

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МОРДОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.П. ОГАРЕВА

Тепловой расчет котельных установок

Методические указания для выполнения расчетно-графической работы №1

Саранск 2009

Введение

Промышленные предприятия и жилищно-коммунальный сектор потребляют огромное количество теплоты на технологические нужды, вентиляцию, отопление и горячее водоснабжение. Тепловая энергия в виде пара и горячей воды вырабатывается теплоэлектроцентралями, производственными и районными отопительными котельными.

Повышение цен на топливо и переход многих предприятий на двух- и трехсменную работу требуют серьезной перестройки в проектировании и эксплуатации производственных и отопительных котельных.

Тепловой расчет парового или водогрейного котла может быть конструктивным или поверочным. Конструктивный расчет выполняется при разработке новых паровых или водогрейных котлов специализированными проектно-конструкторскими институтами или конструкторскими бюро котлостроительных заводов. Поверочный расчет котельных агрегатов, выпускаемых промышленностью, выполняется при проектировании источника теплоснабжения, предназначенного для выработки пара или горячей воды.

При выполнении курсового проекта рекомендуется производить поверочный расчет с элементами конструктивного расчета отдельных поверхностей нагрева (пароперегревателя, водяного экономайзера, воздухоподогревателя).

Основной целью поверочного расчета является определение основных показателей работы котлоагрегата, а также реконструктивных мероприятий, обеспечивающих высокую надежность и экономичность его эксплуатации при заданных условиях.

2. Расчет объемов и энтальпий воздуха и продуктов сгорания

2.1. Определение коэффициентов избытка воздуха по газоходам

Коэффициент избытка воздуха по мере движения продуктов сгорания по газоходам котельного агрегата увеличивается. Это обусловлено тем, что давление в газоходах (для котлов, работающих под разрежением) меньше давления окружающего воздуха и через неплотности в обмуровке происходят присосы атмосферного воздуха в газовый тракт агрегата. Обычно при расчетах температуру воздуха, присасываемого в газоходы, принимают равной 30°C.

Присос воздуха принято выражать в долях теоретического количества воздуха, необходимого для горения:

$$\Delta\alpha = \Delta V_{прис} / V^0, \quad (2.1)$$

где $\Delta V_{прис}$ – количество воздуха, присасываемого в соответствующий газоход агрегата, приходящееся на 1 кг сжигаемого жидкого топлива или на 1 м³ газа при нормальных условиях, м³/кг или м³/м³.

При тепловом расчете котлоагрегата присосы воздуха принимаются по нормативным данным. Значения расчетных присосов воздуха для промышленных паровых и водогрейных котлов приведены в табл. 2.1.

Коэффициент избытка воздуха за каждой поверхностью нагрева после топочной камеры подсчитывается прибавлением к α_m соответствующих присосов воздуха:

$$\alpha_i = \alpha_m + \sum_1^i \Delta\alpha_i, \quad (2.2)$$

где i – номер поверхности нагрева после топки по ходу продуктов сгорания; α_m – коэффициент избытка воздуха на выходе из топки.

Коэффициент избытка воздуха принимается в зависимости от вида топлива, способа его сжигания и конструкции топки. Поэтому прежде всего следует выбрать способ сжигания топлива и конструкцию принимаемой к установке топки.

Выбор способа сжигания топлива и конструкции (типа) топочного устройства производится в зависимости от паропроизводительности (теплопроизводительности) и конструкции котельного агрегата, а также физико-химических свойств топлива. Так для котлов любой паропроизводительности при сжигании жидкого и газообразного топлива следует применять камерные (факельные) топки. В табл. 2.2 приведены расчетные коэффициенты избытка воздуха для камерных топок.

Таблица 2.1.

Расчетные значения присосов воздуха в топку и в газоходы паровых и водогрейных котлов при номинальной нагрузке

Топочные камеры и газоходы	Присос воздуха
Топочные камеры пылеугольных котлов с твердым шлакоудалением и металлической обшивкой труб экрана	0,05
то же с обмуровкой и обшивкой	0,07
без металлической обшивки	0,1
Фестон, ширмовый пароперегреватель, первый котельный пучок котлов производительностью $D > 50$ т/ч	0
Первый котельный пучок конвективной поверхности нагрева котлов производительностью $D \leq 50$ т/ч	0,05
Второй котельный пучок конвективной поверхности нагрева котлов производительностью $D \leq 50$ т/ч	0,1
Пароперегреватель	0,03
Водяной экономайзер котлов производительностью $D > 50$ т/ч (на каждую ступень)	0,02
Водяной экономайзер котлов производительностью $D \leq 50$ т/ч:	
стальной	0,08
чугунный с обшивкой	0,1
чугунный без обшивки	0,2
Воздухоподогреватели трубчатые, на каждую ступень:	
для котлов с $D > 50$ т/ч	0,03
для котлов с $D \leq 50$ т/ч	0,06
Газоходы (на каждые 10 м длины):	
стальные	0,01
кирпичные	0,05

Таблица 2.2.

Расчетные значения коэффициента избытка воздуха на выходе из топки α_m

Тип топки	Топливо	Значение α_m
Камерная	Мазут	1,1
	Природный газ	1,1

2.2. Расчет объемов воздуха и продуктов сгорания

При тепловом расчете паровых и водогрейных котлов определяются теоретические и действительные объемы воздуха и продуктов сгорания в следующей последовательности:

1. Определить теоретический объем воздуха, необходимого для полного сгорания:

при сжигании жидкого топлива (м^3 воздуха/кг топлива)

$$V^0 = 0,0889(C^p + 0,375S_{op+k}^p) + 0,265H^p - 0,0333O^p; \quad (2.3)$$

при сжигании газа (м^3 воздуха/ м^3 газа)

$$V^0 = 0,0476 \left[0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right], \quad (2.4)$$

где m – число атомов углерода; n – число атомов водорода.

2. Определить теоретический объем азота в продуктах сгорания:

при сжигании жидкого топлива ($\text{м}^3/\text{кг}$)

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + 0,8 \frac{N^p}{100}; \quad (2.5)$$

при сжигании газа ($\text{м}^3/\text{м}^3$)

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + \frac{N_2}{100}. \quad (2.6)$$

3. Определить объем трехатомных газов:

при сжигании жидкого топлива ($\text{м}^3/\text{кг}$)

$$V_{RO_2} = 1,866 \frac{C^p + 0,375S_{op+k}^p}{100}; \quad (2.7)$$

при сжигании газа

$$V_{RO_2} = 0,01(CO_2 + CO + H_2S + \sum mC_m H_n). \quad (2.8)$$

При расчете следует учитывать, что диоксид углерода и сернистый газ принято объединять и называть «сухие трехатомные газа», обозначая через RO_2 , т.е. $RO_2 = CO_2 + SO_2$.

4. Определить теоретический объем водяных паров:

при сжигании жидкого топлива ($\text{м}^3/\text{кг}$)

$$V_{H_2O}^0 = 0,111H^p + 0,0124W^p + 0,0161V^0; \quad (2.9)$$

при сжигании газа ($\text{м}^3/\text{м}^3$)

$$V_{H_2O}^0 = 0,01 \left(H_2S + H_2 + \sum \frac{n}{2} C_m H_n + 0,124d_{z.mli} \right) + 0,0161V^0. \quad (2.10)$$

5. Определить средний коэффициент избытка воздуха в газоходе для каждой поверхности нагрева

$$\alpha_{cp} = \frac{\alpha' + \alpha''}{2}, \quad (2.11)$$

где α' – коэффициент избытка воздуха перед газоходом; α'' – коэффициент избытка воздуха после газохода.

6. Определить избыточное количество воздуха для каждого газохода

$$V_{изб}^e = V^0 (\alpha_{cp} - 1). \quad (2.12)$$

7. Определить действительный объем водяных паров для жидкого топлива ($\text{м}^3/\text{кг}$) и для газа ($\text{м}^3/\text{м}^3$) по формуле

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha_{cp} - 1)V^0. \quad (2.13)$$

8. Определить действительный суммарный объем продуктов сгорания для жидкого топлива ($\text{м}^3/\text{кг}$) и для газа ($\text{м}^3/\text{м}^3$) по формуле

$$V_2 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{изб}^e + V_{H_2O}. \quad (2.14)$$

9. Определить объемные доли трехатомных газов и водяных паров, а также суммарную объемную долю по формулам:

$$r_{RO_2} = V_{RO_2} / V_2; \quad (2.15)$$

$$r_{H_2O} = V_{H_2O} / V_2; \quad (2.16)$$

$$r_n = r_{RO_2} + r_{H_2O}. \quad (2.17)$$

Результаты расчета действительных объемов продуктов сгорания по газоходам котлоагрегата сводятся в таблицу, форма которой при сжигании жидкого топлива или газа приведена в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Объемы продуктов сгорания, объемные доли трехатомных газов

Величина	Расчетная формула	Теоретические объемы: $V^0 = \dots \text{м}^3/\text{кг}$; $V_{N_2}^0 = \dots \text{м}^3/\text{кг}$; $V_{RO_2} = \dots \text{м}^3/\text{кг}$; $V_{H_2O}^0 = \dots \text{м}^3/\text{кг}$;			
		Газоход			
		Топка	Пароперегреватель	Конвективные пучки	Экономайзер
Коэффициент избытка воздуха после поверхности нагрева	(2.1), табл. 2.1, 2.2				
Средний коэффициент избытка воздуха в газоходе поверхности нагрева	(2.11)				
Избыточное количество воздуха, $\text{м}^3/\text{кг}$	(2.12)				
Объем водяных паров, $\text{м}^3/\text{кг}$	(2.13)				
Полный объем продуктов сгорания, $\text{м}^3/\text{кг}$	(2.14)				
Объемная доля трехатомных газов	(2.15)				
Объемная доля водяных паров	(2.16)				
Суммарная объемная доля	(2.17)				

2.3. Расчет энтальпий воздуха и продуктов сгорания

Количество теплоты, содержащееся в воздухе или продуктах сгорания, называют теплосодержанием (энтальпией) воздуха или продуктов сгорания. При выполнении расчетов принято энтальпию воздуха и продуктов сгорания относить к 1 кг сжигаемого жидкого топлива и к 1 м³ (при нормальных условиях) газообразного топлива.

Расчет энтальпий продуктов сгорания производится при действительных коэффициентах избытка воздуха после каждой поверхности нагрева (значения коэффициента избытка воздуха после поверхности нагрева берутся из табл. 2.3). Расчет следует производить для всего возможного диапазона температур после поверхностей нагрева, так как температуры эти неизвестны. В дальнейших расчетах при пользовании значениями энтальпии допускается линейная интерполяция в интервале температур 100 К. Поэтому при расчетах энтальпии интервал температур не должен быть более 100 К.

Определение энтальпий воздуха и продуктов сгорания производится в такой последовательности:

1. Вычислить энтальпию теоретического объема воздуха для всего выбранного диапазона температур для жидкого топлива (кДж/кг) и газа (кДж/м³)

$$I_g^0 = V^0 (c\vartheta)_g, \quad (2.18)$$

где $(c\vartheta)_g$ – энтальпия 1 м³ воздуха, кДж/м³, принимается для каждой выбранной температуры по табл. 2.4; V^0 – теоретический объем воздуха, необходимого для горения, принимается по табл. 2.3.

Таблица 2.4

Энтальпия 1 м³ воздуха и газообразных продуктов сгорания (кДж/м³)

$\vartheta, ^\circ\text{C}$	$(c\vartheta)_{\text{RO}_2}$	$(c\vartheta)_{\text{N}_2}$	$(c\vartheta)_{\text{O}_2}$	$(c\vartheta)_{\text{H}_2\text{O}}$	$(c\vartheta)_g$
1	2	3	4	5	6
100	170	130	132	151	133
200	359	261	268	305	267
300	561	393	408	464	404
400	774	528	553	628	543
500	999	666	701	797	686
600	1226	806	852	970	832
700	1466	949	1008	1151	982
800	1709	1096	1163	1340	1134
900	1957	1247	1323	1529	1285
1000	2209	1398	1482	1730	1440
1100	2465	1550	1642	1932	1600
1200	2726	1701	1806	2138	1760
1300	2986	1856	1970	2352	1919
1400	3251	2016	2133	2566	2083
1500	3515	2171	2301	2789	2247

1	2	3	4	5	6
1600	3780	2331	2469	3011	2411
1700	4049	2490	2637	3238	2574
1800	4317	2650	2805	3469	2738
1900	4586	2814	2978	3700	2906
2000	4859	2973	3150	3939	3074
2100	5132	3137	3318	4175	3242
2200	5405	3301	3494	4414	3410

2. Определить энтальпию теоретического объема продуктов сгорания для всего выбранного диапазона температур (кДж/кг или кДж/м³)

$$I_{\tau}^0 = V_{RO_2} (c\vartheta)_{RO_2} + V_{N_2}^0 (c\vartheta)_{N_2} + V_{H_2O}^0 (c\vartheta)_{H_2O}, \quad (2.19)$$

где $(c\vartheta)_{RO_2}$, $(c\vartheta)_{N_2}$, $(c\vartheta)_{H_2O}$ – энтальпии 1 м³ трехатомных газов, теоретического объема азота, теоретического объема водяных паров, принимаются для каждой выбранной температуры по табл. 2.4, кДж/м³; V_{RO_2} , $V_{N_2}^0$, $V_{H_2O}^0$ – объемы трехатомных газов, теоретический объем азота и водяного пара, берутся из табл. 2.3, м³/кг или м³/м³.

3. Определит энтальпию избыточного количества воздуха для всего выбранного диапазона температур (кДж/кг или кДж/м³)

$$I_{изб}^e = (\alpha - 1)I_{\epsilon}^0, \quad (2.20)$$

4. Определить энтальпию продуктов сгорания при коэффициенте избытка воздуха $\alpha > 1$ (кДж/кг или кДж/м³)

$$I = I_{\tau}^0 + I_{изб}^e, \quad (2.21)$$

Результаты расчета энтальпии продуктов сгорания по газоходам котлоагрегата сводят в таблицу. Форма расчетной таблицы применительно к промышленному котлоагрегату приведена в табл. 2.5.

Таблица 2.5.

Энтальпия продуктов сгорания $I = f(\vartheta)$, кДж/кг или кДж/м³

Поверхность нагрева	Температура после по- верхности нагрева, °С	I_{ϵ}^0 , ф-ла (2.18)	I_{τ}^0 , ф-ла (2.19)	$I_{изб}^e$, ф-ла (2.20)	I , ф-ла (2.21)
1	2	3	4	5	6
Верх топочной камеры, фестон, $\alpha_m =$	2000				
	1900				
	1800				
	1700				
	1600				
	1500				
	1400				
	1300				

1	2	3	4	5	6
	1200 1100 1000 900 800				
Пароперегреватель, $\alpha_{ne} =$	1000 900 800 700 600 500				
Конвективные пучки, $\alpha_k =$	700				
	600				
	500				
	400				
	300				
	200				
	100				
Водяной экономайзер, $\alpha_{en} =$	400				
	300				
	200				
	100				

Данные таблицы 2.5 позволяют в последующих расчетах по температуре продуктов сгорания определять их энтальпию

$$I_x = I_m + (t_{изв} - t_m) \frac{I_{\bar{o}} - I_m}{100}; \quad (2.22)$$

или, наоборот, по энтальпии продуктов сгорания – их температуру

$$t_x = t_m + \frac{I_{изв} - I_m}{I_{\bar{o}} - I_m} \cdot 100. \quad (2.23)$$

При этом производится линейная интерполяция в интервале температуры 100 К. В формулах (2.22) и (2.23) $I_{\bar{o}}$, I_m – энтальпии, соответствующие большей и меньшей температурам искомого интервала температур, приведенным в табл. 2.5; $t_{изв}$ – температура, для которой вычисляется энтальпия, °С; t_m – температура, соответствующая меньшей энтальпии искомого интервала, °С; $I_{изв}$ – энтальпия, по значению которой определяется температура.

3. Расчетный тепловой баланс и расход топлива

3.1. Расчет потерь теплоты

При работе парового или водогрейного котла вся поступившая в него теплота расходуется на выработку полезной теплоты, содержащейся в паре или горячей воде, и на покрытие различных потерь теплоты. Суммарное количество теплоты, поступившее в котельный агрегат, называют располагаемой теплотой и обозначают Q_p^p . Между теплотой, поступившей в котельный агрегат и покинувшей его, должно существовать равенство. Теплота, покинувшая котельный агрегат, представляет собой сумму полезной теплоты и потерь теплоты, связанных с технологическим процессом выработки пара или горячей воды. Следовательно, тепловой баланс котла для 1 кг сжигаемого жидкого топлива или 1 м³ газа при нормальных условиях имеет вид

$$Q_p^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \quad (3.1)$$

где Q_p^p – располагаемая теплота, кДж/кг или кДж/м³; Q_1 – полезная теплота, содержащаяся в паре или горячей воды, кДж/кг или кДж/м³; Q_2, Q_3, Q_4, Q_5 – потери теплоты с уходящими газами, от химической неполноты сгорания, от механической неполноты сгорания, от наружного охлаждения, кДж/кг или кДж/м³.

Тепловой баланс котла составляется применительно к установившемуся тепловому режиму, а потери теплоты выражаются в процентах располагаемой теплоты:

$$q_i = \frac{Q_i}{Q_p^p}. \quad (3.2)$$

Потеря теплоты с уходящими газами (q_2) обусловлена тем, что температура продуктов сгорания, покидающих котельный агрегат, значительно выше температуры окружающего атмосферного воздуха. Потеря теплоты с уходящими газами зависит от вида сжигаемого топлива, коэффициента избытка воздуха в уходящих газах, температуры уходящих газов, чистоты наружных и внутренних поверхностей нагрева, температуры воздуха, забираемого дутьевым вентилятором.

Потеря теплоты с уходящими газами определяется по формуле

$$q_2 = \frac{(I_{yx} - \alpha_{yx} I_{x.г}^0)(100 - q_4)}{Q_p^p}, \quad (3.3)$$

где I_{yx} – энтальпия уходящих газов, определяется по табл. 2.5 при соответствующих значениях α_{yx} и выбранной температуре уходящих газов, кДж/кг или кДж/м³; $I_{x.г}^0$ – энтальпия теоретического объема холодного воздуха, определяется при $t_g = 30^\circ\text{C}$ по формуле (3.4), кДж/кг или кДж/м³; α_{yx} – коэффициент избытка воздуха в уходящих газах, берется из табл. 2.1 в сечении га-

зохода после последней поверхности нагрева; q_4 – потеря теплоты от механической неполноты горения, при сжигании газа и мазута $q_4 = 0$ (табл. 3.1).

Энтальпия теоретического объема холодного воздуха при температуре 30°C (кДж/кг или кДж/м³)

$$I_{x.в}^0 = 39,8V^0. \quad (3.4)$$

Потеря теплоты от химической неполноты сгорания (q_3) обусловлена появлением в уходящих газах горючих газов CO , H_2 , CH_4 . Потеря теплоты от химической неполноты горения зависит от вида топлива и содержания в нем летучих, способа сжигания топлива и конструкции топки, коэффициента избытка воздуха в топке, от уровня и распределения температуры в топочной камере, организации смесеобразовательных процессов в топке (горелке и топочной камере) (табл. 3.1).

Потеря теплоты от механической неполноты горения (q_4) отсутствует при сжигании газа и мазута (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Расчетные характеристики камерных топок при сжигании газа и мазута

Топливо	Удельная нагрузка топочного объема, кВт/м ³ , для котлов производительностью (т/ч)		Потери от неполноты горения, %	
			механической	химической
	25 – 50	75 – 400		
Мазут	405	350	0	0,5
Природный газ	465	350	0	0,5

Потеря теплоты от наружного охлаждения (q_5) обусловлена передачей теплоты от обмуровки агрегата наружному воздуху, имеющему более низкую температуру. Потеря теплоты от наружного охлаждения зависит от теплопроводности обмуровки, ее толщины, поверхности стен, приходящейся на единицу паропроизводительности парового или теплопроизводительности водогрейного котла.

Потеря теплоты от наружного охлаждения (в %) определяется по формулам:

для парового котла

$$q_5^{п.к} = q_{5ном}^{п.к} \frac{D_{ном}}{D}; \quad (3.5)$$

для водогрейного котла

$$q_5^{в.к} = q_{5ном}^{в.к} \frac{N_{ном}}{N}, \quad (3.6)$$

где $q_{5ном}^{п.к}$ и $q_{5ном}^{в.к}$ – потери теплоты от наружного охлаждения при номинальной нагрузке парового и водогрейного котла, определяются по табл. 3.2 и 3.3 соответственно; $D_{ном}$ – номинальная нагрузка парового котла, т/ч; D – рас-

четная нагрузка парового котла, т/ч; $N_{ном}$ – номинальная мощность водогрейного котла, МВт; N – расчетная мощность водогрейного котла, МВт.

Таблица 3.2.

Потеря теплоты от наружного охлаждения парового котла

Номинальная производительность котла, кг/с (т/ч)	Потеря теплоты, %	
	Собственно котел	Котел с хвостовыми поверхностями
0,55 (2)	3,4	3,8
1,11 (4)	3,1	2,9
1,67 (6)	1,6	2,4
2,22 (8)	1,2	2,0
2,78 (10)	-	1,7
4,16 (15)	-	1,5
5,55 (20)	-	1,3
8,33 (30)	-	1,2
11,11 (40)	-	1,0
16,66 (60)	-	0,9
22,22 (80)	-	0,8
27,77 (100)	-	0,7
55,55 (200)	-	0,6
83,33 (300)	-	0,5

Таблица 3.3.

Потеря теплоты от наружного охлаждения водогрейного котла
(ориентировочно)

Номинальная мощность котла, МВт	1	2	3	5	10	20	30	40	60	100
Потеря, %	5	3	2	1,7	1,5	1,2	1,0	0,9	0,7	0,5

3.2. Расчет КПД и расхода топлива

Коэффициентом полезного действия (КПД) парового или водогрейного котла называют отношение полезной теплоты к располагаемой теплоте. Не вся полезная теплота, выработанная агрегатом, направляется к потребителю. Часть выработанной теплоты в виде пара и электрической энергии расходуется на собственные нужды. Так, например, на собственные нужды расходуется пар для привода питательных насосов, на обдувку поверхностей нагрева и т.д., а электрическая энергия – для привода дымососа, вентилятора, питателей топлива, мельниц системы пылеприготовления и т.д. Под расходом на собственные нужды понимают расход всех видов энергии, затраченной на производство пара или горячей воды. Поэтому различают КПД агрегата

брутто и нетто. Если КПД агрегата определяется по выработанной теплоте, то его называют брутто, а если по отпущенной теплоте - нетто.

КПД брутто котельного агрегата (%) можно определить по уравнению прямого баланса:

для парового котла

$$\eta_{бр} = \frac{Q_{нк}}{Q_p^p B_{нк}} \cdot 100; \quad (3.7)$$

для водогрейного котла

$$\eta_{бр} = \frac{Q_{в.к}}{Q_p^p B_{в.к}} \cdot 100, \quad (3.8)$$

где $Q_{нк}$ – полезная мощность парового котла, кВт; $Q_{в.к}$ – полезная мощность водогрейного котла, кВт; $B_{нк}$ и $B_{в.к}$ – расход топлива паровым и водогрейным котлом, кг/с или м³/с; Q_p^p – располагаемая теплота, кДж/кг или кДж/м³.

КПД парового или водогрейного котла, работающего на жидком или газообразном топливе, по уравнению обратного баланса (%)

$$\eta_{обр} = 100 - (q_2 + q_3 + q_5). \quad (3.9)$$

При тепловом расчете парового или водогрейного котла тепловой баланс составляет для определения КПД брутто и расчетного расхода топлива.

Расчет рекомендуется производить в следующей последовательности:

1. Определить располагаемую теплоту:

для жидкого топлива (кДж/кг)

$$Q_p^p = Q_n^p + i_{мл} + Q_\phi; \quad (3.10)$$

для газообразного топлива (кДж/м³)

$$Q_p^p = Q_n^c, \quad (3.11)$$

где Q_n^p – низшая теплота сгорания жидкого топлива, кДж/кг, принимается по табл. П.1; Q_n^c – низшая теплота сгорания сухой массы газа, кДж/м³, принимается по табл. П.2; $i_{мл}$ – физическая теплота, внесенная топливом, кДж/кг; Q_ϕ – теплота, вносимая в агрегат при паровом распыливании жидкого топлива, кДж/кг.

Физическая теплота топлива учитывается только при его предварительном подогреве от постороннего источника теплота (паровой подогрев мазута (кДж/кг) по формуле:

$$i_{мл} = c_{мл} t_{мл}, \quad (3.12)$$

где $t_{мл}$ – температура топлива, °С (для мазута в зависимости от его вязкости 90-130°С); $c_{мл}$ – удельная теплоемкость топлива, кДж/(кг·К).

Удельная теплоемкость мазута

$$c_{мл}^M = 1,74 + 0,0025 t_{мл}. \quad (3.13)$$

Теплота, вносимая в агрегат через форсунку при паровом распыливании жидкого топлива (кДж/кг),

$$Q_\phi = 0,35(i_\phi - 2520), \quad (3.14)$$

где i_ϕ – энтальпия пара, расходуемого на распыливание топлива, определяется из таблиц для водяного пара по его параметрам, кДж/кг.

2. Определить потерю теплоты с уходящими газами по формуле (3.3).

Для парогенераторов низкого давления с хвостовыми поверхностями нагрева температуру уходящих газов рекомендуется принимать не менее следующих значений (°С):

Природный газ.....	120-130
Мазут.....	150-160

3. Определить потерю теплоты от химической неполноты сгорания (табл. 3.1).

4. Определить потерю теплоты от наружного охлаждения по формулам (3.5), (3.6).

5. Вычислить полезную мощность парового или водогрейного котла (кВт) по формулам:

$$Q_{ng} = D_{ne} (i_{n.n} - i_{n.в.}) + D_{н.н} (i_{н.н} - i_{н.в.}) + 0,01P(D_{ne} + D_{н.н})(i_{кип} - i_{н.в.}); \quad (3.15)$$

$$Q_{в.к} = G_в (i_{з.в.} - i_{х.в.}), \quad (3.16)$$

где D_{ne} – расход выработанного перегретого пара, кг/с; $D_{н.н}$ – расход выработанного насыщенного пара, кг/с; $i_{n.n}$, $i_{н.в.}$, $i_{н.н}$, $i_{кип}$ – энтальпия перегретого пара, питательной воды на входе в индивидуальный водяной экономайзер, насыщенного пара и кипящей воды в барабане котла, кДж/кг; P – непрерывная продувка парового котла, %, учитывается только при $P \geq 2\%$; $G_в$ – расход воды через водогрейный котел, кг/с; $i_{х.в.}$, $i_{з.в.}$ – энтальпия холодной и горячей воды (на входе и выходе водогрейного котла), кДж/кг.

6. Вычислить КПД брутто парового или водогрейного котла (%) из уравнения обратного теплового баланса (3.9).

7. Подсчитать расход топлива (кг/с или м³/с), подаваемого в топку парового или водогрейного котла, из уравнения прямого теплового баланса:

$$B_{ng} = \frac{Q_{ng}}{Q_p^p \eta_{бр}} \cdot 100; \quad (3.17)$$

$$B_{вк.} = \frac{Q_{вк.}}{Q_p^p \eta_{бр}} \cdot 100. \quad (3.18)$$

8. Определить расчетный расход топлива (кг/с или м³/с) для газа и мазута

$$B_p = B_{ng} \text{ или } B_p = B_{вк.} \quad (3.19)$$

Расчетный расход топлива вносится во все последующие формулы, по которым подсчитывается суммарный объем продуктов сгорания и количество теплоты.

9. Для последующих расчетов определить коэффициент сохранения теплоты

$$\varphi = 1 - \frac{q_5}{\eta_{бр} + q_5}. \quad (3.20)$$

4. Расчет топочных камер

4.1. Определение геометрических характеристик топков

При проектировании и эксплуатации котельных установок чаще всего выполняется поверочный расчет топочных устройств. Конструктивный расчет производится только при разработке новых агрегатов конструкторскими бюро заводов-изготовителей или при реконструкции топочных камер существующих котлоагрегатов.

При поверочном расчете топки по чертежам необходимо определить: объем топочной камеры, степень ее экранирования, площадь поверхности стен и площадь лучевоспринимающих поверхностей нагрева, а также конструктивные характеристики труб экранов (диаметр труб, расстояние между осями труб).

Для определения геометрических характеристик топки составляется ее эскиз. Активный объем топочной камеры складывается из объема верхней, средней (призматической) и нижней частей топки. Для определения активного объема топки ее следует разбить на ряд элементарных геометрических фигур в соответствии со схемами, показанными на рис. 4.1.

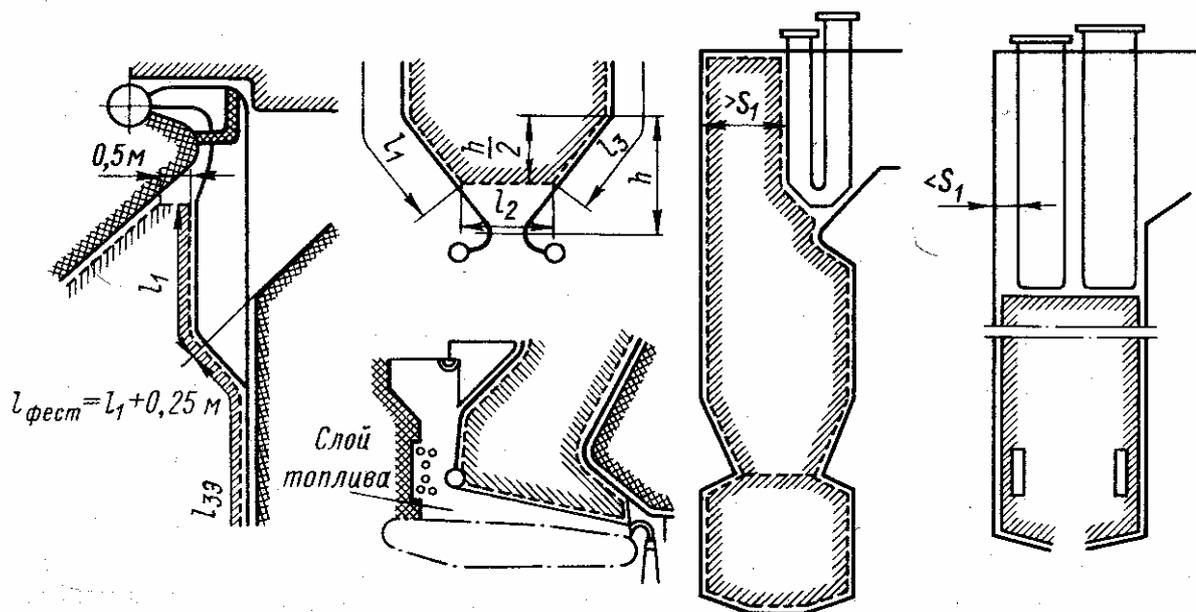


Рис. 4.1. Определение активного объема характерных частей топки

Верхняя часть объема топки ограничивается потолочным перекрытием и выходным окном, перекрытым фестоном или первым рядом труб конвективной поверхности нагрева. При определении объема верхней части топки за его границы принимают потолочное перекрытие и плоскость, проходящую через оси первого ряда труб фестона или конвективной поверхности нагрева в выходном окне топки. В топках с ширмовыми поверхностями нагрева объем ширм, расположенных в верхней части топки по всему поперечному сечению входного окна (рис. 4.2, поз. 1 и 2), а также занимающих часть попереч-

ного сечения топки в районе выходного окна (поз. 3), в объем топки не включается. При ином расположении ширм (поз. 4, 5, 6) межширмовые объемы рассчитываются совместно с объемом топочной камеры. При определении удельной нагрузки топочного объема объем, занимаемый ширмами, расположенными в верхней части топки и в районе выходного окна, включается в ее объем в том случае, если шаг ширм $S_1 \geq 700$ мм. Границами средней (призматической) части объема топки являются осевые плоскости экранных труб или стен топочной камеры.

Нижняя часть камерных топков ограничивается подом или холодной воронкой. За границы нижней части объема камерных топков принимается под или условная горизонтальная плоскость, проходящая посередине высоты холодной воронки.

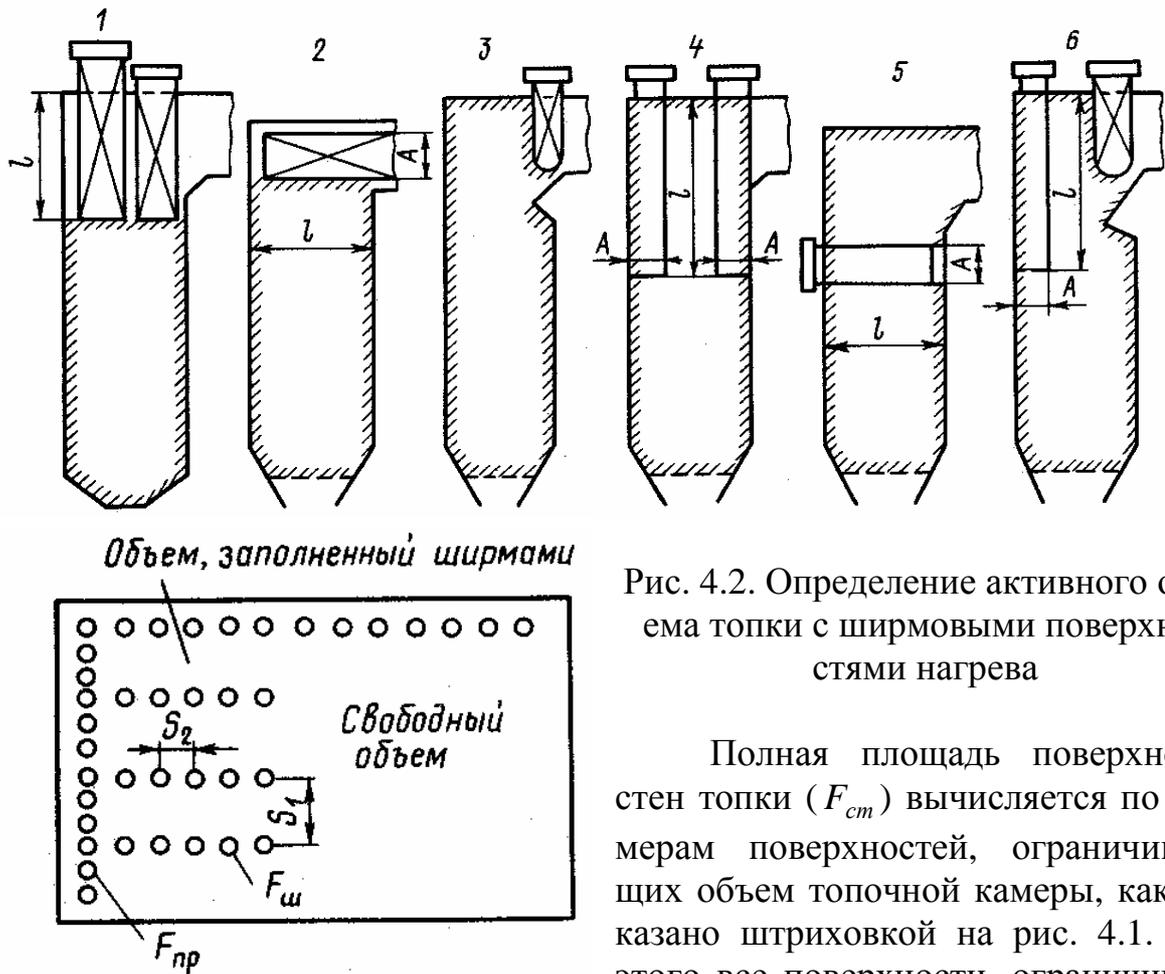


Рис. 4.2. Определение активного объема топки с ширмовыми поверхностями нагрева

Полная площадь поверхности стен топки ($F_{ст}$) вычисляется по размерам поверхностей, ограничивающих объем топочной камеры, как показано штриховкой на рис. 4.1. Для этого все поверхности, ограничивающие

объем топки, разбиваются на элементарные геометрические фигуры.

Площадь поверхности стен двухсветных экранов и ширм определяется как удвоенное произведение расстояния между осями крайних труб этих экранов и освещенной длины труб.

При наличии ширм, включаемых в объем топки, общая площадь поверхности стен определяется как сумма площадей поверхности стен свободного объема ($F_{свб}$), площадей поверхности ширм ($F_{ш}$) и стен, прилегающих к ширмам ($F_{пр}$), с учетом неполного их освещения (подробно см. п. 6-02 «Нормативного метода теплового расчета котельных агрегатов»).

Лучевоспринимающая площадь поверхности нагрева настенных экранов (м^2)

$$H_{\text{л}} = \sum F_{\text{пл}} x, \quad (4.1)$$

где x – угловой коэффициент экрана, определяемый по рис. 4.3; $F_{\text{пл}}$ – площадь стены, занятая экраном, определяется формулой

$$F_{\text{пл}} = bl, \quad (4.2)$$

где b – расстояние между осями крайних труб данного экрана, м; l – освещенная длина экранных труб, м; определяется в соответствии со схемами, показанными на рис. 4.1.

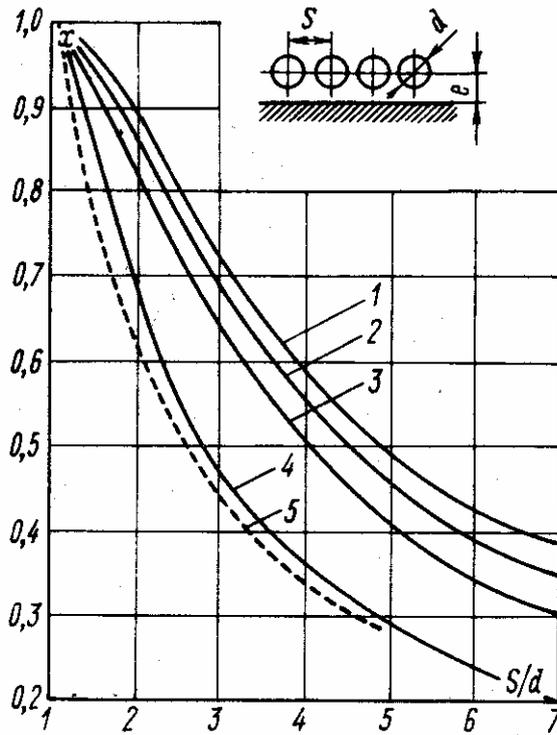


Рис. 4.3. Угловой коэффициент однорядного гладкотрубного экрана: 1 – при расстоянии от стенки $l \geq 1,4d$; 2 – при $l = 0,8d$; 3 – при $l = 0,5d$; 4 – при $l = 0$; 5 – без учета излучения обмуровки при $l \geq 0,5d$.

Для ошипованных и плавниковых экранов, а также для экранов, закрытых чугунными плитами, угловой коэффициент принимается равным 1, как и для поверхности, проходящей через первый ряд труб котельного пучка, фестона и ширм, расположенных в выходном окне топки.

Степень экранирования топки

$$\chi = H_{\text{л}} / F_{\text{ст}}, \quad (4.3)$$

где $H_{\text{л}}$ – площадь лучевоспринимающей поверхности нагрева, м^2 , $F_{\text{ст}}$ – полная площадь поверхности стен топки, м^2 .

4.2. Расчет однокамерных топок

Расчет теплообмена в топках паровых и водогрейных котлов основывается на применении теории подобия к топочным процессам. На базе этой теории в ЦКТИ имени И.И. Ползунова и ВТИ имени Ф.Э. Дзержинского разработан нормативный метод теплового расчета котельных агрегатов. В нормативном методе для расчета теплообмена в однокамерных и полуоткрытых топках рекомендуется формула, связывающая безразмерную температуру продуктов сгорания на выходе из топки (θ''_m) с критерием Больцмана (Bo),

степенью черноты топки (a_m) и параметром (M), учитывающим характер распределения температур по высоте топки:

$$\theta_m'' = \frac{T_m''}{T_a} = \frac{Bo^{0,6}}{Ma_m^{0,6} + Bo^{0,6}}. \quad (4.4)$$

Безразмерная температура продуктов сгорания на выходе из топки (θ_m'') представляет собой отношение действительной абсолютной температуры на выходе из топки (T_m') к абсолютной теоретической температуре продуктов сгорания (T_a). Под теоретической температурой продуктов сгорания (адиабатной температурой) понимают максимальную температуру при сжигании топлива с расчетным коэффициентом избытка воздуха, которую могли бы иметь продукты сгорания, если бы в топке отсутствовал теплообмен с экранными поверхностями нагрева.

Критерий Больцмана представляет собой характеристическое число, контролирующее соотношение между конвективным переносом теплоты и излучением абсолютно черного тела при температуре рассматриваемого элементарного объема.

Критерий Больцмана вычисляется по формуле

$$Bo = \frac{\varphi B_p V_{c_{cp}} \cdot 10^3}{5,67 \cdot 10^{-8} \psi_{cp} F_{cm} T_a^3}, \quad (4.5)$$

где φ – коэффициент сохранения теплоты; B_p – расчетный расход топлива, кг/с; F_{cm} – площадь поверхности стен топки, м²; ψ_{cp} – среднее значение коэффициента тепловой эффективности экранов; $V_{c_{cp}}$ – средняя суммарная теплосумма продуктов сгорания 1 кг топлива в интервале температур $\theta_a - \theta_m''$, кДж/(кг·К); $5,67 \cdot 10^{-8}$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м²·К⁴); T_a – абсолютная теоретическая температура продуктов сгорания, К.

Степенью черноты топки (a_m) называют отношение излучательной способности действительной топки к излучательной способности абсолютно черного тела. Степень черноты топки зависит от излучательной способности пламени факела, конструкции тепловоспринимающих поверхностей нагрева и степени их загрязнения.

Пламя факела представляет собой полупрозрачную излучающую, рассеивающую и поглощающую среду. Передача теплоты лучеиспусканием в такой среде связана с процессами испускания, рассеяния и поглощения энергии трехатомными газами и твердыми частицами. В зависимости от концентрации, размеров и оптических констант твердых частиц, содержащихся в факеле, его излучательная способность может меняться весьма значительно.

Ослабление интенсивности излучения пламени происходит вследствие поглощения и рассеяния. Если луч проходит сквозь слой поглощающей среды, происходит непрерывное уменьшение его интенсивности в направлении излучения.

Коэффициент пропорциональности (k), определяющий относительное изменение интенсивности луча в поглощающем слое единичной толщины, называют коэффициентом ослабления луча. Он определяет интенсивность ослабления лучей в поглощающей среде и, следовательно, характеризует полную поглощательную способность среды, определяемую как поглощением, так и рассеянием.

В топочной камере основными газами, способными поглощать тепловые лучи, являются трехатомные газы, состоящие из RO_2 и водяных паров H_2O . Поглощательная способность RO_2 при постоянном давлении и температуре однозначно определяется произведением его парциального давления (p_{CO_2}) и толщины слоя (s). Поглощательная способность водяного пара при заданной температуре зависит от двух величин: 1) от произведения парциального давления водяного пара и толщины слоя ($p_{\text{H}_2\text{O}}s$) и 2) от толщины слоя (s) либо от парциального давления ($p_{\text{H}_2\text{O}}$).

Поглощающие объемы в топочных камерах котельных агрегатов имеют различную конфигурацию, следовательно, длина пути луча (l) может быть весьма различной в зависимости от его направления. В то же время длина всех лучей, падающих с поверхности полусферы на центр основания, одинакова и равна радиусу полусферы.

Для облегчения расчетов используют не действительную длину лучей в разных направлениях, а эффективную длину луча, или толщину излучающего слоя. Под эффективной длиной луча, или толщиной излучающего слоя, понимают толщину слоя, равную радиусу полусферы, которая при прочих равных условиях излучает на центр основания такое же количество энергии, какое излучает оболочка иной формы на заданный на ней элемент поверхности. Расчеты показывают, что все встречающиеся в промышленной практике объемы могут быть приближенно заменены соответствующими полусферическими объемами.

При наличии в продуктах сгорания твердых взвешенных частиц их поглощательная способность существенно изменяется. Твердые частицы, находящиеся в пламени, можно разделить на три группы: частицы золы, топлива и углерода. В светящихся пламенах частицы углерода представляют собой сажу, а в пылеугольных – кокс.

Коэффициент ослабления лучей – это основная характеристика любой мутной среды, определяющая ее излучательную, рассеивающую и поглощательную способности. Поэтому применительно к топкам котельных агрегатов задача сводится к определению коэффициента ослабления лучей в зависимости от характера пламени.

При расчете несветящихся пламен необходимо определить коэффициент ослабления лучей только трехатомными газами, полусветящихся пламен – дополнительно коэффициенты ослабления лучей частицами золы и кокса, а светящихся – частицами сажи.

Параметр M , входящий в уравнение (4.4), учитывает распределение температуры по высоте топочной камеры и характеризует влияние максимума температуры пламени на эффект суммарного теплообмена. Он зависит от

вида топлива, способа его сжигания, типа горелок, их расположения на стенах топки и функционально связан с относительным уровнем расположения горелок по высоте топочной камеры. Под относительным расположением горелок понимают отношение высоты расположения осей горелок (отсчитываемой от пода топки или от середины холодной воронки) к общей высоте топки.

Поверочный расчет однокамерных и полуоткрытых топок производится в такой последовательности.

1. Предварительно задаются температурой продуктов сгорания на выходе из топочной камеры.

Для промышленных паровых и водогрейных котлов рекомендуется предварительно принимать температуру продуктов сгорания на выходе из топки при сжигании природного газа 1050-1100°C, мазута 1000-1050°C.

2. Для принятой в п.1. температуры определяется энтальпия продуктов сгорания на выходе из топки по табл. 2.5.

3. Подсчитывается полезное тепловыделение в топке (кДж/кг или кДж/м³)

$$Q_m = Q_p \frac{100 - q_3}{100} + Q_6, \quad (4.6)$$

где Q_6 – теплота, вносимая в топку воздухом, кДж/кг или кДж/м³.

Теплота воздуха (Q_6) складывается из теплоты горячего воздуха и холодного, присосанного в топку:

$$Q_6 = (\alpha_m - \Delta\alpha_m) I_{z.v.}^0 + \Delta\alpha_m I_{x.v.}^0. \quad (4.7)$$

Коэффициент избытка воздуха в топке (α_m) принимается по табл. 2.3. Присосы воздуха в топку принимаются по табл.2.1. Энтальпия теоретически необходимого горячего воздуха ($I_{z.v.}^0$) определяется по табл. 2.5, а присосанного холодного воздуха при $t_6 = 30^\circ\text{C}$ – по формуле (3.4).

Для промышленных и водогрейных котлов, не имеющих воздухоподогревателя, формула (4.7) принимает следующий вид:

$$Q_6 = \alpha_m I_{x.v.}^0. \quad (4.8)$$

4. Определяется коэффициент тепловой эффективности экранов

$$\psi = x\zeta. \quad (4.9)$$

Угловым коэффициентом (x) называется отношение количества энергии, посылаемой на облучаемую поверхность, к энергии излучения всей полусферической излучающей поверхности. Угловым коэффициентом показывает, какая часть полусферического лучистого потока, испускаемого одной поверхностью, падает на другую поверхность и зависит от формы и взаимного расположения тел, находящихся в лучистом теплообмене. Значение x определяется из рис. 4.3.

Коэффициент ζ учитывает снижение тепловосприятия экранных поверхностей нагрева вследствие их загрязнения наружными отложениями или закрытия огнеупорной массой. Коэффициент загрязнения принимается по табл. 4.1. Если стены топки покрыты экранами с разными угловыми коэффи-

циентами или частично покрыты огнеупорной массой (огнеупорным кирпичом), то определяется среднее значение коэффициента тепловой эффективности. При этом для неэкранированных участков топки коэффициент тепловой эффективности (ψ) принимается равным нулю. При определении среднего коэффициента тепловой эффективности суммирование распространяется на все участки топочных стен. Для этого стены топочной камеры должны быть разбиты на отдельные участки, в которых угловой коэффициент и коэффициент загрязнения неизменны.

Таблица 4.1

Коэффициент загрязнения топочных экранов

Экраны	Топливо	Значение ζ
Открытые гладкотрубные и плавниковые настенные	Газообразное	0,65
	Мазут	0,55
Ошипованные, покрытые огнеупорной массой в топках с твердым шлакоудалением	Любое	0,20
Закрытые огнеупорным кирпичом	Любое	0,10

5. Определяется эффективная толщина излучающего слоя (м)

$$s = 3,6V_m / F_{cm}, \quad (4.10)$$

где V_m – объем топочной камеры, м³; F_{cm} – поверхность стен топочной камеры, м².

6. Определяется коэффициент ослабления лучей. При сжигании жидкого и газообразного топлива коэффициент ослабления лучей (м·МПа)⁻¹ зависит от коэффициентов ослабления лучей трехатомными газами (k_g) и сажистыми частицами (k_c):

$$k = k_g r_n + k_c, \quad (4.11)$$

где r_n – суммарная объемная доля трехатомных газов, берется из табл. 2.3.

Коэффициент ослабления лучей трехатомными газами (k_g) определяется по номограмме (рис. 4.4) или по формуле (м·МПа)⁻¹:

$$k_g = \left(\frac{7,8 + 16r_{H_2O}}{3,16\sqrt{p_n s}} - 1 \right) \left(1 - 0,37 \frac{T_m''}{1000} \right), \quad (4.12)$$

где $p_n = r_n p$ – парциальное давление трехатомных газов, МПа; p – давление в топочной камере котлоагрегата (для агрегатов, работающих без наддува, принимается $p = 0,1$ МПа); r_{H_2O} – объемная доля водяных паров, берется из табл. 2.3; T_m'' – абсолютная температура на выходе из топочной камеры, К (равна принятой по предварительной оценке).

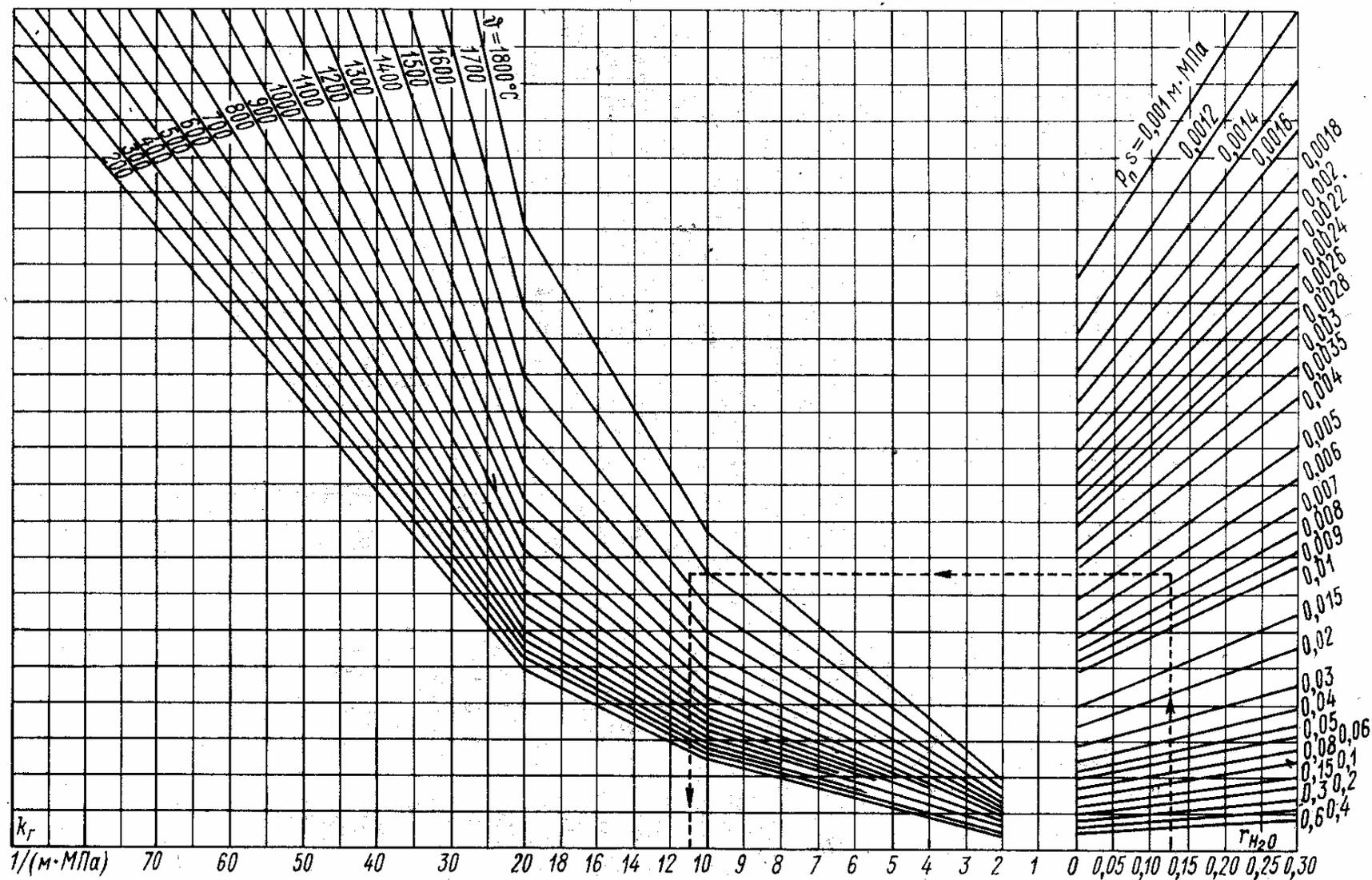


Рис. 4.4. Коэффициент ослабления лучей трехатомными газами.

Коэффициент ослабления лучей сажистыми частицами, $(\text{м}\cdot\text{МПа})^{-1}$,

$$k_c = 0,3(2 - \alpha_m) \left(1,6 \frac{T_m''}{1000} - 0,5 \right) \frac{C^p}{H^p}, \quad (4.13)$$

где C^p , H^p – содержание углерода и водорода в рабочей массе жидкого топлива.

При сжигании природного газа

$$\frac{C^p}{H^p} = 0,12 \sum \frac{m}{n} C_m H_n, \quad (4.14)$$

где $C_m H_n$ – процентное содержание входящих в состав природного газа углеводородных соединений.

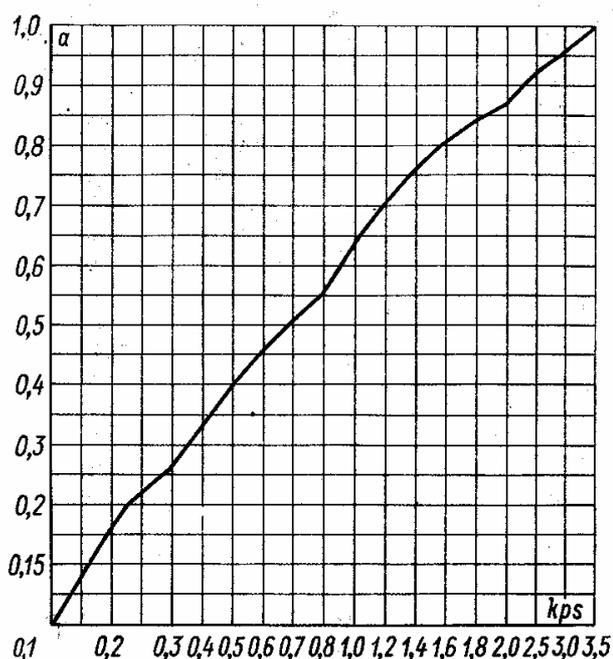


Рис. 4.5. Степень черноты продуктов сгорания a в зависимости от суммарной оптической толщины слоя kps

$$a_{cv} = 1 - e^{-(k_2 r_n + k_c) ps}; \quad (4.16)$$

$$a_2 = 1 - e^{-k_2 r_n ps}; \quad (4.17)$$

здесь k_2 и k_c – коэффициенты ослабления лучей трехатомными газами и сажистыми частицами.

8. Определяется степень черноты топki. Для камерных топок при сжигании жидкого топлива и газа

$$a_m = \frac{a_\phi}{a_\phi + (1 - a_\phi) \psi_{cp}}. \quad (4.18)$$

9. Определяется параметр M в зависимости от относительного положения максимума температура пламени по высоте топki (x_m):

при сжигании газа и мазута

$$M = 0,54 - 0,2x_m. \quad (4.19)$$

левоводородных соединений.

7. Подсчитывается степень черноты факела (a_ϕ) или определяется по номограмме (рис. 4.5).

Для жидкого и газообразного топлива степень черноты факела

$$a_\phi = t a_{cv} + (1 - t) a_2, \quad (4.15)$$

где t – коэффициент, характеризующий долю топчного объема, заполненного светящейся частью факела, принимается по табл. 4.2; a_{cv} , a_2 – степень черноты светящейся части факела и несветящихся трехатомных газов, какой обладал бы факел при заполнении всей топki соответственно только светящимся пламенем или только несветящимися трехатомными газами.

Значения a_{cv} и a_2 определяются по формулам

Доля топочного объема, заполненная светящейся частью факела

Вид сжигаемого топлива и удельная нагрузка топочного объема	Коэффициент m
Газ при сжигании светящимся факелом с $q_v \leq 400$ кВт/м ³	0,10
То же при $q_v \geq 1000$ кВт/м ³	0,60
Мазут при $q_v \leq 400$ кВт/м ³	0,55
То же при $q_v \geq 1000$ кВт/м ³	1.00
Примечание. При удельных нагрузках топочного объема больше 400 и меньше 1000 кВт/м ³ коэффициент m определяется линейной интерполяцией	

Максимальное значение M , рассчитанное по формуле (4.19) для камерных топок принимается не более 0,5.

Относительное положение максимума температуры для большинства топлив определяется как отношение высоты размещения горелок к общей высоте топки

$$x_m = h_z / H_m, \quad (4.20)$$

где h_z подсчитывается как расстояние от пода топки или от середины холодной воронки до оси горелок, а H_m – как расстояние от пода топки или середины холодной воронки до середины выходного окна топки.

10. Определяется средняя суммарная теплоемкость продуктов сгорания на 1 кг сжигаемого жидкого топлива или на 1 м³ газа при нормальных условиях [кДж/(кг·К) или кДж(м³·К)]:

$$Vc_{cp} = \frac{Q_m - I_m''}{T_a - T_m''}, \quad (4.21)$$

где T_a – теоретическая (адиабатная) температура горения, К, определяемая из табл. 2.5. по значению Q_m , равному энтальпии продуктов сгорания I_a ; T_m'' – температура (абсолютная) на выходе из топки, принятая по предварительной оценке, К; I_m'' – энтальпия продуктов сгорания берется из табл. 2.5 при принятой на выходе из топки температуре; Q_m – полезное тепловыделение в топке (п. 3).

11. Определяется действительная температура на выходе из топки (°С) по номограмме (рис. 4.6) или формуле

$$v_m'' = \frac{T_a}{M \left(\frac{5,67 \psi_{cp} F_{cm} a_m T_a^3}{10^{11} \phi B_p Vc_{cp}} \right)^{0,6}} - 273. \quad (4.22)$$

Полученная температура на выходе из топки сравнивается с температурой, принятой ранее в п.1. Если расхождение между полученной температурой (v_m'') и ранее принятой на выходе из топки не превысит $\pm 100^\circ\text{C}$, то расчет считается окончанным. В противном случае задаются новым, уточненным, значением температуры на выходе из топки и весь расчет повторяется.

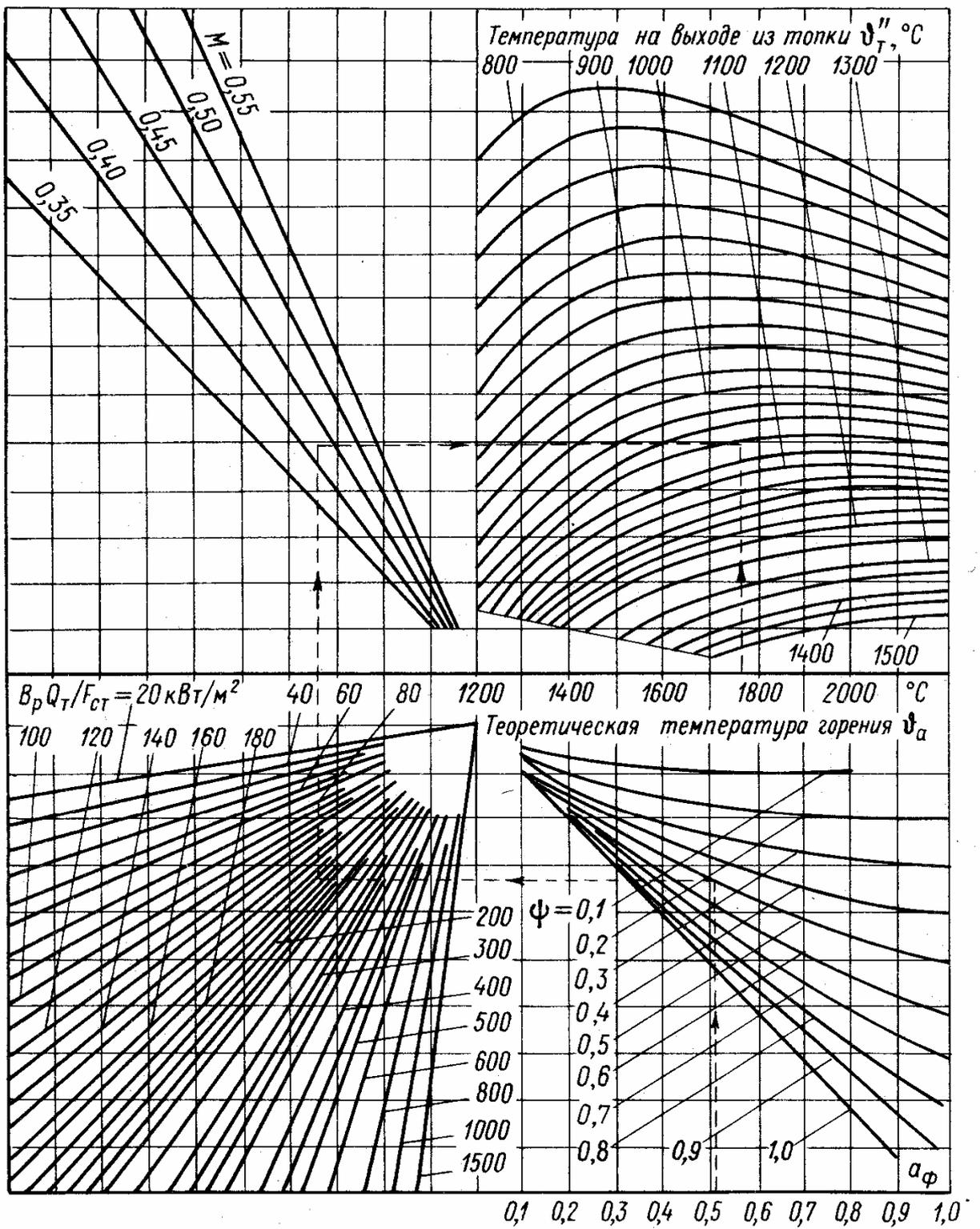


Рис. 4.6. Расчет теплопередачи в однокамерных и полуоткрытых топках

12. Определяется удельная нагрузка топочного объема ($\text{кВт}/\text{м}^3$) по формуле:

$$q_V = B_p Q_n^H / V_m. \quad (4.23)$$

Приложения

Таблица П.1.

Расчетные характеристики некоторых жидких топлив

Топливо	Марка топлива	Состав рабочей массы топлива, %							Низшая теплота сгорания Q_n^p , кДж/кг
		W^p	A^p	$S_{ор+к}$	C^p	H^p	N^p	O^p	
Мазут	Малосернистый	3,0	0,05	0,3	84,65	11,7	–	0,3	40280
	Сернистый	3,0	0,10	1,4	83,80	11,2	–	0,5	39730
	Высокосернистый	3,0	0,10	2,8	83,00	10,4	–	0,7	38770

Таблица П.2

Расчетные характеристики природных газов

Газопровод	Состав газа по объему, %							Низшая теплота сгорания сухого газа, кДж/м ³	Плотность газа при нормальных условиях, кг/м ³
	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12} и более тяжелые	N_2	CO_2		
Саратов–Москва	84,5	3,8	1,9	0,9	0,3	7,8	0,8	35800	0,837
Саратов–Горький	91,9	2,1	1,3	0,4	0,1	3,0	1,2	36130	0,786
Ставрополь–Москва									
1-я нитка	93,8	2,0	0,8	0,3	0,1	2,6	0,4	36090	0,764
2-я нитка	92,8	2,8	0,9	0,4	0,1	2,5	0,5	36550	0,772
3-я нитка	91,2	3,9	1,2	0,5	0,1	2,6	0,5	35340	0,786
Серпухов–Ленинград	89,7	5,2	1,7	0,5	0,1	2,7	0,1	37430	0,799

Гоголево–Полтава	85,8	0,2	0,1	0,1	0	13,7	0,1	30980	0,789
Дашава–Киев	98,9	0,3	0,1	0,1	0	0,4	0,2	35880	0,712
Рудки–Минск–Вильнюс	95,6	0,7	0,4	0,2	0,2	2,8	0,1	35500	0,740
Угерско–Львов, Угерско–Гнездици–Киев	98,5	0,2	0,1	0	0	1,0	0,2	35500	0,722
Брянск–Москва	92,8	3,9	1,1	0,4	0,1	1,6	0,1	37300	0,776
Шебелинка–Днепропетровск	92,8	3,9	1,0	0,4	0,3	1,5	0,1	37300	0,781
Шебелинка–Брянск–Москва	94,1	3,1	0,6	0,2	0,8	1,2	–	37870	0,776
Кумертау–Ишимбай–Магнитогорск	81,7	5,3	2,9	0,9	0,3	8,8	0,1	36800	0,858
Промысловка–Астрахань	97,1	0,3	0,1	0	0	2,4	0,1	35040	0,733
Газли–Коган	95,4	2,6	0,3	0,2	0,2	1,1	0,2	36590	0,750
Джаркак–Ташкент	95,5	2,7	0,4	0,2	0,1	1,0	0,1	36680	0,748
Газли–Коган–Ташкент	94,0	2,8	0,4	0,3	0,1	2,0	0,4	36260	0,751
Ставрополь–Невинномысск–Грозный	98,2	0,4	0,1	0,1	0	1,0	0,2	35630	0,728
Саушино–Лог–Волгоград	96,1	0,7	0,1	0,1	0	2,8	0,2	35130	0,741
Коробки–Лог–Волгоград	93,2	1,9	0,8	0,3	0,1	3,0	0,7	35840	0,766
Карадаг–Тбилиси–Ереван	93,9	3,1	1,1	0,3	0,1	1,3	0,2	37090	0,766
Бухара–Урал	94,9	3,2	0,4	0,1	0,1	0,9	0,4	36720	0,758
Урицк–Сторожовка	91,9	2,4	1,1	0,8	0,1	3,2	0,5	36470	0,789
Линево–Кологривовка–Вольск	93,2	2,6	1,2	0,7	–	2,0	0,3	37010	0,782
Средняя Азия–Центр	93,8	3,6	0,7	0,2	0,4	0,7	0,6	37550	0,776
Уренгой–Помары–Ужгород	98,4	0,1	–	–	–	1,2	0,3	41750	0,838

Список литературы

1. Эстеркин Р.И. Котельные установки. Курсовое и дипломное проектирование: Учеб. пособ. для техникумов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989.
2. Эстеркин Р.И. Промышленные парогенерирующие установки.
3. Эстеркин Р.И. Промышленные котельные установки: Учебник для техникумов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985.
4. Котлы малой, средней мощности и топочные устройства. Каталог справочник. – М.: НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1972.
5. Щеголев М.М., Гусев Ю.Л., Иванова М.С Котельные установки (учебник для вузов). – М.: Изд-во литературы по строительству, 1966.
6. Браунс Э.Г. Проектирование промышленной котельной установки.
7. Александров В.Г. Паровые котлы малой и средней мощности. – М.: Энергия, 1966.
8. Гинзбург-Шик Л.Д. Современные котлоагрегаты.
9. Корнеичев А.И. Конспект лекций по курсу «Энергетические установки».
10. Зарудный Л.Б. Расчет и конструирование парогенераторов энерготехнологических схем химической промышленности.
11. Липов Ю.М. Компоновка и тепловой расчет парогенераторов.
12. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. Под ред. Кузнецова.
13. Клюев А.Н., Малая Э.М. Теплоснабжение от тепловых сетей ТЭЦ и районных котельных.
14. Лебедев П.Д. Теплоиспользующие установки промышленных предприятий.
15. Потрошков В.А. Теплотехника. Сборник задач по курсу «Тепловые установки».
16. Тихонов В.Н., Добровинский Р.Ю. Тепловой расчет котельных агрегатов ДКВР (методические указания по курсовому проектированию для студентов заочного факультета). Свердловск., 1972.
17. Шестаков Б.И. Методические указания по тепловому расчету котельных агрегатов.
18. Панькевич В.В. Тепловой расчет топочных камер и радиационных поверхностей нагрева парогенераторов.
19. Павлов И.И., Федоров М.Н. Котельные установки и тепловые сети. Учебник для техникумов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., Стройиздат, 1977.

Содержание

Введение.....	2
1. Назначение, технические данные и устройство котлов	Ошибка! Закладка не определена.
1.1. Котлы ДЕ.....	Ошибка! Закладка не определена.
1.2. Котлы ДКВР.....	Ошибка! Закладка не определена.
2. Расчет объемов и энтальпий воздуха и продуктов сгорания.....	3
2.1. Определение коэффициентов избытка воздуха по газходам	3
2.2. Расчет объемов воздуха и продуктов сгорания	5
2.3. Расчет энтальпий воздуха и продуктов сгорания	7
3. Расчетный тепловой баланс и расход топлива.....	10
3.1. Расчет потерь теплоты.....	10
3.2. Расчет КПД и расхода топлива	12
Приложения	27
Список литературы	29