

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

**ТОПЛИВО И ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
СИСТЕМАХ**

Практикум

для студентов специальности
7-07-0712-02 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Витебск
2025

УДК 662.767: 697.3 (031)

Составители:

С. В. Жерносек, В. И. Столяренко

Одобрено кафедрой «Теплоэнергетика»
УО «ВГТУ», протокол № 8 от 22.05.2025.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом
УО «ВГТУ», протокол № 9 от 28.05.2025.

Топливо и процессы горения в теплоэнергетических системах :
практикум / сост. С. В. Жерносек, В. И. Столяренко. – Витебск : УО «ВГТУ»,
2025. – 25 с.

В настоящем практикуме представлены задачи по расчёту характеристик органического топлива и топочных процессов. Практикум содержит описание практических работ по дисциплине «Топливо и процессы горения в теплоэнергетических системах» в соответствии с учебной программой для студентов специальности 7-07-0712-02 «Теплоэнергетика и теплотехника».

УДК 662.767: 697.3 (031)

© УО «ВГТУ», 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Практическая работа 1. Основные характеристики топлива.....	5
Практическая работа 2. Теоретически необходимое количество воздуха	8
Практическая работа 3. Теоретическая температура горения.....	13
Практическая работа 4. Кинетика горения газовых смесей	17
Практическая работа 5. Горение твердого топлива.....	20
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	23

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания содержат описание и методику выполнения практических заданий по дисциплине «Топливо и процессы горения в теплоэнергетических системах» в соответствии с учебной программой для студентов специальности 7-07-0712-02 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Практические задания и расчеты обучающиеся должны выполнять самостоятельно под контролем преподавателя в соответствии с рабочим заданием и вариантом. Обучающиеся согласно имеющемуся у них плану проведения практических работ должны заранее подготовиться к предстоящему занятию. Заблаговременно до выполнения работы глубоко и основательно изучить теоретическую часть материала по учебной литературе и лекционным записям.

Отчёт должен содержать: название, цель работы, исходные данные, расчетные формулы с числовыми примерами, результаты расчетов, анализ полученных данных и вывод о проделанной работе. Особое внимание необходимо уделить заключению по результатам выполненной работы, в котором требуется сопоставить результаты полученных в ходе расчетов величин с известными, либо ранее полученными, значениями из теоретического курса и указать причины наблюдаемых отклонений.

Отчет о выполненной работе оформляется каждым студентом в отдельности и представляется в установленный преподавателем срок.

К снижению оценки могут приводить выявленные при проверке отчета ошибки и неточности, а также следующие факторы:

- сдача задания позже установленного срока;
- недостаточно активная работа по выполнению задания в аудитории;
- ненадлежащее оформление отчета;
- неверная аргументация или отсутствие вывода;
- плагиат.

Междисциплинарные связи. Кроме базовых знаний по физике, химии и математики, успешному усвоению материала способствует предварительное изучение дисциплин «Прикладная механика», «Механика жидкости и газа» и «Техническая термодинамика». Полученные знания, умения и навыки могут быть использованы студентами при изучении дисциплин «Котельные установки», «Промышленные и тепломассообменные процессы и установки», «Нагнетатели и тепловые двигатели».

В условиях задач в качестве переменного параметра задан номер варианта, который присваивают студенту перед выдачей задания.

Практическая работа 1

Основные характеристики топлива

Цель работы: Изучить методы расчета основных характеристик элементного состава твердого и жидкого топлива.

Краткие теоретические сведения [1, 2]

Элементный состав твердого и жидкого топлива.

Рабочее состояние – это состояние, в котором топливо поступает на сжигание:

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

Аналитическое состояние топлива – это состояние топлива, подготовленное для проведения анализа:

$$C^a + H^a + S^a + O^a + N^a + A^a + W^a = 100 \%. \quad (1.2)$$

Сухое состояние топлива – это состояние топлива без влаги:

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

Условное сухое беззольное состояние топлива (горючее) – без влаги и минеральных примесей:

$$C^r + H^r + S^r + O^r + N^r = 100 \%. \quad (1.4)$$

Органическое состояние топлива – без колчеданной серы:

$$C^o + H^o + S_{op}^o + O^o + N^o = 100 \%. \quad (1.5)$$

Таблица 1 – Коэффициенты пересчета из одного состояния в другое

Заданное состояние топлива	Искомое состояние топлива		
	Рабочее	Сухое	Условное сухое беззольное
Рабочее	1	$\frac{100}{100 - W^p}$	$\frac{100}{100 - W^p - A^p}$
Сухое	$\frac{100 - W^p}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^c}$
Условное сухое беззольное (горючее)	$\frac{100 - W^p - A^p}{100}$	$\frac{100 - A^c}{100}$	1

Теплота сгорания твердого и жидкого топлива, кДж/кг:

$$Q_n^p = 339C^p + 1030H^p - 109(O^p - S^p) - 25W^p. \quad (1.6)$$

Теплота сгорания газообразного топлива, МДж/м³:

$$Q_i^c = 0,01 \cdot [10,8H_2 + 12,65CO + 35,85CH_4 + 63,8C_2H_6 + 91,3C_3H_8 + \dots + 23,4H_2S]. \quad (1.7)$$

Изменение теплоты сгорания твердого топлива при изменении его влажности от W_1^p до W_2^p может быть рассчитано по выражению, кДж/кг:

$$Q_2^p = Q_1^p \frac{100 - W_2^p}{100 - W_1^p} - 25(W_2^p - W_1^p). \quad (1.8)$$

Тепловая мощность топочного устройства связана с расходом топлива и теплотой сгорания соотношением:

$$N = B \cdot Q_n^p \quad (1.9)$$

Задание: используя формулы (1.1–1.9), решите следующие задачи:

Задача 1.1

Определить состав топлива в рабочем состоянии, если в таблицах свойств топлив указан следующий состав: $C_1^p = 38,6 \%$; $H_1^p = 2,6 \%$; $S_1^p = 3,8 \%$; $N_1^p = 0,8 \%$; $O_1^p = 3,1 \%$; $W_1^p = 11 + N_0/2 \%$; A_1^p – остальное. А технический анализ показал, что действительная влажность топлива составляет $W_2^p = 16 + N_0/2 \%$. Определить состав топлива при действительной влажности и его теплоту сгорания.

Задача 1.2

Определить элементный состав топлива в рабочем состоянии, если задано условное сухое беззольное (горючее) состояние $C^r = 85 \%$; $H^r = 6 \%$; $S^r = 4 \%$; $O^r = 4 \%$; $N^r = 1 \%$, и известно, что влажность в рабочем состоянии составляет $W^p = 18,6 + N_0/2 \%$, а зольность в сухом состоянии топлива $A^c = 10 + N_0/2 \%$. Определить теплоту сгорания топлива.

Задача 1.3

Теплота сгорания топлива $Q_1^p = 10 + N_0/2$ МДж/кг при влажности $W_1^p = 10 - N_0/5 \%$. Определить теплоту сгорания при влажности $W_2^p = 20 - N_0/5 \%$.

Задача 1.4

Задан состав топлива: $C^c = 50 + N_0/2 \%$; $H^c = N_0/5 \%$; $S^c = 1 + N_0/20 \%$; $N^c = 1 \%$; $O^c = 5 + N_0/20 \%$; остальное – A^c ; $W^p = N_0 \%$. Определить низшую теплоту сгорания в рабочем состоянии.

Задача 1.5

Дан состав газообразного топлива: $\text{CH}_4 = 50 - N_2 \%$; $\text{CO} = 10 + N_2/2 \%$; $\text{H}_2 = 10 + N_2/2 \%$; остальное – N_2 . Определить теплоту сгорания.

Задача 1.6

Задан состав топлива в газообразном состоянии: $\text{CH}_4 = 50 + N_2 \%$; $\text{H}_2 = 25 - N_2/2 \%$; $\text{CO} = 25 - N_2/2 \%$. Определить тепловую мощность, если расход топлива равен $V = 3000 + N_2 \cdot 10 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Задача 1.7

Задан состав твердого топлива: $C^p = 40 \%$; $H^p = 2 \%$; $S^p = N^p = 1 \%$; $O^p = N_2/2 \%$; $A^p = 10 \%$; остальное – W^p – и состав жидкого топлива: $C^p = 90 \%$; $H^p = 6 \%$; $N^p = O^p = S^p = A^p = 1 \%$. Определить мощность топочного устройства, если известно, что расход твердого топлива составляет $V_t = 2000 + N_2 \cdot 50 \text{ кг/ч}$, а расход жидкого топлива $V_{\text{ж}} = N_2/30 \text{ кг/с}$.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятию рабочего состояния топлива.
2. Дайте определение понятию аналитического состояния топлива.
3. Дайте определение понятию сухое состояние топлива.
4. Дайте определение понятию условного сухого беззольного состояния топлива.
5. Дайте определение понятию органического состояния топлива.

Практическая работа 2

Теоретически необходимое количество воздуха

Цель работы: Изучить методы расчета теоретически необходимого количества воздуха, объема продуктов сгорания, энтальпии, коэффициента избытка воздуха.

Краткие теоретические сведения [3]

Теоретически необходимый объем воздуха для окисления 1 кг твердого или жидкого топлива, $\text{м}^3/\text{кг}$:

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

Теоретически необходимый объем воздуха для окисления 1 м^3 газообразного топлива, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V^o = 0,0476 \left(0,5H_2 + 5CO + 1,5H_2S + 2CH_4 + \Sigma \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right). \quad (2.2)$$

Теоретический объем продуктов сгорания, $\text{м}^3/\text{кг}$ ($\text{м}^3/\text{м}^3$):

$$V_r^o = V_{RO_2} + V_N^o + V_{H_2O}^o. \quad (2.3)$$

Теоретический объем сухих трехатомных газов при сжигании твердого и жидкого топлива, $\text{м}^3/\text{кг}$:

$$V_{RO_2} = 0,01866(C^p + 0,37S^p). \quad (2.4)$$

Теоретический объем сухих трехатомных газов при сжигании газообразного топлива, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V_{RO_2} = 0,01(CO + CO_2 + H_2S + CH_4 + \Sigma m C_m H_n + SO_2). \quad (2.5)$$

Теоретический объем азота при сжигании твердого и жидкого топлива, $\text{м}^3/\text{кг}$:

$$V_{N_2}^o = 0,79V^o + 0,008N^p. \quad (2.6)$$

Теоретический объем азота при сжигании газообразного топлива, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V_{N_2}^o = 0,79V^o + 0,01N_2. \quad (2.7)$$

Теоретический объем водяных паров при сжигании твердого и жидкого топлива, м³/кг:

$$V_{H_2O}^o = 0,111H^p + 0,0124W^p + 0,0161V^o + 1,24G_\phi, \quad (2.8)$$

где G_ϕ – удельный расход пара на распыл мазута, кг/кг.

Теоретический объем водяных паров при сжигании газообразного топлива, м³/м³:

$$V_{H_2O}^o = 0,01 \left[H_2 + H_2S + 2CH_4 + \sum \frac{n}{2} c_m H_n + H_2O \right]. \quad (2.9)$$

Действительный объем продуктов сгорания, м³/кг (м³/м³):

$$V_r = V_r^o + 1,0161(\alpha - 1)V^o. \quad (2.10)$$

Объем сухих газов, м³/кг (м³/м³):

$$V_{cr} = V_{RO_2} + V_N^o + (\alpha - 1)V^o. \quad (2.11)$$

Объемная доля какого-либо компонента в сухих продуктах сгорания:

$$r_i = \frac{V_i}{V_{cz}}. \quad (2.12)$$

Массовый выброс какого-либо компонента, например, диоксида серы, кг/ч:

$$M_{so_2} = BV_{cz} r_{so_2} \rho_{so_2} \quad (2.13)$$

Коэффициент избытка воздуха:
азотная формула:

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \frac{O_2 - 0,5(CO + H_2) - 2CH_4}{N_2}}; \quad (2.14)$$

кислородная формула:

$$\alpha = 21/(21 - O_2); \quad (2.15)$$

по содержанию сухих трехатомных газов в продуктах сгорания:

$$\alpha = \frac{RO_2^{\max}}{RO_2}, \quad (2.16)$$

где $RO_2^{\max} = \frac{21}{1+\beta},$

где $\beta = 2,35 \frac{H^p - O^p / 8}{C^p + 0,375S^p}.$

Энтальпия продуктов сгорания, кДж/кг (кДж/м³):

$$I_{\Gamma} = I_{\Gamma}^o + (\alpha - 1)I_{\text{в}}^o + I_{\text{зл}}. \quad (2.17)$$

Энтальпия теоретического количества продуктов сгорания, кДж/кг (кДж/м³):

$$I_{\Gamma}^o = V_{RO_2}(ct)_{RO_2} + V_{N_2}^o(ct)_{N_2} + V_{H_2O}^o(ct)_{H_2O}. \quad (2.18)$$

Энтальпия теоретически необходимого количества воздуха, кДж/кг, (кДж/м³):

$$I_{\text{в}}^o = V^o(ct)_o. \quad (2.19)$$

Энтальпия золы, кДж/кг (кДж/м³):

$$I_{\text{зл}} = a_{\text{ун}} \frac{A^p}{100}(ct)_{\text{зл}}, \quad (2.20)$$

где $a_{\text{ун}}$ – доля уносимой золы.

Задание: используя формулы (2.1–2.20), решите следующие задачи:

Задача 2.1

Задан состав топлива: $C^{\Gamma} = 60 + \text{№}/3 \%$; $H^{\Gamma} = 20 - \text{№}/3 \%$; $O^{\Gamma} = 18 \%$; $S^{\Gamma} = 1 \%$; $N^{\Gamma} = 1 \%$; $A^c = 25 + \text{№}/2 \%$; $W^p = 30 + \text{№}/2 \%$. Определить V_0 ; $Q_{\text{нр}}$ и отношение $Q_{\text{нр}}/V_0$.

Задача 2.2

Определить тепловую мощность топki и расход воздуха при совместном сжигании мазута и газа с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1,1$. Расход мазута $B_{\text{м}} = 8 + \text{№}/10$ кг/с, расход газа $B_{\text{г}} = 6 + \text{№}/10$ м³/с, состав мазута: $C^p = 80 + \text{№}/20 \%$; $H^p = 13 - \text{№}/20 \%$; $S^p = 2,9 \%$; $N^p = 0,3 \%$; $O^p = 0,1 \%$; $W^p = 3,4 \%$; $A^p = 0,3 \%$. Состав газа: $\text{CH}_4 = 70 + \text{№}/10 \%$; $\text{CO} = 3 \%$; $\text{C}_2\text{H}_6 = 1,9 \%$; N_2 – остальное.

Задача 2.3

Тепловая мощность котла 50 МВт; КПД = 85 %. В котле сжигают природный газ следующего состава: $\text{CH}_4 = 85 - \text{№}/5 \%$; $\text{CO}_2 = 3 + \text{№}/40 \%$; $\text{C}_2\text{H}_6 = 1 + \text{№}/40 \%$; N_2 – остальное. Как изменится расход воздуха, если с тем

же избытком воздуха $\alpha = 1,1$ и с тем же η сжигать доменный газ следующего состава: $\text{CO} = 25 + N/5 \%$; $\text{CO}_2 = 25 - N/5 \%$; $\text{N}_2 = 35 \%$; $\text{H}_2 = 10$; $\text{CH}_4 = 5 \%$

Задача 2.4

Рассчитать объемы и расход продуктов сгорания при сжигании твердого топлива следующего элементного состава: $\text{C}^p = 40 + N/2 \%$; $\text{H}^p = 2 + N/10 \%$; $\text{S}^p = 1 \%$; $\text{O}^p = 10 - N/10 \%$; $\text{N}^p = 1 \%$; $\text{W}^p = 28 - N/2 \%$; A^p – остальное. Определить энтальпию продуктов сгорания при $t = 1300^\circ\text{C}$ и избытке воздуха $\alpha = 1,2$. Расход топлива 4 т/ч; теплоемкость продуктов сгорания принять равной $c_r = 1,5 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K})$; энтальпией золы пренебречь.

Задача 2.5

Рассчитать объемы и расход продуктов сгорания при сжигании газообразного топлива с расходом $10000 \text{ м}^3/\text{ч}$ при избытке воздуха $\alpha = 1,4$. Состав топлива: $\text{CH}_4 = 42 + N/2 \%$; $\text{CO} = 32 - N/2 \%$; $\text{H}_2 = 10 \%$; $\text{H}_2\text{S} = 10 + N/10 \%$; остальное – N_2 . Определить энтальпию продуктов сгорания при $t_{yx} = 130^\circ\text{C}$. Теплоемкость продуктов сгорания принять равной $c_r = 1,4 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K})$.

Задача 2.6

Для условий задачи 2.5 определить концентрации газовых компонентов в сухих продуктах сгорания. Рассчитать часовой выброс оксидов серы.

Задача 2.7

Состав топлива: $\text{C}^r = 80 \%$; $\text{H}^r = 20 \%$; $\text{A}^p = N/2 \%$; $\text{W}^p = N \%$. Определить, во сколько раз теоретический объем продуктов сгорания больше объема теоретически необходимого количества воздуха.

Задача 2.8

Из результатов химического анализа известно, что содержание газов в продуктах сгорания составляет: $\text{O}_2 = 5 + N/30 \%$; $\text{CO} = 1 \%$; $\text{H}_2 = 2 \%$; $\text{CH}_4 = 1,75 \%$; $\text{CO}_2 = 15 + N/5 \%$. Определить коэффициент избытка воздуха.

Задача 2.9

После проведения химического анализа продуктов сгорания за топкой и конвективной шахтой котла получены следующие данные. За топкой: $\text{O}_{2\text{т}} = 4 + N/15 \%$; $\text{CO}_\text{т} = 1,5 \%$; $\text{H}_{2\text{т}} = 1 \%$; $\text{CO}_{2\text{т}} = 15 + N/5 \%$. За конвективной шахтой: $\text{O}_{2\text{к}} = 6 + N/15 \%$; $\text{CO}_\text{к} = 1 \%$; $\text{CO}_{2\text{к}} = 14 + N/5 \%$. Определить присос в конвективную шахту.

Задача 2.10

Определить максимально возможное содержание сухих трехатомных газов RO_2^{max} в продуктах сгорания угля следующего состава: $\text{C}^p = 43,4 + N/2 \%$; $\text{H}^p = 4 - N/15 \%$; $\text{O}^p = 7 \%$; $\text{N}^p = 0,8 \%$; $\text{S}^p = 0,3 \%$.

Рассчитать коэффициент избытка воздуха, если измеренная концентрация $RO_2 = 10 + N_2/15$ %.

Задача 2.11

Определить максимально возможное содержание сухих трехатомных газов $RO_2^{\max}$ в продуктах сгорания природного газа следующего состава: $CH_4 = 92 + N_2/30$ %; $C_2H_6 = 3,2$ %; $C_3H_8 = 0,4$ %; $C_4H_{10} = 0,1$ %; остальное – N_2 . Определить коэффициент избытка воздуха, если измеренная концентрация $RO_2 = 5 + N_2/15$ %.

Задача 2.12

Концентрация кислорода в исходной смеси метан – воздух составляет $O_2 = 16 + N_2/15$ %. Определить коэффициент избытка воздуха.

Контрольные вопросы

1. Как рассчитывается теоретически необходимый объем воздуха для окисления 1 кг твердого или жидкого топлива?
2. Как рассчитывается теоретически необходимый объем воздуха для окисления 1 м³ газообразного топлива, м³/м³?
3. Как рассчитывается теоретический объем продуктов сгорания, м³/кг (м³/м³)?
4. Как рассчитывается действительный объем продуктов сгорания, м³/кг (м³/м³)?
5. Как рассчитывается энтальпия продуктов сгорания, кДж/кг (кДж/м³)?

Практическая работа 3

Теоретическая температура горения

Цель работы: Изучить методы расчета теоретической температуры горения и теплового баланса горения топлива.

Краткие теоретические сведения [4, 5]
Располагаемая теплота, кДж/кг (кДж/м³):

$$Q_p^p = Q_n^p + Q_{в.вн} + i_{тп}, \quad (3.1)$$

где $Q_{в.вн}$ – теплота, вносимая в топку воздухом, подогретым вне котла;
 $i_{тп}$ – физическая теплота топлива.

Располагаемая теплота расходуется на производство полезной теплоты Q_1 и тепловые потери равные:

$$Q_p^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \quad (3.2)$$

или

$$100 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6. \quad (3.3)$$

Наибольшей является потеря теплоты с уходящими газами, %,

$$q_2 = \frac{I_{yx} - \alpha_{yx} I_{x.г}^o}{Q_p^p} (100 - q_4), \text{ \%} \quad (3.4)$$

где I_{yx} и $I_{x.г}^o$ – энтальпия уходящих газов и теоретического количества холодного воздуха (при температуре 30 °С) соответственно; α_{yx} – коэффициент избытка воздуха в уходящих газах.

Потеря теплоты с химической неполнотой сгорания, %:

$$q_3 = \frac{(Q_{CO} \cdot CO + Q_{H_2} \cdot H_2 + Q_{CH_4} \cdot CH_4)}{100 Q_p^p} V_{с.г}. \quad (3.5)$$

Потеря теплоты с механической неполнотой сгорания, %:

$$q_4 = \left(a_{шл} \frac{\Gamma_{шл}}{100 - \Gamma_{шл}} + a_{ун} \frac{\Gamma_{ун}}{100 - \Gamma_{ун}} \right) \frac{32,7 A^p}{Q_p^p}, \quad (3.6)$$

где $a_{шл}$ и $a_{ун}$ – соответственно доля золы в шлаке и в уносе, $\Gamma_{шл}$ и $\Gamma_{ун}$ – содержание горючих в шлаке и уносе, %; 32,7 – теплота сгорания коксовых частиц в шлаке и уносе, кДж/кг.

Потеря теплоты от наружного охлаждения q_5 находится в пределах от 0,2 до 2,5 %.

Потеря теплоты с физической теплотой шлака, %:

$$q_6 = \frac{A^p a_{\text{шл}} (ct)_{\text{шл}}}{Q_p^p}, \quad (3.7)$$

где $(ct)_{\text{шл}}$ – произведение температуры и теплоемкости шлака.

Коэффициент полезного действия котла равен, %:

$$\eta_k = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6. \quad (3.8)$$

Полезное тепловосприятие связано с паропроизводительностью D котла соотношением:

$$Q_1 = Q_p^p \eta_k = D(i_{\text{пп}} - i_{\text{п.в}}), \quad (3.9)$$

где $i_{\text{пп}}$ и $i_{\text{п.в}}$ – энтальпия перегретого пара и питательной воды, кДж/кг.

Теоретическая температура горения, °С:

$$t_T = \frac{Q_p^p}{V_{\text{RO}_2} c_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 c_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 c_{\text{H}_2\text{O}} + (\alpha - 1) V^0 c_B}, \quad (3.10)$$

где c_{RO_2} , c_{N_2} , $c_{\text{H}_2\text{O}}$, c_B – теплоемкости сухих трехатомных газов, азота, паров воды и воздуха соответственно, кДж/(м³·К), при данной температуре.

В диапазоне температур 1200 – 1600 °С в первом приближении можно принять теплоемкость продуктов сгорания равной $c_r = 1,5$ кДж/(м³·К), тогда:

$$t_T = \frac{Q_p^p}{V_r c_r} = \frac{Q_p^p}{[V_r^0 + (\alpha - 1) V^0] c_r}. \quad (3.11)$$

Задание: используя формулы (3.1–3.11), решите следующие задачи:

Задача 3.1

Задан состав топлива: $C^r = 80$ %; $H^r = 10$ %; $O^r = 8$ %; $S^r = 1$ %; $N^r = 1$ %; $A^c = 10 + N_2/2$ %; $W^p = 20 + N_2/2$ %. Определить теоретическую температуру горения при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,3$. Топливо и воздух не подогреваются. При расчете принять $c_B = 1,48$ кДж/(м³·К); $c_{\text{RO}_2} = 2,4$ кДж/(м³·К); $c_{\text{H}_2\text{O}} = 1,9$ кДж/(м³·К); $c_{\text{N}_2} = 1,47$ кДж/(м³·К); энтальпией золы пренебречь.

Задача 3.2

Для условий задачи 3.1 определить, как изменится теоретическая температура горения, если воздух подогревается до температуры $t_b = 350 + N_2 \cdot 2$ °С.

Задача 3.3

Задан состав газообразного топлива (доменный газ): $CO = 15 + N_2$ %; $CO_2 = 10$ %; $H_2 = 5 + N_2/10$ %; $CH_4 = 2 + N_2/10$ %; остальное – N_2 . Определить теоретическую температуру горения при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,3$. Топливо и воздух не подогреваются. При расчетах принять $c_b = 1,48$ кДж/(м³·К); $c_{RO_2} = 2,4$ кДж/(м³·К); $c_{H_2O} = 1,9$ кДж/(м³·К); $c_{N_2} = 1,47$ кДж/(м³·К).

Задача 3.4

Для условий задачи 3.3 определить, как изменится теоретическая температура горения, если воздух подогревается до температуры $t_b = 350 + N_2 \cdot 2$ °С.

Задача 3.5

Для условий задачи 3.3 рассчитать, какое количество природного газа с содержанием $CH_4 = 96$ %; $C_2H_4 = 2$ %; $N_2 = 2$ % надо подмешать к доменному газу, чтобы теплота сгорания смеси стала равной 20 МДж/м³.

Задача 3.6

Определить максимально возможное содержание влаги в топливе, при котором возможно его сжигание в факеле. Состав топлива: $C^r = 100$ %; $A^c = 20 + N_2$ %; коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,3$. Минимальная температура устойчивого горения $t = 1200 + N_2 \cdot 3$ °С. Теплоемкость продуктов сгорания принять равной $c_r = 1,5$ кДж/(м³·К).

Задача 3.7

Определить снижение выбросов CO_2 при получении 1 МВт тепловой мощности при замене твердого топлива на газообразное. Состав твердого топлива: $C^r = 80$ %; $H^r = 2$ %; $O^r = 17$ %; $S^r = 0,5$ %; $N^r = 0,5$ %; $A^c = 10 + N_2/3$ %; $W^p = 10 + N_2/2$ %. Состав газообразного топлива: $CH_4 = 90 + N_2/10$ %; $C_2H_6 = 2$ %; $C_3H_8 = 0,5$ %; остаток – N_2 , КПД сжигания – 82 %.

Задача 3.8

Определить количество вырабатываемого пара давлением $P = 4$ МПа и температурой перегретого пара $t_{nn} = 440$ °С (энтальпия перегретого пара $i_{nn} = 3308$ кДж/кг) при сжигании в котле природного газа с расходом $B = (8 + N_2/8) \cdot 10^3$ м³/ч при коэффициенте избытка воздуха в уходящих газах $\alpha_{yx} = 1,4$ и температуре $t_{yx} = 160$ °С. Состав газа: $CH_4 = 62 + N_2/2$ %; $CO = 32$ –

– $N_0/2$ %; $H_2 = 2$ %; остальное – N_2 . При расчетах принять $c_2 = 1,5$ кДж/(м³ · К); $q_5 = 0,8$ %; $q_3 = 0$ %.

Задача 3.9

Определить потери теплоты с механической неполнотой сгорания при сжигании твердого топлива следующего состава: $C^r = 80$ %; $H^r = 10$ %; $O^r = 8$ %; $S^r = N^r = 1$ %; $A^c = 10 + N_0/2$ %; $W^p = 10 + N_0/2$ %, если известно, что $\alpha_{шл} = 0,5$; $\Gamma_{шл} = 27 + N_0/2$ %; $\Gamma_{yh} = 31 - N_0/2$ %.

Задача 3.10

Для условий задачи 3.9 определить, каков должен быть расход мазута с теплотой сгорания $Q_i^r = 41$ МДж/кг для обеспечения той же паропроизводительности, при сохранении постоянного значения КПД котла.

Задача 3.11

Рассчитать расход воздуха, подаваемого в топку котла для сжигания угля в плотном слое, если известно, что тепловое напряжение зеркала горения топки площадью $F = 5 + N_0/5$ м² составляет $qF = 2 + N_0/30$ МВт. Коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,5$.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение термина располагаемая теплота.
2. Куда расходуется располагаемая теплота?
3. Какая из потерь теплоты наибольшая?
4. Из чего состоит КПД котла?
5. Как рассчитывается теоретическая температура горения топлива?

Практическая работа 4

Кинетика горения газовых смесей

Цель работы: Изучить методы расчета кинетики горения газовых смесей.

Краткие теоретические сведения [6]

Скорость химического реагирования в соответствии с законом действующих масс может быть представлена в виде

$$W = k c_A^\alpha c_B^\beta, \quad (4.1)$$

где c_A и c_B – концентрации исходных веществ, α и β – стехиометрические коэффициенты реакции

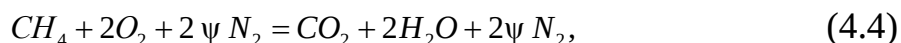


Константа скорости химического реагирования зависит от температуры по закону Аррениуса:

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (4.3)$$

где k_0 – предэкспоненциальный множитель м/с; E – энергия активации, кДж/к моль; $R = 8,314$ кДж/(к моль·К) – универсальная газовая постоянная; T – температура, К.

Максимальная скорость реакции достигается в стехиометрической смеси. Концентрация горючего в смеси с окислителем, при которой достигается максимум скорости горения, рассчитывается по уравнению реакции, например, при горении метана, в смеси с воздухом и азотом



где ψ – отношение концентраций азота и кислорода в окислителе (для воздуха $\psi = 79/21 = 3,76$).

Объемная доля метана, при которой достигается максимум скорости реагирования, составит:

$$r_{CH_4} = \frac{1}{1 + 2 + 2\psi}. \quad (4.5)$$

Скорость нормального распространения пламени U_n связана с толщиной фронта горения δ соотношением:

$$U_n = a / \delta, \quad (4.6)$$

где a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$.

Длина факела диффузионной горелки L рассчитывается по выражению

$$L = 11 \cdot \left(1 + \frac{\rho_r}{\rho_b} V^o \right) d, \quad (4.7)$$

где d – диаметр устья горелок; ρ_r и ρ_b – плотности газа и воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Время горения одиночной капли жидкого топлива, с,

$$\tau = \frac{\rho_k [(t_k - t_0) c_k + \gamma]}{2 \lambda_r (t_r - t_k) \cdot 10^{-3}} r_o^2, \quad (4.8)$$

где ρ_k – плотность жидкого топлива, $\text{кг}/\text{м}^3$; c_k – теплоемкость жидкого топлива, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; γ – теплота испарения жидкого топлива, $\text{кДж}/\text{кг}$; λ_r – теплопроводность газа, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; r_o – начальный радиус капли жидкого топлива, м; t_0 и t_k – начальная температура капли и температура кипения жидкого топлива, $^{\circ}\text{C}$; t_r – температура газов, $^{\circ}\text{C}$.

Задание: используя формулы (4.1–4.8), решите следующие задачи:

Задача 4.1

Определить энергию активации и предэкспоненциальный множитель, если известно, что при $t_1 = 700 + N_2 \cdot 10^{\circ}\text{C}$ константа скорости реакции равна $k_1 = 4,4 \cdot 10^3 \text{ л}/\text{с}$, а при температуре $t_2 = 900 + N_2 \cdot 10^{\circ}\text{C}$ константа скорости $k_2 = 7,2 \cdot 10^3 \text{ л}/\text{с}$. Построить зависимость $\ln(k) = f(1/T)$.

Задача 4.2

Определить нормальную скорость распространения пламени, если в эксперименте на цилиндрической горелке радиусом 15 мм получено конусное пламя с высотой конуса $h = 25 \text{ мм}$. В горелку подавался водород с расходом $3 + N_2/10 \text{ м}^3/\text{с}$, который перед горелкой смешивали с воздухом. Коэффициент избытка воздуха равен $\alpha = 1,1 + 0,01 \cdot N_2$.

Задача 4.3

Определить концентрацию метана в смеси с окислителем, состоящим из кислорода и азота, при которой скорость реакции $\text{CH}_4 + \text{O}_2$ будет максимальна. Доля азота в смеси с кислородом составляет $\psi = 2,5 + N_2/30$.

Задача 4.4

Определить концентрацию водорода в смеси с окислителем, состоящим из кислорода и азота, при которой скорость реакции $\text{H}_2 + \text{O}_2$ будет максимальна. Доля азота в смеси с кислородом составляет $\psi = 4 - N_2/20$.

Задача 4.5

Диаметр горелки $D_1 = 0,01$ м, скорость проскока пламени в неё $w = 0,5 + \frac{N_0}{30}$ м/с. Как изменится скорость проскока пламени при использовании горелки с диаметром $D_2 = 100$ мм?

Задача 4.6

Известно, что скорость распространения пламени в смеси кислород-водород составляет $U_n = 13 + \frac{N_0}{15}$ м/с. Какова будет толщина фронта пламени, если значение коэффициента температуропроводности составляет $\alpha = 2 \cdot 10^{-3}$ м²/с?

Задача 4.7

Рассчитать длину факела диффузионной горелки при ее тепловой мощности, равной $N = 2,5 + \frac{N_0}{5}$ МВт. Состав газообразного топлива: $CO = 15 + \frac{N_0}{10}$ %; $CO_2 = 10$ %; $H_2 = 5 + \frac{N_0}{10}$ %; $CH_4 = 2 + \frac{N_0}{10}$ %; остальное – N_2 . Принять скорость истечения газа равной 50 м/с.

Задача 4.8

Рассчитать полное время выгорания капли жидкого топлива начальным размером $\delta = 1 \cdot 10^{-4} \cdot N_0$ м и начальной температурой $t_0 = 10$ °С. Температура газов $t_r = 1500$ °С, избыток воздуха $\alpha = 1,05$, $\lambda_r = 4 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К). Теплофизические свойства: теплоемкость топлива $c_k = 2,5$ кДж/кг; теплота испарения топлива $\gamma = 1700$ кДж/кг; температура кипения капли $t_k = 360$ °С; плотность топлива $\rho_k = 900$ кг/м³.

Контрольные вопросы

1. Когда достигается максимальная скорость реакции смеси?
2. Как рассчитывается скорость химического реагирования?
3. Как рассчитывается скорость нормального распространения пламени?
4. Как рассчитывается длина факела диффузионной горелки?
5. От чего зависит константа скорости химического реагирования?

Практическая работа 5

Горение твердого топлива

Цель работы: Изучить методы расчета кинетики горения углерода.

Краткие теоретические сведения [7]

Удельный поток углерода, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$:

$$j_c = \nu \frac{c_0}{\frac{1}{k} + \frac{1}{\alpha_\delta}}, \quad (5.1)$$

где c_0 – концентрация кислорода на бесконечном удалении от одиночной частицы углерода, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\nu = 0,375$ – стехиометрический коэффициент; k – константа скорости химического реагирования, $\text{м}/\text{с}$; α_δ – коэффициент реакционного газообмена, $\text{м}/\text{с}$, рассчитываемый по формуле:

$$\alpha_\delta = \frac{ShD}{\delta}, \quad (5.2)$$

где Sh – критерий Шервуда (для неподвижной одиночной частицы равен двум); δ – диаметр сферической коксовой частицы, м ; D – коэффициент молекулярной диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$.

Для процессов горения D принимается как коэффициент взаимодиффузии кислорода и азота:

$$D = 0,16 \cdot 10^{-4} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,9}. \quad (5.3)$$

Константа скорости химического реагирования рассчитывается по уравнению Аррениуса:

$$k = k_0 \exp \left(- \frac{E}{RT} \right), \quad (5.4)$$

где E – энергия активации для разных топлив (табл. 2).

Таблица 2 – Значения энергии активации для различных видов топлива

Энергия активации	Вид топлива		
	Бурый уголь	Каменный уголь	Антрацит
E , $\text{кДж}/\text{к моль}$	90 000	110 000	140 000

Предэкспоненциальный множитель k_0 находят из уравнения:

$$\lg(k_0) = 0,208 \cdot 10^{-4} E + 1. \quad (5.5)$$

При известном содержании кислорода O_2 в газе, выраженного в процентах, массовая его концентрация определяется по выражению, $кг/м^3$:

$$c_0 = \frac{O_2}{100} \cdot \frac{32}{22,4} \cdot \frac{273}{T}. \quad (5.6)$$

Концентрация кислорода на поверхности коксовой частицы, $кг/м^3$:

$$c_n = \frac{c_0 \alpha_\delta}{k + \alpha_\delta}. \quad (5.7)$$

Высота слоя топлива, обеспечивающая сжигание с заданным избытком воздуха, м:

$$H = \frac{[-\ln(1 - 1/\alpha)] S_c}{0,6(1 - \varepsilon)} \delta, \quad (5.8)$$

где $S_c = 0,7 - 0,74$ – критерий Шмидта; α – коэффициент избытка воздуха; $\varepsilon = 0,44 - 0,52$ – порозность слоя; δ – средний диаметр частиц топлива, м.

Задание: используя формулы (5.1–5.8), решите следующие задачи:

Задача 5.1

Рассчитать константу химического реагирования и коэффициент реакционного газообмена при сжигании частицы бурого угля при температуре $t = 1300 + N_2 \cdot 10$ °C для диаметров: а) $\delta = 1 + N_2/10$ мм; б) $\delta = 10 + N_2/10$ мкм.

Задача 5.2

Для условий задачи 5.1 определить область реагирования частиц топлива и рассчитать концентрацию кислорода на поверхности частицы.

Задача 5.3

Для условий задачи 5.1 рассчитать полное время выгорания частицы топлива.

Задача 5.4

Рассчитать высоту плотного слоя при сжигании частиц антрацита средним диаметром $\delta = 25 + N_2/10$ мм; избыток воздуха $\alpha = 1,4$; критерий Шмидта $Sh = 0,74$.

Контрольные вопросы

1. Когда достигается удельный поток углерода?
2. Как рассчитывается константа скорости химического реагирования?
3. Как рассчитывается концентрация кислорода на поверхности коксовой частицы?

4. Как рассчитывается высота слоя топлива, обеспечивающая сжигание с заданным избытком?
5. Приведите значения энергии активации бурого угля.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ведрученко, В. Р. Топливо и основы теории горения : монография / В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов, В. К. Гаак. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. – 220 с. URL: <https://znanium.ru/catalog/product/2173250> (дата обращения: 15.05.2025). – Режим доступа: по подписке.
2. Кудинов, А. А. Горение органического топлива : учебное пособие / А.А. Кудинов. – Москва: ИНФРА-М, 2023. – 390 с. – (Высшее образование: Бакалавриат). – DOI 10.12737/2886. – Текст: электронный. – URL: <https://znanium.com/catalog/product/1974344> (дата обращения: 15.05.2025). – Режим доступа: по подписке.
3. Ведрученко, В. Р. Современные технологии подготовки и сжигания топлива : учебное пособие / В. Р. Ведрученко, Е. С. Лазарев. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 164 с. – URL: <https://znanium.com/catalog/product/2099112> (дата обращения: 15.05.2025). – Режим доступа: по подписке.
4. Мунц, В. А. Горение и газификация органических топлив : учебное пособие / В. А. Мунц, Е. Ю. Павлюк. – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2019. – 148 с. – URL: <https://znanium.com/catalog/product/1960075> (дата обращения: 15.05.2025). – Режим доступа: по подписке.
5. Варнатц, Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Ю. Варнатц, У. Маас, Р. Диббл; пер. с англ. Г. Л. Агафонова; под ред. П. А. Власова. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 351 с.
6. Ривкин, С. Л. Термодинамические свойства воздуха и продуктов сгорания топлив : справочник / С. Л. Ривкин. – Изд. 2-е, перераб. – Москва: Энергоатомиздат, 1984. – 104 с.
7. Хзмяян, Д. М. Теория горения и топочные устройства : учебное пособие / Д. М. Хзмяян, Я. А. Каган; под ред. Д. М. Хзмяян. – Москва: Энергия, 1976. – 488 с.

ИНФОРМАЦИЯ О ДОСТУПЕ К ВИРТУАЛЬНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ УО «ВГТУ» И ЭЛЕКТРОННЫМ РЕСУРСАМ КАФЕДРЫ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

Для удобства работы и развития навыков в работе с удаленными ресурсами студентам рекомендуется использовать материалы по учебной дисциплине, размещенные в виртуальной образовательной среде УО «ВГТУ» (sdo.vstu.by) и на сайте кафедры «Теплоэнергетика».

Учебное издание

ТОПЛИВО И ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Практикум

Составители:
Жерносек Сергей Васильевич
Столяренко Владимир Ильич

Корректор *А.С. Прокопюк*
Компьютерная верстка *В. И. Столяренко*

Подписано к печати 17.06.2025. Формат 60x90¹/₁₆. Усл. печ. листов 1,6.
Уч.-изд. листов 2,0. Тираж 30 экз. Заказ № 120.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования

«Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.