

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Л. В. Хахалева

ОСНОВЫ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

Практикум

Ульяновск
УлГТУ
2015

УДК 697.329 (076)
ББК 31.31 я7
Х27

Рецензент ведущий инженер по энергетической безопасности Ульяновской ТЭЦ-1 Ульяновского филиала ОАО «Волжская ТГК» Д.А. Генералов

Рекомендовано научно-методической комиссией энергетического факультета в качестве практикума

Хахалева, Л. В.

Х 27 Основы теплоэнергетики : практикум / Л. В. Хахалева. – Ульяновск : УлГТУ, 2015. – 11 с.

Практикум по курсу «Основы теплоэнергетики» для бакалавров направления 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» призван помочь студентам в закреплении знаний, полученных на лекционных занятиях, а также в получении навыков расчетов котельного оборудования.

Работа подготовлена на кафедре «Теплоэнергетика».

УДК 697.329 (076)
ББК 31.31 я7

© Хахалева Л. В., 2015
© Оформление. УлГТУ, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

1. Расчет процесса горения топлива. Определение низшей теплоты сгорания топлива	4
2. Определение необходимого объема воздуха и объема продуктов сгорания	5
3. Определение теплосодержания продуктов сгорания	8
4. Тепловой баланс теплогенератора.....	9
Библиографический список	11

1. РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НИЗШЕЙ ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА

Для сухого газообразного топлива низшая теплота сгорания в кДж/м³ может быть найдена по формуле

$$Q_n^c = 107,98H_2 + 126,36CO + 234H_2S + 358,2CH_4 + 590,66C_2H_4 + 637,46C_2H_6 + 860,05C_3H_6 + 913,2C_3H_8 + 1187,36C_4H_{10} + 1461,89C_5H_{12}, \text{ кДж/м}^3, \quad (1)$$

где H_2 , CO , H_2S , CH_4 и другие компоненты – состав газообразного топлива в процентах (%) по объему (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав газообразных топлив

Газопровод	Состав газа по объему									
	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12} и более тяжелые	N_2	CO_2	H_2	CO	H_2S
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Природные газы										
Газли - Каган	95,4	2,6	0,3	0,2	0,2	1,1	0,2	-	-	-
Газли - Ташкент	94	2,8	0,4	0,3	0,1	2	0,4	-	-	-
Карабулак- Грозный	68,5	14,5	7,6	3,5	1	3,5	1,4	-	-	-
Коробки- Камышин	81,5	8	4	2,3	0,5	3,2	0,5	-	-	-
Коробки- Волгоград	93,2	1,9	0,8	0,3	0,1	3	0,7	-	-	-
Линево - Вольск	93,2	2,6	1,2	0,7	-	2	0,3	-	-	-
Первомайск- Сторожевка	62,4	3,6	2,6	0,9	0,2	30,2	0,1	-	-	-
Средняя Азия-Центр	93,8	3,6	0,7	0,2	0,4	0,7	0,6	-	-	-
Ставрополь-Москва 2	92,8	2,8	0,9	0,4	0,1	2,5	0,5	-	-	-
Ставрополь-Москва 3	91,2	3,9	1,2	0,5	0,1	2,6	0,5	-	-	-
Урицк-Сторожевка	91,9	2,4	1,1	0,8	0,1	3,2	0,5	-	-	-
Хаджи-Абад-Фергана	85,9	6,1	1,5	0,8	0,6	5	0,1	-	-	-
Шебелинка-Москва	94,1	3,1	0,6	0,2	0,8	1,2	-	-	-	-
Попутные газы										
Туймазы-Уфа	50	22	9,8	1,2	0,4	16,6	-	-	-	-
Вознесенская- Грозный	76,7	13,2	5,4	2,5	2,2	-	-	-	-	-
Крымск- Новороссийск	91,2	3,9	2	0,9	0,2	-	1,8	-	-	-
Кулешовка-Самара	58	17,2	7,4	2	0,5	13,6	0,8	0,5	-	-
Казань-Альметьевск	53,6	22,8	6,1	0,9	0,2	15,8	0,2	-	-	-
Барса-Гельмес- Небит-Даг	93,9	3,4	1,3	0,7	0,2	0,1	0,4	-	-	-
Тэбук-Сосновка	48,2	18,2	11,9	3,3	1	16,5	0,9	-	-	-
Ярино-Пермь	38	25,1	12,5	3,3	1,3	18,7	1,1	1,1	-	-
Промышленные газы										
Доменный газ	0,3	-	-	-	-	55	12,5	5	27	0,2
Коксовый газ	25,5	-	-	-	-	3	2,4	59,5	6,5	3,1

Для жидкого и твердого топлива низшая теплота сгорания в кДж/м³ может быть найдена по формуле

$$Q_n^p = 339,5C^p + 1256H^p - 109(O^p - S_{pl}^p) - 25,14(9H^p + W^p), \text{ кДж/кг}, \quad (2)$$

где H , C , S , и другие компоненты – состав твердого и жидкого топлива в процентах (%) по массе (табл. 2).

Таблица 2

Химический состав твердого и жидкого топлив

Вид и состав топлива	Состав топлива по массе								
	C^p	H^p	N^p	O^p	S_{pl}^p	A^p	W^p	SO^p	$(CO_2)^p_k$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Жидкое топливо (мазут)									
Малосернистый мазут	84,6 5	11,7	-	0,3	0,3	0,05	3	-	-
Высокосернистый мазут	83	10,4	-	0,7	2,8	0,1	9	-	-
Твердое топливо									
Донбасский уголь	44	3,1	0,8	5,3	3,2	34	9	-	-
Кузбасский уголь	67,7	3,6	1,6	5,8	0,5	11,3	10	-	-
Кузнецкий уголь Д	58,7	4,2	1,9	9,7	0,3	13,2	12	-	-
Кузнецкий уголь Г	66	4,7	1,8	7,5	0,5	11	8,5	-	-
Донецкий уголь Г	55,2	3,8	1	5,8	3,2	23	8	-	-
Бурый уголь	28,7	2,2	0,6	8,6	1,5	25,2	32	-	-
Сланцы	20,6	2,7	0,1	2,8	1,7	46	11,5	-	16,4

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОГО ОБЪЕМА ВОЗДУХА И ОБЪЕМА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

Теоретический объем воздуха и продуктов сгорания для газообразного топлива в м³/м³ рассчитывается по следующим формулам:

– теоретическое количество воздуха для полного сгорания 1 м³ газа

$$V^0 = 0,0476[0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \Sigma((m+n)/4)C_mH_n - O_2], \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (3)$$

– теоретический объем трехатомных газов в продуктах сгорания

$$V_{RO_2} = 0,01[CO_2 + CO + H_2S + \Sigma mC_mH_n], \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (4)$$

– теоретический объем азота в продуктах сгорания

$$V^o_{N_2} = 0,79V^0 + 0,01N_2, \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (5)$$

– теоретический объем водяных паров в продуктах сгорания

$$V^o_{H_2O} = 0,01[H_2 + H_2S + \Sigma (n/2)C_mH_n + 0,0161 V^0 + 1,24W^p], \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (6)$$

Теоретический объем воздуха и продуктов сгорания для **твердого и жидкого топлива** в $\text{кг}/\text{м}^3$ рассчитывается по следующим формулам:

– теоретическое количество воздуха для полного сгорания 1 кг твердого или жидкого топлива

$$V^0 = 0,089C^P + 0,226H^P + 0,033(S^P_{Л} + O^P), \text{ м}^3/\text{кг}; \quad (7)$$

– теоретический объем трехатомных газов в продуктах сгорания для твердого и жидкого топлива, кроме сланцев

$$V_{RO_2} = 0,0187(C^P + 0,375S^P_{Л}), \text{ м}^3/\text{кг}; \quad (8)$$

– для сланцев

$$V_{RO_2} = 0,0187(C^P + 0,375S^P_{Л}) + K[0,509(\text{CO}_2)^P_{K}/100], \text{ м}^3/\text{кг}; \quad (9)$$

где K – коэффициент разложения карбонатов, принимается равным 0,7 при слоевом сжигании, 1 при камерном сжигании;

– теоретический объем азота в продуктах сгорания

$$V^{\circ}_{N_2} = 0,79V^0 + 0,8N_2/100, \text{ м}^3/\text{кг}; \quad (10)$$

– теоретический объем водяных паров в продуктах сгорания при сжигании жидкого и твердого топлива

$$V^{\circ}_{H_2O} = 0,0124[9H^P + W^P] + 0,0161 V^0, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (11)$$

Для расчета **действительного объема воздуха** и продуктов сгорания необходимо определить коэффициенты избытка воздуха.

Необходимо знать тип топки, чтобы правильно определить коэффициенты избытка воздуха в топке и по газоходам котлоагрегата.

Величина присосов воздуха в газоходах котлоагрегата зависит от типа котла и оборудования.

Присосы воздуха в топке $\Delta\alpha_T$:

Топки газомазутных котлов без металлической обшивки: $\Delta\alpha_T = 0,1$;

Слоевые топки механические и полумеханические: $\Delta\alpha_T = 0,1$;

Слоевые топки ручные: $\Delta\alpha_T = 0,3$;

Присосы воздуха в газоходе первый котельный пучок: $\Delta\alpha_I = 0,05$;

Присосы воздуха в газоходе второй котельный пучок: $\Delta\alpha_{II} = 0,1$;

Присосы воздуха в газоходе пароперегреватель: $\Delta\alpha = 0,03$;

Присосы воздуха в газоходе водяной экономайзер стальной: $\Delta\alpha_{вз} = 0,1$;

Присосы воздуха в газоходе водяной экономайзер чугунный: $\Delta\alpha_{вэ} = 0,2$;
 Присосы воздуха в газоходе воздухоподогреватель трубчатый: $\Delta\alpha_{вп} = 0,06$;
 Присосы воздуха в газоходе воздухоподогреватель чугунный: $\Delta\alpha_{вп} = 0,1$;
 Присосы воздуха в газоходе золоуловители: $\Delta\alpha_{вп} = 0,05$;
 Присосы воздуха в газоходе за котельным агрегатом (стальной): $\Delta\alpha_{вп} = 0,01$
 на 1 м длины;
 Присосы воздуха в газоходе за котельным агрегатом (кирпичные борова):
 $\Delta\alpha_{вп} = 0,01$ на 1 м длины;

Коэффициент избытка воздуха для газомазутной топки $\alpha = 1,05 - 1,15$;
 Коэффициент избытка воздуха для слоевой топки (только для твердого
 топлива) $\alpha = 1,3 - 1,5$.
 Таким образом, коэффициент избытка воздуха за котлом (в уходящих газах)
 определяется

$$\alpha_{уХ} = \alpha_T + \Sigma\Delta\alpha_i, \quad (12)$$

где $\Sigma\Delta\alpha_i$ – сумма присосов воздуха в соответствующих газоходах котла.

Действительный объем продуктов сгорания определяется по формулам:

– действительный объем воздуха для сжигания топлива

$$V_D = \alpha_T V^0; \quad (13)$$

– действительный объем продуктов сгорания:

$$V_G = V_{RO2} + V_{N2}^0 + V_{H2O} + (\alpha_{уХ} - 1)V^0; \quad (14)$$

где V_{H2O} – действительный объем водяных паров для газообразного, жидкого и твердого топлива, кроме сланцев, определяется:

$$V_{H2O} = V_{H2O}^0 + 0,0161 (\alpha_{уХ} - 1)V^0, \quad (15)$$

для сланцев

$$V_{H2O} = V_{H2O}^0 + 0,0161\alpha_T V^0. \quad (16)$$

Масса продуктов сгорания определяется для газообразного топлива

$$M_G = \rho_{ГТ}^C + 0,001d_{ГТ} + 1,306 \alpha_T V^0, \quad (17)$$

где $\rho_{ГТ}^C$ – плотность сухого газа; $d_{ГТ}$ – влагосодержание газа;

для жидкого и твердого топлива кроме сланцев

$$M_{\Gamma} = 1 - 0,01 A^P + 1,306 \alpha_{\Gamma} V^o, \quad (18)$$

где A^P – расчетное содержание золы в топливе;

для сланцев

$$M_{\Gamma} = 1 - 0,01 A^P_{\text{K}} + 1,306 \alpha_{\Gamma} V^o + 0,01 K (\text{CO}_2)^P_{\text{K}}, \quad (19)$$

где A^P_{K} – расчетное содержание золы в топливе с учетом неразложившихся карбонатов, определяется по формуле

$$A^P_{\text{K}} = A^P + (1 - K) (\text{CO}_2)^P_{\text{K}}. \quad (20)$$

Концентрация золы в продуктах сгорания для твердого топлива

$$\mu_{\text{ЗЛ}} = A^P a_{\text{ВН}} / (100 M_{\Gamma}), \quad (21)$$

где $a_{\text{ВН}}$ – доля золы топлива, уносимой с продуктами сгорания (коэффициент уноса).

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

Определение теплосодержания продуктов сгорания осуществляется в соответствии с таблицей 3. Расчет теплосодержания по газоходам производится для отмеченных интервалов температур.

Энтальпия продуктов сгорания определяется по формуле

$$I_{\text{ВХ}} = I_{\Gamma}^0 + (\alpha_{\Gamma} - 1) I_{\text{В}}^0 + I_{\text{ЗЛ}}, \text{ КДж/м}^3, \quad (22)$$

где I_{Γ}^0 – энтальпия теоретического объема продуктов сгорания при температуре уходящих газов $\theta_{\text{УХ}}$ и $\alpha_{\Gamma}=1$; $I_{\text{В}}^0$ – энтальпия теоретического объема воздуха при температуре уходящих газов $\theta_{\text{УХ}}$; $I_{\text{ЗЛ}}$ – энтальпия золы (если топливо твердое).

$$I_{\Gamma}^0 = V_{\text{RO}_2} (C\theta)_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2} (C\theta)_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} (C\theta)_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{RO}_2} (C\theta)_{\text{RO}_2}, \quad (23)$$

где $(C\theta)$ – удельная энтальпия, КДж/м³ (табл. 3).

$$I_{\text{В}}^0 = V^0 (C\theta)_{\text{В}}; \quad (24)$$

$$I_{\text{ЗЛ}} = (A^P a_{\text{ВН}} / 100) (C\theta)_{\text{ЗЛ}}. \quad (25)$$

Таблица 3

Удельное теплосодержание продуктов сгорания

θ , °С	$(C\theta)_{CO_2}$ кДж/ м ³	$(C\theta)_{N_2}$ кДж/ м ³	$(C\theta)_{O_2}$ кДж/ м ³	$(C\theta)_{H_2O}$ кДж/ м ³	$(C\theta)_B$ кДж/ м ³	$(C\theta)_{ЗЛ}$ кДж/ кг
100	170,11	128,89	131,99	150,84	132,4	80,87
200	357,83	260,19	267,32	304,61	274,86	169,28
300	559,37	392,18	407,27	462,99	403,08	163,97
400	772,64	527,10	551,40	626,82	542,19	360,34
500	997,22	664,73	699,73	795,26	684,65	458,81
600	1222	804	850	967	830	560,6
800	1704	1093	1160	1335	1130	767,6
1000	2202	1394	1478	1725	1436	984
1200	2717	1695	1800	2131	1754	1206
1500	3504	2164	2294	2779	2239	
1800	4303	2642	2796	3458	2729	
2200	5387	3290	3483	4399	3399	

4. ТЕПЛОВЫЙ БАЛАНС ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА

Определение составляющих теплового баланса представлено в виде таблицы 4.

Таблица 4

Тепловой баланс котельного агрегата

№ п/п	Расчетная величина	Обозначение	Размерность	Формула или обоснование	Расчетное значение
	1	2	3	4	5
1	Располагаемое тепло топлива	Q^p_p	кДж/ м ³	Q^p_H (по расчету)	
2	Температура уходящих газов	θ_{yx}	°С	Принята (в соответствии с рек.)	120
3	Энтальпия уходящих газов	I_{yx}	кДж/ м ³	По расчету	
4	Температура холодного воздуха	t_{XB}	°С	Задана	15
5	Энтальпия холодного воздуха	I^o_{XB}	кДж/ м ³	По расчету	313,05
6	Потери тепла от химического недожога	q_3	%	Рекомендуемое знач.	0,5
7	Потери тепла от механического недожога	q_4	%	Только для твердого топлива (рекоменд.)	
8	Потери тепла с уходящими газами	q_2	%	$\frac{(I_{yx} - \alpha_{yx} I^o_{xв}) (100 - q_4)}{Q^p_H}$	

	1	2	3	4	5
9	Потери тепла в окружающую среду	q_5	%	Рекомендуемое знач.	3
10	Потери тепла с физическим теплом шлаков	q_6	%	Только для твердого топлива (рекомендуемое значение)	
11	КПД теплогенератора	$\eta_{ТГ}$	%	$100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6)$	
12	Давление пара, вырабатываемого котельным агрегатом	$P_{НП}$	МПа	Задано	
13	Энтальпия вырабатываемого пара	$I_{НП}$	кДж/м ³	Из таблиц вод. пара по давлению и температуре	
14	Температура пара	$t_{НП}$	с	По давлению	
15	Температура питательной воды	$t_{ПВ}$	°с	Задана	
16	Энтальпия питательной воды	$I_{ПВ}$	кДж кг	Из таблиц	
17	Паропроизводительность котла	D	кг/ч	Задана	
18	Величина непрерывной продувки	p	%	Задана	
19	Энтальпия котловой воды	$i_{КВ}$	кДж кг	Из таблиц	
20	Тепло, полезно используемое в теплогенераторе	$Q_{ТГ}$	кДж/ч	$D[(i_{НП} - i_{ПВ}) + p[100(i_{НП} - i_{ПВ})]]$	
21	Полный расход топлива	B	м ³ /ч	$(Q_{ТГ} / Q^P_{Р} \eta_{ТГ}) 100\%$	
22	Расчетный расход топлива	B	м ³ /ч	$B(1 - q_4/100)$	
23	Коэффициент сохранения тепла	φ	—	$1 - q_5 / (\eta_{ТГ} + q_5)$	

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ривкин, С.Л. Теплофизические свойства воды и водяного пара / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – М. : Энергия, 1980. – 424 с.
2. Жуховицкий, Д.Л. Расчет основных характеристик промышленно-отопительной котельной / Д.Л. Жуховицкий, А.А. Коваль. – Ульяновск : УлГТУ, 1997.
3. Бузников, Е.Ф. Производственные и отопительные котельные / Е.Ф. Бузников, К.Ф. Роддатис, Э.Я. Березиньш. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 248 с.
4. ГОСТ 3619-89 Котлы паровые стационарные. Типы и основные параметры. – М. : Изд-во стандартов, 1989.
5. ГОСТ 4.422-86 Котлы паровые стационарные. Номенклатура показателей. – М. : Изд-во стандартов, 1986.
6. Эстеркин Р.И. Промышленные котельные установки / Р.И. Эстеркин. – Л. : Энергоатомиздат. Ленинград. отд., 1989. – 256 с.

Учебное электронное издание

ХАХАЛЕВА Лариса Валерьевна

ОСНОВЫ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

Практикум

ЭИ № 664. Объем данных 0,63 Мб.

Редактор Н. А. Евдокимова

Печатное издание

Подписано в печать 25.12.2015. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 0,70. Тираж 50 экз. Заказ 121.

Ульяновский государственный технический университет
432027, г. Ульяновск, Сев. Венец, 32.
ИПК «Венец» УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, Сев. Венец, 32.
Тел.: (8422) 778-113
E-mail: venec@ulstu.ru
<http://www.venec.ulstu.ru>