твердого* и *жидкого* топлива учитывается физическая теплота топлива $h_{мл}$, которая зависит от температуры и теплоемкости поступающего на горение топлива:

$$h_{мл} = c_{мл} \cdot t_{мл},$$

где $c_{мл}$ – удельная теплоемкость топлива, кДж/(кг·°C);

$t_{мл}$ – температура топлива, °C.

Температура *твердого* топлива (для летнего периода) принимается $t_{мл} = 20$ °C, а теплоемкость топлива определяется по формуле:

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

Теплоемкость сухой массы топлива $c_{тл}^d$ принимается по среднестатистическим данным, кДж/(кг·°C):

- 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 расчетах $t_{мл} = 90 \div 140$ °C.

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

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

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

где G_ϕ – удельный расход пара, кг пара/кг мазута;

h_ϕ – 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 h_ϕ , поступающего на распыл мазута, определяется из соответствующих справочников или таблиц по давлению $P_n = 0,3 \div 0,6$ МПа и температуре $t_n = 280 \div 350$ °C. При отсутствии справочных данных можно принять $h_\phi = 3000 \div 3200$ кДж/кг.

Тепло, вносимое с воздухом, кДж/кг (кДж/м³):

$$Q_e = \alpha \cdot V_e^o \cdot c_e \cdot t_e,$$

где c_e – теплоемкость воздуха при температуре t_e .

Потери теплоты с химическим и механическим недожогом q_3 и q_4 , а также оптимальное значение коэффициента избытка воздуха в камере сгорания α выбираются, в зависимости от вида сжигаемого топлива, по табл. 2.4.

Потери теплоты в окружающую среду q_5 принимаются произвольно в диапазоне от 0,5 до 1 %.

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. Расчет потерь с физической теплотой шлаков ведется по формуле:

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

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

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

2. Теоретические объемы воздуха V_6^o (м³/кг) и продуктов сгорания твердого и жидкого топлива $V_{RO_2}^o$, $V_{N_2}^o$, $V_{H_2O}^o$, V_z^o (м³/кг) определяются, исходя из состава топлива (табл. 2.1-2.2), на основе материального баланса процесса горения [2].

Теоретические объемы воздуха V_6^o (м³/м³) и продуктов сгорания газообразного топлива $V_{RO_2}^o$, $V_{N_2}^o$, $V_{H_2O}^o$, V_z^o (м³/м³) определяются, исходя из состава топлива (табл. 2.3), на основе материального баланса процесса горения [2].

3. Действительные объемы воздуха V_6 (м³/кг; м³/м³) и продуктов сгорания топлива V_{RO_2} , V_{R_2} , V_{H_2O} , V_z (м³/м³) рассчитываются с учетом выбранного коэффициента избытка воздуха (табл. 2.4) [2].

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

$$Q_p \cdot \frac{100 - \sum q_i^{\text{кcg}}}{100} = I_{\text{кcg}}, \quad (2.1)$$

где $Q_p = Q_i^r + h_{\text{мл}} + Q_{\text{ф}} + Q_6$ – располагаемая теплота, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \left(\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \right)$;

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

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

Энтальпии теоретических объемов воздуха и продуктов сгорания при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1$ для всех видов топлива (кДж/кг, кДж/м³):

$$I_6^o = V_B^o (\text{сг})_B;$$

$$I_z^o = V_{RO_2} (\text{сг})_{RO_2} + V_{H_2O}^o (\text{сг})_{H_2O} + V_{N_2}^o (\text{сг})_{N_2}.$$

В приведенных формулах: $(\text{сг})_B$, $(\text{сг})_{RO_2}$, $(\text{сг})_{H_2O}$, $(\text{сг})_{N_2}$ – энтальпии 1 м³, соответственно, воздуха, трехатомных газов, водяных паров и азота.

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

$$I_{\text{кcg}} = I_z^o + (\alpha - 1) \cdot I_6^o = V_{RO_2} (\text{сг})_{RO_2} + V_{H_2O}^o (\text{сг})_{H_2O} + V_{N_2}^o (\text{сг})_{N_2} + (\alpha - 1) V_B^o (\text{сг})_B.$$

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

$$I_{\text{КСГ}} = V_{\text{RO}_2} (c\mathcal{G})_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} (c\mathcal{G})_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} (c\mathcal{G})_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} (c\mathcal{G})_{\text{O}_2} = \\ = (V_{\text{RO}_2} c_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} c_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} c_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} c_{\text{O}_2}) \cdot \mathcal{G}_{\text{КСГ}} = \mathcal{G}_{\text{КСГ}} \cdot \sum V_z c_z ,$$

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

Таким образом, уравнение теплового баланса (3.1) преобразуется следующим образом:

$$Q_p \cdot \frac{100 - \sum q_i^{\text{КСГ}}}{100} = \mathcal{G}_{\text{КСГ}} \cdot \sum V_z c_z . \quad (2.2)$$

Решение уравнения теплового баланса (2.2) относительно температуры в камере сгорания $\mathcal{G}_{\text{КСГ}}$ в явном виде не имеет решения, поскольку входящие в это уравнение теплоемкости продуктов сгорания сами являются функцией температуры $\mathcal{G}_{\text{КСГ}}$.

Определить $\mathcal{G}_{\text{КСГ}}$ можно, используя метод *последовательных приближений*, или *графоаналитический* метод (рис. 2.2).

Из уравнения теплового баланса температура на выходе из камеры сгорания:

$$\mathcal{G}_{\text{КСГ}} = Q_p \cdot \frac{100 - \sum q_i^{\text{КСГ}}}{100} \cdot \frac{1}{\sum V_z c_z} , \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Запишем эту зависимость в виде двух функций:

$$\begin{cases} y_1 = \mathcal{G}_{\text{КСГ}} \\ y_2 = Q_p \cdot \frac{100 - \sum q_i^{\text{КСГ}}}{100} \cdot \frac{1}{\sum V_z c_z} . \end{cases}$$

Решение задачи относительно $\mathcal{G}_{\text{КСГ}}$ сводится к нахождению условий, при которых $y_1 = y_2$. Значение y_1 и y_2 рассчитываются не менее чем по трем значениям $\mathcal{G}_{\text{КСГ}}$, близким к ожидаемому. Пересечение прямой y_1 и расчетной кривой y_2 дает искомую температуру на выходе из камеры сгорания $\mathcal{G}_{\text{КСГ}}$.

Средние теплоемкости воздуха и продуктов сгорания, в зависимости от температуры, приведены в табл. 2.5, при этом принимается $c_{\text{RO}_2} = c_{\text{CO}_2}$.

Рассмотрим пример, проиллюстрированный на рис. 2.2.

Исходные (расчетные) данные:

- располагаемое тепло топлива $Q_p = 19800$ кДж/кг,
- суммарные потери в камере сгорания $\sum q_i^{\text{КСГ}} = 1,2\%$,
- объемы продуктов сгорания: трехатомные газы $V_{\text{RO}_2} = 0,95$ м³/кг, водяные пары $V_{\text{H}_2\text{O}} = 1,207$ м³/кг, азот $V_{\text{N}_2} = 4,51$ м³/кг, кислород $V_{\text{O}_2} = 0,11$ м³/кг.

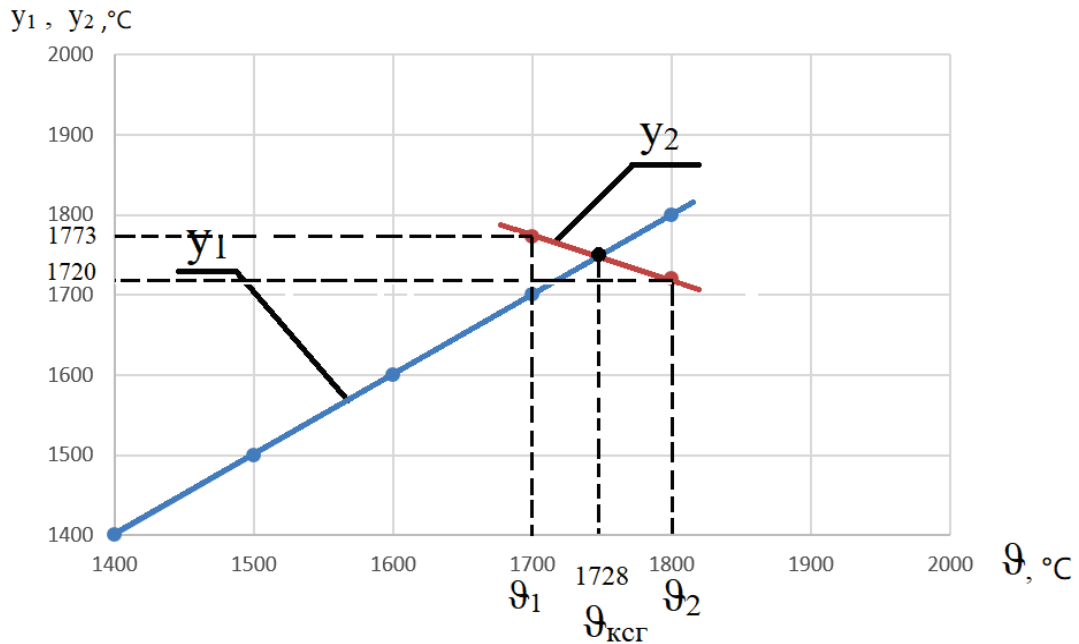


Рисунок 2.2 – Графоаналитический метод определения температуры в камере сгорания

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

Из табл. 2.2 находим теплоемкости газов при данной температуре и рассчитываем $y_2 = 1773 \text{ }^\circ\text{C}$.

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

Принимаем ближайшее табличное значение температуры, превышающее $1773 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow \vartheta_{КСГ} = y_1 = 1800 \text{ }^\circ\text{C}$.

Из табл. 2.5 находим теплоемкости газов при данной температуре и определяем $y_2 = 1720 \text{ }^\circ\text{C}$.

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

На пересечении прямых находится примерное значение температуры в камере сгорания 1728 °С (см. рис. 2.2).

Примечание: если расчетная температура y_2 меньше принятой y_1 (например, 1666 °С), то целесообразно принять ближайшее меньшее табличное значение температуры (например, 1600 °С).

Для уточнения путем линейной интерполяции определяются теплоемкости газов при температуре 1728 °С и рассчитывается уточненное значение *действительной* температуры.

Теплоемкость дымовых газов, кДж/(м³·°С)

| | CO ₂ | N ₂ | O ₂ | H ₂ 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 |

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

Адиабатическая температура в камере сгорания рассчитывается аналогично при условии отсутствия теплообмена с окружающей средой (в нашем случае – при условии $q_5 = 0$), а *теоретическая* (максимально возможная) – при условии полного сгорания и отсутствия теплообмена с окружающей средой, т.е. когда $\sum q = 0$.

В рамках курсовой работы определяется температура горения для трех видов топлива: уголь, мазут, газ.

Исходные данные (состав топлива) приведены в соответствующих таблицах.

ЧАСТЬ 3. РАСЧЕТ ГАЗОВОЙ ГОРЕЛКИ

Точный расчет газовых горелок представляет собой задачу неоправданной сложности, поэтому практикой разработаны различные методы приближенного расчета, 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. 3.1а) или с периферии (рис. 3.1б).

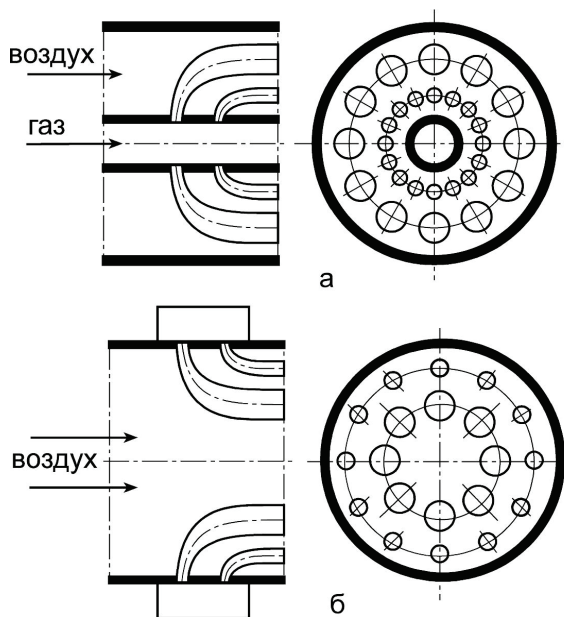


Рисунок 3.1 – Схемы подачи газа в поперечный поток воздуха:
а – по центру, б – с периферии

Струи газа по мере проникновения в поток воздуха будут сноситься этим потоком. При достижении определенного 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**, причем первый (по ходу воздуха) ряд сопел имеет **бóльший диаметр**, чем второй.

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

$$\frac{h}{d_c} = K_s \frac{W_z}{W_в} \sqrt{\frac{\rho_z}{\rho_в}}, \quad (3.1)$$

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

На рисунке 3.2 представлен примерный характер геометрии струй газа, истекающих в поперечный поток воздуха.

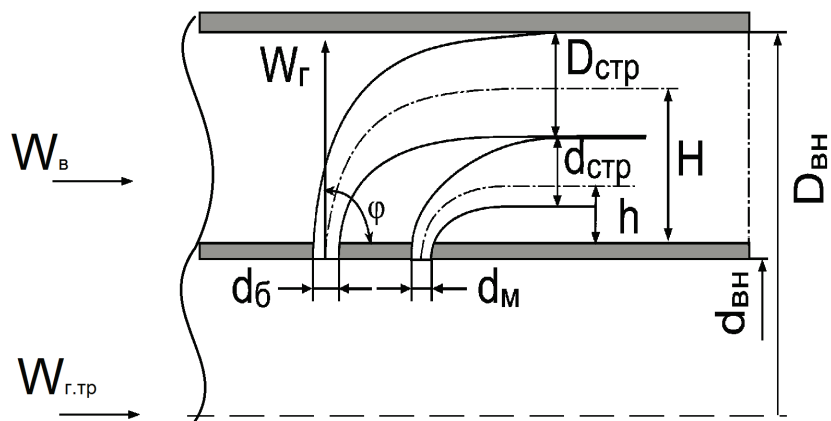


Рисунок 3.2 – Схема распространения струй газа в поперечном потоке воздуха

Под действием воздушного потока траектория струи искривляется, и сама струя становится шире за счет диффузионного размытия. В том сечении, где ось струи газа принимает направление потока воздуха, ее условный диаметр, согласно опытным данным, составляет:

$$d_{стр} = 0,75h. \quad (3.2)$$

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

При расчете газовых горелок для определения глубины проникновения струи по формуле (3.1) приходится предварительно задаваться значениями скоростей газа и воздуха, а также исходить из полученных опытным путем рекомендаций.

Методика расчета газовой горелки

Принципиальная схема горелки типа «труба в трубе» представлена на рисунке 3.3.

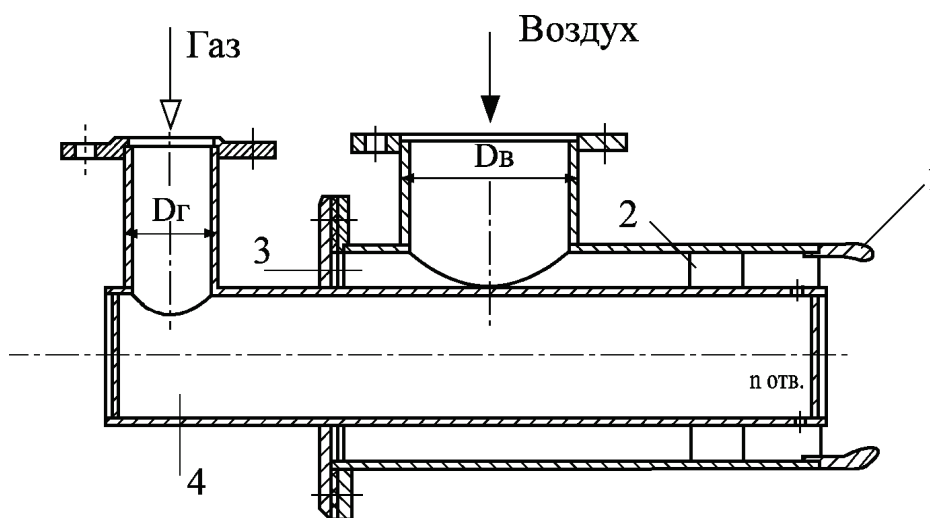


Рисунок 3.3 – Коаксиальная горелка типа «труба в трубе»:
 1 – огневой насадок с пережимом, 2 – лопатки, 3 – воздушная камера,
 4 – газовый коллектор

Исходные данные для расчета

Состав газа по объему – см. таблицу 2.3.

Исходные данные приведены в таблице 3.1:

Мощность горелки, N , Гкал/час.

Коэффициент избытка воздуха, α .

Скорость воздуха, W_B , м/с.

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

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

Температура воздуха, t_B , °С.

Температура газа, t_G , °С.

Порядок расчета

1. Согласно материальному балансу процесса горения газа, определяется объем воздуха, теоретически необходимого для сжигания газа V^o , м³/м³ [2].

2. Действительный объем воздуха V определяется с учетом коэффициента избытка воздуха [2].

3. Теплота сгорания газа Q_i^d рассчитывается в соответствии с его составом по формуле, приведенной в [1].

4. Объемный расход газа G_2^o , м³/с, определяется исходя из мощности горелки

$$N = Q_i^d \cdot G_2^o,$$

где N – мощность горелки, МВт,

Q_i^d – теплота сгорания газа, МДж/м³.

5. Действительный объемный расход газа (при заданной температуре газа), G_2 , м³/с

$$G_2 = G_2^o \cdot \frac{t_2 + 273}{273}.$$

6. Действительный объемный расход воздуха (при заданной температуре воздуха), G_B , м³/с

$$G_B = V \cdot G_2^o \cdot \frac{t_B + 273}{273}.$$

7. Из уравнения расхода газа определяется внутренний диаметр газоподводящей трубы (газового коллектора) (рис. 3.2) $d_{вн}$:

$$G_2 = \frac{\pi d_{вн}^2}{4} \cdot W_{г.тр},$$

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

8. Наружный диаметр газового коллектора

$$d_n = d_{вн} + 2\delta_{ст},$$

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

9. Из уравнения расхода воздуха:

$$G_6 = \frac{\pi}{4} (D_{вн}^2 - d_n^2) \cdot W_6$$

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

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

При расчете 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 (3.2):

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

Из схемы распространения струй в кольцевом канале (рис. 3.2) следует, что глубина проникновения

больших струй

$$H + \frac{D_{стр}}{2} = \frac{D_{вн} - d_n}{2} \rightarrow H + 0,375H = \frac{D_{вн} - d_n}{2} \rightarrow H = \frac{D_{вн} - d_n}{2,75} ,$$

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

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

11. По формуле (3.1) определяются диаметры *больших* $d_б$ и *малых сопел* $d_м$ (при этом принимается $K_s=1,6$).

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

суммарная площадь больших и малых сопел

$$\sum f_б = 0,8 \frac{G_2}{W_2} , \quad \sum f_м = 0,2 \frac{G_2}{W_2} ;$$

количество больших и малых сопел

$$n_б = \frac{4 \sum f_б}{\pi d_б^2} , \quad n_м = \frac{4 \sum f_м}{\pi d_м^2} ;$$

шаг установки больших и малых сопел

$$S_б = \frac{\pi d_n}{n_б} , \quad S_м = \frac{\pi d_n}{n_м} .$$

Количество больших и малых сопел принимается кратным 4.

13. Определить расход условного топлива (без учета потерь) [1].

Рекомендации:

Необходимо перевести теплоту сгорания газа с МДж/м³ на МДж/кг, предварительно рассчитав плотность газа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоусов, В. Н. Топливо и процессы горения в теплоэнергетических установках. В 3 ч. Ч. 1.: учебное пособие / В. Н. Белоусов, С. Н. Смородин, В. Д. Цимбал. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2020. – 147 с. – ISBN 978-5-91646-211-1. – Текст: непосредственный.

2. Белоусов, В. Н. Топливо и процессы горения в теплоэнергетических установках. В 3 ч. Ч. 2.: учебное пособие / В. Н. Белоусов, С. Н. Смородин, В. Д. Цимбал. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2020. – 151 с. – ISBN 978-5-91646-238-8. – Текст: непосредственный.

3. Белоусов, В. Н. Топливо и процессы горения в теплоэнергетических установках. В 3 ч. Ч. 3.: учебное пособие / В. Н. Белоусов, С. Н. Смородин, В. Д. Цимбал. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2020. – 154 с. – ISBN 978-5-91646-211-6. – Текст: непосредственный.

4. Белоусов, В. Н. Топливо и теория горения: учебное пособие / В. Н. Белоусов, В. В. Сергеев. – СПб.: изд-во Политехн. ун-та, 2014. – 231 с.

5. Белоусов, В. Н., Основы сжигания газа: учебное пособие / В. Н. Белоусов, С. Н. Смородин, О. С. Смирнова. – СПб.: СПбГТУРП, 2009. – 70 с.: ил. 15.

6. Тепловой и аэродинамический расчеты котельных установок : учебное пособие / С. Н. Смородин, А. Н. Иванов, В. Н. Белоусов, В. Ю. Лакомкин. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2018. – 200 с. – ISBN 978-5-91646-150-3. – Текст: непосредственный.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1.1

Состав рабочей массы твердого топлива, %

| № | W ^r | A ^r | S ^r | C ^r | H ^r | N ^r | O ^r |
|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 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 |

Таблица 2.1

Состав рабочей массы твердого топлива, %

| № | Бассейн (Месторождение) | Марка | W ^r | A ^r | S ^r | C ^r | H ^r | N ^r | O ^r |
|----|-------------------------------------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | Канско-Ачинский (Итатское) | 1Б | 40,5 | 6,8 | 0,4 | 36,6 | 2,6 | 0,4 | 13,8 |
| 2 | Кузнецкий (Кузбасс) | Д | 11,5 | 15,9 | 0,4 | 56,4 | 4,0 | 1,9 | 9,9 |
| 3 | Печорский (Воркутинское) | Ж | 8,0 | 29,4 | 1,0 | 52,6 | 3,3 | 1,5 | 4,2 |
| 4 | Канско-Ачинский (Ирша-Бородинское) | 2Б | 33,0 | 7,9 | 0,2 | 42,6 | 3,0 | 0,6 | 13,2 |
| 5 | Канско-Ачинский (Гусиноозерское) | 3Б | 26,0 | 18,5 | 0,4 | 39,4 | 2,8 | 0,6 | 12,3 |
| 6 | Якутия (Галимовское) | А | 10,0 | 20,7 | 0,6 | 63,7 | 1,6 | 0,8 | 2,6 |
| 7 | Якутия (Аркагалинское) | Д | 17,0 | 17,4 | 0,3 | 48,9 | 3,3 | 0,7 | 12,4 |
| 8 | Кузнецкий (Кузбасс) | СС | 9,0 | 18,2 | 0,4 | 60,8 | 3,6 | 1,5 | 6,5 |
| 9 | Якутия (Харанга) | Т | 12,0 | 13,2 | 0,4 | 67,5 | 3,4 | 1,0 | 2,5 |
| 10 | Канско-Ачинский (Каахемское) | Г | 5,0 | 14,3 | 0,4 | 65,0 | 4,8 | 1,0 | 9,5 |
| 11 | Канско-Ачинский (Азейское) | 3Б | 25,0 | 16,5 | 0,5 | 42,7 | 3,1 | 0,9 | 11,3 |
| 12 | Кузнецкий (Кузбасс) | К | 8,5 | 33,9 | 0,3 | 49,5 | 2,8 | 1,4 | 3,6 |
| 13 | Кузнецкий (Кузбасс) | Д | 18,0 | 17,2 | 0,4 | 48,3 | 3,2 | 1,4 | 11,5 |
| 14 | Партизанский (Дальний Восток) | Т | 5,0 | 28,5 | 0,5 | 58,8 | 2,7 | 0,7 | 3,8 |
| 15 | Якутия (Нерюнгинское) | СС | 10,0 | 19,8 | 0,2 | 60,0 | 3,1 | 0,6 | 6,3 |
| 16 | Партизанский (Дальний Восток) | Ж | 5,5 | 32,1 | 0,4 | 52,7 | 3,2 | 0,7 | 5,4 |
| 17 | Кузнецкий (Кузбасс) | СС | 8,5 | 16,5 | 0,4 | 60,8 | 3,6 | 1,5 | 6,5 |
| 18 | Кузнецкий (Кузбасс) | Д | 15,0 | 17,0 | 0,4 | 53,4 | 3,5 | 1,6 | 9,1 |
| 19 | Донецкий (Украина) | А | 8,5 | 34,8 | 1,5 | 52,2 | 1,0 | 0,5 | 1,5 |
| 20 | Канско-Ачинский (Назаровское) | 2Б | 39,0 | 7,9 | 0,4 | 37,2 | 2,5 | 0,5 | 12,5 |
| 21 | Кузнецкий (Кузбасс) | Г | 8,5 | 16,9 | 0,4 | 60,1 | 4,2 | 2,0 | 7,9 |
| 22 | Кизеловский (Урал) | Ж | 6,0 | 32,0 | 5,3 | 48,6 | 3,5 | 0,6 | 4,0 |
| 23 | Южно-уральский бассейн (Бабаевское) | 1Б | 56,0 | 10,1 | 0,9 | 23,2 | 2,1 | 0,2 | 7,5 |
| 24 | Якутия (Нерюнгринское) | К | 8,0 | 25,8 | 0,3 | 57,6 | 3,1 | 0,5 | 4,7 |
| 25 | Кузнецкий (Кузбасс) | Т | 7,0 | 14,6 | 0,5 | 70,2 | 3,0 | 1,7 | 3,0 |

| | | | | | | | | | |
|----|--|----|------|------|-----|------|-----|-----|------|
| 26 | Канско-Ачинский (Мугунское) | ЗБ | 22,0 | 15,6 | 0,9 | 46,0 | 3,6 | 0,9 | 11,0 |
| 27 | Кузнецкий (Кузбасс) | А | 10,0 | 16,2 | 0,4 | 68,8 | 1,5 | 0,8 | 2,3 |
| 28 | Канско-Ачинский (Березовское) | 2Б | 33,0 | 4,7 | 0,2 | 44,2 | 3,1 | 0,4 | 14,4 |
| 29 | Кузнецкий (Кузбасс) | Т | 9,7 | 20,3 | 0,3 | 61,4 | 2,1 | 1,5 | 4,7 |
| 30 | Канско-Ачинский (Черемховское и Забитуйское) | Д | 15,0 | 29,8 | 0,9 | 42,5 | 3,1 | 0,6 | 8,1 |

Таблица 2.2

Состав мазута

| Состав рабочей массы топлива, % | |
|--|----------------------|
| Углерод, C ^r | из расчета |
| Водород, H ^r | $10 + 0,1 \cdot n$ |
| Сера, S ^r | $0,5 + 0,2 \cdot m$ |
| Азот + Кислород, N ^r + O ^r | $0,2 + 0,05 \cdot m$ |
| Зольность, A ^r | от 0,03 до 0,06 |
| Влажность, W ^r | $0,15 + 0,1 \cdot n$ |

Здесь: m – первая цифра зачетки, n – последняя цифра зачетки.

Таблица 2.3

Состав газообразного топлива

| № | Состав газа, об.% | | | | | |
|----|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------|-----------------|
| | CH ₄ | C ₂ H ₆ | C ₃ H ₈ | C ₄ H ₁₀ | N ₂ | CO ₂ |
| 1 | 84,5 | 3,8 | 1,9 | 1,2 | 7,8 | 0,8 |
| 2 | 90,4 | 3,6 | 2,6 | 1,1 | 2,2 | 0,1 |
| 3 | 91,9 | 2,1 | 1,3 | 0,5 | 3 | 1,2 |
| 4 | 93,8 | 2,0 | 0,8 | 0,4 | 2,6 | 0,4 |
| 5 | 92,8 | 2,8 | 0,9 | 0,5 | 2,5 | 0,5 |
| 6 | 91,2 | 3,9 | 1,2 | 0,6 | 2,6 | 0,5 |
| 7 | 89,7 | 5,2 | 1,7 | 0,6 | 2,7 | 0,1 |
| 8 | 85,8 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 13,7 | 0,1 |
| 9 | 98,9 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 0,4 | 0,2 |
| 10 | 95,6 | 0,7 | 0,4 | 0,4 | 2,8 | 0,1 |
| 11 | 98,5 | 0,2 | 0,1 | 0,0 | 1,0 | 0,2 |
| 12 | 92,8 | 3,9 | 1,1 | 0,5 | 1,6 | 0,1 |
| 13 | 92,8 | 3,9 | 1,0 | 0,7 | 1,5 | 0,1 |
| 14 | 94,1 | 3,1 | 0,6 | 1,0 | 1,2 | 0,0 |
| 15 | 81,7 | 5,3 | 2,9 | 1,2 | 8,8 | 0,1 |
| 16 | 97,1 | 0,3 | 0,1 | 0,0 | 2,4 | 0,1 |
| 17 | 95,4 | 2,6 | 0,3 | 0,4 | 1,1 | 0,2 |
| 18 | 85,9 | 6,1 | 1,5 | 1,4 | 5,0 | 0,1 |
| 19 | 95,5 | 2,7 | 0,4 | 0,3 | 1,0 | 0,1 |
| 20 | 94,0 | 2,8 | 0,4 | 0,4 | 2,0 | 0,4 |
| 21 | 98,2 | 0,4 | 0,1 | 0,1 | 1,0 | 0,2 |
| 22 | 68,5 | 14,5 | 7,6 | 4,5 | 3,5 | 1,4 |
| 23 | 96,1 | 0,7 | 0,1 | 0,1 | 2,8 | 0,2 |
| 24 | 93,2 | 1,9 | 0,8 | 0,4 | 3,0 | 0,7 |
| 25 | 81,5 | 8,0 | 4,0 | 2,8 | 3,2 | 0,5 |
| 26 | 93,9 | 3,1 | 1,1 | 0,4 | 1,3 | 0,2 |
| 27 | 94,9 | 3,2 | 0,4 | 0,2 | 0,9 | 0,4 |
| 28 | 91,9 | 2,4 | 1,1 | 0,9 | 3,2 | 0,5 |
| 29 | 93,2 | 2,6 | 1,2 | 0,7 | 2,0 | 0,3 |
| 30 | 93,8 | 3,6 | 0,7 | 0,6 | 0,7 | 0,6 |

Таблица 2.4

Расчетные характеристики камеры сгорания

| Топливо | Коэффициент избытка воздуха на выходе из камеры сгорания, α | Потери теплоты с химическим недожогом, q_3 , % | Потери теплоты с механическим недожогом, q_4 , % |
|----------------|--|--|--|
| Антрацит | 1,2 – 1,25 | 0,5 – 1 | 3 – 6 |
| 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 |
| Мазут | 1,05 – 1,1 | 0,5 | 0 |
| Природный газ | 1,05 – 1,1 | 0,5 | 0 |

Таблица 2.5

Теплоемкости газов и воздуха

| t, °C | C_{CO_2} | C_{N_2} | C_{O_2} | C_{H_2O} |
|-------|--------------------------|-----------|-----------|------------|
| | кДж/(м ³ ·°C) | | | |
| 0 | 1.601 | 1.295 | 1.307 | 1.495 |
| 100 | 1.702 | 1.297 | 1.319 | 1.506 |
| 200 | 1.789 | 1.301 | 1.336 | 1.523 |
| 300 | 1.864 | 1.308 | 1.357 | 1.544 |
| 400 | 1.931 | 1.317 | 1.378 | 1.567 |
| 500 | 1.990 | 1.329 | 1.399 | 1.590 |
| 600 | 2.042 | 1.341 | 1.418 | 1.616 |
| 700 | 2.09 | 1.355 | 1.435 | 1.642 |
| 800 | 2.133 | 1.368 | 1.451 | 1.669 |
| 900 | 2.170 | 1.380 | 1.466 | 1.697 |
| 1000 | 2.205 | 1.393 | 1.479 | 1.724 |
| 1100 | 2.237 | 1.404 | 1.490 | 1.751 |
| 1200 | 2.265 | 1.415 | 1.502 | 1.778 |
| 1300 | 2.291 | 1.426 | 1.512 | 1.804 |
| 1400 | 2.315 | 1.436 | 1.521 | 1.829 |
| 1500 | 2.337 | 1.445 | 1.530 | 1.854 |
| 1600 | 2.357 | 1.454 | 1.539 | 1.877 |
| 1700 | 2.376 | 1.462 | 1.547 | 1.901 |
| 1800 | 2.393 | 1.470 | 1.555 | 1.923 |
| 1900 | 2.409 | 1.477 | 1.563 | 1.944 |
| 2000 | 2.424 | 1.484 | 1.570 | 1.964 |
| 2100 | 2.438 | 1.490 | 1.577 | 1.984 |
| 2200 | 2.450 | 1.496 | 1.584 | 2.002 |
| 2300 | 2.462 | 1.502 | 1.591 | 2.020 |

Таблица 3.1

Данные для расчета газовой горелки типа «труба в трубе»

| № | N | α | W_B | W_T | t_B | t_T | $W_{г.тр}$ |
|----|-----|----------|-------|-------|-------|-------|------------|
| | МВт | - | м/с | м/с | °С | °С | м/с |
| 1 | 5 | 1,05 | 25 | 110 | 30 | 10 | 20 |
| 2 | 10 | 1,06 | 25 | 120 | 30 | 10 | 20 |
| 3 | 15 | 1,07 | 25 | 130 | 30 | 10 | 20 |
| 4 | 20 | 1,08 | 25 | 140 | 30 | 10 | 20 |
| 5 | 25 | 1,09 | 25 | 150 | 30 | 10 | 20 |
| 6 | 30 | 1,10 | 20 | 140 | 30 | 10 | 15 |
| 7 | 25 | 1,09 | 20 | 130 | 30 | 10 | 15 |
| 8 | 20 | 1,08 | 20 | 120 | 30 | 10 | 15 |
| 9 | 15 | 1,07 | 20 | 110 | 30 | 10 | 15 |
| 10 | 10 | 1,06 | 20 | 100 | 30 | 10 | 15 |
| 11 | 5 | 1,05 | 25 | 110 | 30 | 10 | 20 |
| 12 | 10 | 1,06 | 25 | 120 | 30 | 10 | 20 |
| 13 | 15 | 1,07 | 25 | 130 | 30 | 10 | 20 |
| 14 | 20 | 1,08 | 25 | 140 | 30 | 10 | 20 |
| 15 | 25 | 1,09 | 25 | 150 | 30 | 10 | 20 |
| 16 | 30 | 1,10 | 20 | 140 | 30 | 10 | 15 |
| 17 | 25 | 1,09 | 20 | 130 | 30 | 10 | 15 |
| 18 | 20 | 1,08 | 20 | 120 | 30 | 10 | 15 |
| 19 | 15 | 1,07 | 20 | 110 | 30 | 10 | 15 |
| 20 | 10 | 1,06 | 20 | 100 | 30 | 10 | 15 |
| 21 | 5 | 1,05 | 25 | 110 | 30 | 10 | 20 |
| 22 | 10 | 1,06 | 25 | 120 | 30 | 10 | 20 |
| 23 | 15 | 1,07 | 25 | 130 | 30 | 10 | 20 |
| 24 | 20 | 1,08 | 25 | 140 | 30 | 10 | 20 |
| 25 | 25 | 1,09 | 25 | 150 | 30 | 10 | 20 |
| 26 | 30 | 1,10 | 20 | 140 | 30 | 10 | 15 |
| 27 | 25 | 1,09 | 20 | 130 | 30 | 10 | 15 |
| 28 | 20 | 1,08 | 20 | 120 | 30 | 10 | 15 |
| 29 | 15 | 1,07 | 20 | 110 | 30 | 10 | 15 |
| 30 | 10 | 1,06 | 20 | 100 | 30 | 10 | 15 |