

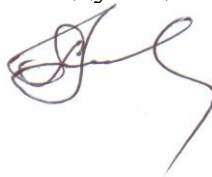
МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Институт горного дела и строительства  
Кафедра «Санитарно-технических системы»

Утверждено на заседании кафедры  
«Санитарно-технических системы»  
«20» января 2023 г., протокол № 5

Заведующий кафедрой



Р.А. Ковалев

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
**по выполнению курсового проекта**  
**по дисциплине (модулю)**  
**«Теплогенерирующие установки»**

**основной профессиональной образовательной программы**  
**высшего образования – программы бакалавриата**

по направлению подготовки  
**08.03.01 – "Строительство"**

с направленностью (профилем)  
**" Теплогазоснабжение и вентиляция "**

Форма(ы) обучения: *очная, заочная, очно-заочная*

Идентификационный номер образовательной программы: 080301-06-23

Тула 2023год

## Разработчик(и) методических указаний

Солодков С.А. доцент, к.т.н.,  
(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)



---

(подпись)

## Введение

Паровым или водогрейным котлом называется устройство, в котором для получения пара или нагрева воды под давлением выше атмосферного используется теплота, выделяющаяся при сгорании органического топлива. Поверочный расчет парового котла выполняется для оценки показателей экономичности, выбора вспомогательного оборудования, получения исходных данных для последующих расчетов: аэродинамических, гидравлических, прочностных. При выполнении поверочного расчета парового котла его паропроизводительность, параметры пара и питательной воды являются заданными. Поэтому цель расчета состоит в определении температур газовой среды и тепловосприятий рабочего тела в поверхностях нагрева заданного котла. Газомазутные вертикально-водотрубные паровые котлы типа Е (ДЕ) паропроизводительностью 4; 6,5; 10; 16 и 25 т/ч предназначены для выработки насыщенного или слабоперегретого пара давлением 1,4 МПа. Топочная камера котлов размещена сбоку от конвективного пучка, образованного вертикальными трубами, развальцованными в верхнем и нижнем барабанах. Ширина топочной камеры по осям боковых экранов труб одинакова для всех котлов – 1790 мм, глубина топочной камеры изменяется в зависимости от номинальной паропроизводительности котла. Основными составными частями этих котлов являются: верхний и нижний барабаны, конвективный пучок, фронтальный, боковой и задний экраны, образующие топочную камеру. Трубы перегородки и правого бокового экрана, образующего также под и потолок топочной камеры, вводятся непосредственно в верхний и нижний барабаны. Концы труб заднего экрана приварены к верхнему и нижнему коллекторам диаметром 159х6 мм. Трубы фронтального экрана котлов паропроизводительностью 4; 6,5 и 10 т/ч приварены к коллекторам диаметром 159х6 мм, а на котлах паропроизводительностью 16 и 25 т/ч они развальцованы в верхнем и нижнем барабанах. Шаг труб вдоль барабана 90 мм., поперечный – 110 мм (за исключением среднего, равного 120 мм). Для поддержания необходимого уровня

скоростей газов в конвективных пучках котлов производительностью 4; 6,5 и 10 т/ч установлены продольные ступенчатые перегородки.

В котле ДЕ – 25 – 14 ГМ для обеспечения надёжной циркуляции в кипяtilьных трубках котельного пучка верхний и нижний барабаны соединены между собой опускными трубами размером  $\varnothing 159 \times 4,5$ , число которых с ростом производительности котла увеличивают от 1 до 4. Ограждающие поверхности котлов ДЕ на жидком и газообразном топливе выполнены из труб с относительным шагом  $s/d = 1,03 \div 1,08$ , что позволяет применять облегчённую изоляцию.

Котлы серии ДЕ имеет высокую степень заводской готовности, что повышает эффективность их монтажа.

Методические указания составлены на основе “Нормативного метода теплового расчёта котельных агрегатов”, разработанного коллективом авторов ведущих научно – исследовательских институтов (ВТИ и ЦКТИ).

#### 1. Задание на тепловой расчёт, порядок его выполнения

Поверочный расчёт парового котла выполняется для существующей конструкции с целью определения показателей её работы при переходе на другое топливо, при изменении нагрузки или параметров пара, а также после проведенной реконструкции поверхностей нагрева.

Задание на поверочный расчёт должно содержать следующие данные:

- тип парового котла;
- номинальную паропроизводительность и параметры пара;
- месторождение и марку топлива;
- способ сжигания топлива.

В расчётно – пояснительную записку должны быть включены следующие разделы:

- задание;
- описание парового котла, компоновку его поверхностей с указанием их связи по рабочей среде;

- технические характеристики сжигаемого топлива; расчёт объёмов и энтальпии воздуха и продуктов сгорания;
- тепловой баланс парового котла, расчёт расхода сжигаемого топлива;
- тепловой расчёт топки и поверхностей нагрева;
- сводную таблицу основных результатов расчёта.

Расчёты следует оформлять в табличной форме .

Задание на поверочный расчёт прилагается в таблице 1.

Данные по составу топлива - таблицы П7, П8.

Таблица 1. Задание на проектирование

две последние цифры	марка котла	давление на выходе, МПа	ТОПЛИВО	
			Газ (место рождения)	Мазут
00,25,50,75	ДЕ 4-14 ГМ	1,0	Уренгойское	-
01,26,51,76	ДЕ 6,5-14 ГМ	0,9	Оренбургское	-
02,27,52,77	ДЕ 10-14 ГМ	0,8	Ставропольское	-
03,28,53,78	ДЕ 16-14 ГМ	0,7	Бугурусланское	-
04,29,54,79	ДЕ25-14 ГМ	1,0	Вой-Вожское	-
05,30,55,80	ДЕ16-14 ГМ	0,9	-	М40 малосернистый
06,31,56,81	ДЕ10-14 ГМ	0,8	Сель-Иоль (Коми)	-
07,32,57,82	ДЕ 6,5-14 ГМ	0,7	Газовское 1	-
08,33,58,83	ДЕ 4-14 ГМ	0,8	-	М100 малосернистый
09,34,59,84	ДЕ 25-14 ГМ	1,0	Вуктыльское	-
10,35,60,85	ДЕ16-14 ГМ	0,7	Березовское	-
11,36,61,86	ДЕ10-14 ГМ	0,8	Соленинское	-
12,37,62,87	ДЕ 6,5-14 ГМ	0,9	-	М40 многосернистый
13,38,63,88	ДЕ 4-14 ГМ	0,8	Мессояхское	-
14,39,64,89	ДЕ 6,5-14 ГМ	1,0	Газовское 2	-
15,40,65,90	ДЕ10-14 ГМ	0,9	Комсомольское 1	-
16,41,66,91	ДЕ16-14 ГМ	0,8	Медвежье	-
17,42,67,92	ДЕ25-14 ГМ	0,7	Заполярное	-
18,43,68,93	ДЕ16-14 ГМ	0,8	Губкинское	-
19,44,69,94	ДЕ10-14 ГМ	1,0	-	М100 многосернистый
20,45,70,95	ДЕ 6,5-14 ГМ	0,7	Газовское 3	-
21,46,71,96	ДЕ 4-14 ГМ	0,9	-	М40 малосернистый
22,47,72,97	ДЕ 25-14 ГМ	0,8	Юбилейное	-
23,48,73,98	ДЕ16-14 ГМ	1,0	-	М100 малосернистый
24,49,74,99	ДЕ10-14 ГМ	0,7	Комсомольское 2	-

## 2. Выбор температуры уходящих газов и коэффициента избытка воздуха

Температура уходящих газов оказывает решающее влияние на экономичность работы парового котла, так как потеря теплоты с уходящими газами является при нормальных условиях эксплуатации наибольшей даже в сравнении с суммой других потерь. Однако, глубокое охлаждение газов требует увеличения размеров конвективных поверхностей нагрева и во многих случаях приводит к усилению низкотемпературной коррозии.

Температура уходящих газов за хвостовой поверхностью нагрева (экономайзером)  $v_{yx}$  выбирается в зависимости от вида сжигаемого топлива по таблице 1.

Таблица 1. Рекомендуемые температуры уходящих газов, °С

ТОПЛИВО	$v_{yx}$
Твёрдое:	
сухое, $W^n \leq 0,7$	110 ÷ 120
влажное, $W^n = 1 \div 5$	120 ÷ 130
сильновлажное, $W^n > 5$	130 ÷ 140
Мазут:	
высокосернистый, $S^p > 2,0 \%$	150 ÷ 160
сернистый, $S^p = 0,5 \div 2,0 \%$	130 ÷ 140
малосернистый, $S^p < 0,5 \%$	120 ÷ 130
Природный газ	120 ÷ 130

Для расчета действительных объемов продуктов горения по поверхности нагрева котельного агрегата прежде всего выбирают коэффициенты избытка воздуха на выходе из топки  $\alpha_t$  и присосы воздуха в отдельных элементах котла  $\Delta\alpha$ . Коэффициент избытка воздуха  $\alpha_t$  должен обеспечить практически полное сгорание топлива. Он выбирается в зависимости от типа топочного устройства и вида сжигаемого топлива по таблице 2.

Таблица 2. Расчётный коэффициент избытка воздуха на выходе из топки.

Топка	Топливо	Коэффициент
Топка с пневматическим забрасывателем и цепной решёткой прямого и обратного хода	Каменные угли	1,3 ÷ 1,4
	Бурые угли	1,3 ÷ 1,4
	Антрацит и полуантрацит	1,5 ÷ 1,5
Шахтная топка с наклонной решёткой	Торф, древесина	1,4
Камерная топка с твёрдым удалением шлака	Антрацит, полуантрацит, тощий уголь	1,2 ÷ 1,25
	Остальное твёрдое	1,15 ÷ 1,20
Камерная топка	Природный газ	1,05 ÷ 1,1
	Мазут	1,03 ÷ 1,05

В топку и газоходы котла при наличии в них отверстий и неплотностей из атмосферы поступает воздух, который называют присосом  $\Delta\alpha$ . Избыток воздуха  $\alpha_t$  включает в себя коэффициент избытка воздуха, подаваемого в горелки или под колосниковую решетку  $\alpha_{гор}$ , и присосы холодного воздуха извне при работе топки под разряжением  $\Delta\alpha_t$ , происходящие в основном в нижней части топки.

При выбранном  $\alpha_t$  избыток воздуха, поступающий в зону горения топлива, определяется как  $\alpha_{гор} = \alpha_t - \Delta\alpha_t$ . В газоплотных топках у котлов серии ДЕ  $\Delta\alpha_t = 0$ . Для котлов серии ДКВР  $\Delta\alpha_t$  см. табл. 3. За счет присосов, коэффициенты избытка воздуха от топки к дымовой трубе по тракту возрастают. Избыток воздуха за каждой поверхностью нагрева после топочной камеры  $\alpha_2''$ , получают прибавлением к  $\alpha_t$  соответствующих присосов воздуха, т.е.  $\alpha_2'' = \alpha_t + \sum_1^2 \Delta\alpha$ .

Присосы воздуха в газоходах парового котла принимают по таблице 3.

При распределении коэффициентов избытка воздуха по газоходам следует ознакомиться с конструкцией парового котла, для которого проводится поверочный расчет.

У котла DE 25 – 14 ГМ конвективная часть состоит из двух газоходов. Первый газоход выполнен с шахматным расположением труб в пучке, второй – с коридорным. Остальные котлы этой серии имеют по одному газоходу с коридорным расположением труб.

Таблица 3. Расчётные присосы холодного воздуха в негазоплотных топках и в газоходах.

Поверхность нагрева	Обозначения	Присос
Слоевые топки		
	$\Delta\alpha_T$	0,1
Камерные топки для газа, мазута, твердого топлива при наличии металлической наружной обшивки		
	$\Delta\alpha_T$	0,05
Газоходы конвективных поверхностей нагрева:		
шахматный котельный пучок	$\Delta\alpha_{Г I}$	0,05
коридорный котельный пучок	$\Delta\alpha_{Г II}$	0,1
Водяной чугунный экономайзер	$\Delta\alpha_э$	0,1
Газоходы за котельным агрегатом (на каждые 10 м):		
стальные	$\Delta\alpha_б$	0,01
кирпичные	$\Delta\alpha_б$	0,05

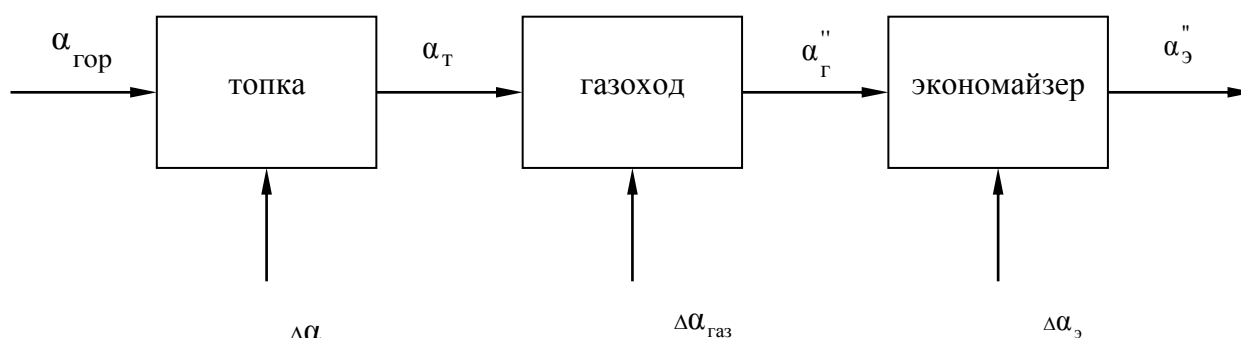


Рис. 1. Распределение коэффициентов избытка воздуха по поверхностям нагрева котла



### 3. Расчет объемов воздуха и продуктов сгорания

По общепринятой методике [1] объемы продуктов сгорания и воздуха выражаются в м<sup>3</sup> при нормальных условиях (0°С и 0,1 МПа) при сжигании 1 кг твердого и жидкого топлив или 1 м<sup>3</sup> газового топлива.

Для твёрдого и жидкого топлива расчёт производится исходя из состава рабочей массы по следующим формулам:

теоретический объём воздуха

$$V^o = 0,089(C^p + 0,375S^p) + 0,265H^p - 0,033O^p, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (3.1)$$

теоретические объемы продуктов сгорания

$$V_{\text{RO}_2} = 0,0187(C^p + 0,375S^p), \text{ м}^3/\text{кг} \quad (3.2)$$

$$V_{\text{N}_2}^o = 0,79 \cdot V^o + 0,008 \cdot N^p, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (3.3)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^o = 0,111H^p + 0,0124W^p + 0,0161V^o, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (3.4)$$

$$V_{\Gamma}^o = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^o + V_{\text{H}_2\text{O}}^o, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (3.5)$$

При сжигании природного газа расчет теоретических объемов воздуха и продуктов сгорания производится на основании процентного состава компонентов, входящих в него:

теоретический объем воздуха:

$$V^o = 0,0476 \cdot [\sum (m + 0,25 \cdot n) \cdot C_m H_n + 0,5 \cdot (\text{CO} + \text{H}_2) + 1,5 \cdot \text{H}_2\text{S} - \text{O}_2], \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (3.6)$$

теоретические объемы продуктов сгорания воздуха:

$$V_{\text{RO}_2} = 0,01 \cdot (\sum m \cdot C_m H_n + \text{CO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{S}), \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (3.7)$$

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V^0 + 0,01 \cdot N_2; \quad (3.8)$$

$$V_{H_2O}^0 = 0,01 \cdot (\sum 0,5 \cdot n \cdot C_m H_n + H_2S + H_2 + 0,124 \cdot d_{г.тл} + 1,61 \cdot V^0) \quad (3.9)$$

где  $d_{г.тл}$  - влагосодержание газообразного топлива при расчетной температуре  $10^\circ\text{C}$

$$d_{г.тл} = 10 \text{ г/м}^3$$

Расчет объемов продуктов сгорания в поверхностях нагрева сводят в таблицу.

Таблица 4. Объём продуктов сгорания

Величина и расчетная формула	Поверхность нагрева		
	топочная камера	газоход *	экономайзер
Коэффициент избытка воздуха за поверхностью нагрева			
$\alpha_i'' = \alpha_i + \sum \Delta \alpha_i$			
Средний коэффициент избытка воздуха в поверхности нагрева $\alpha_{cp}$			
Действительный объем водяных паров			
$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,016 \cdot (\alpha_{cp} - 1) \cdot V^0, \text{ м}^3 / \text{м}^3$			
Полный объем газов			
$V_r = V_r^0 + 1,016 \cdot (\alpha_{cp} - 1) \cdot V^0, \text{ м}^3 / \text{м}^3$			
Объемная доля трехатомных газов			
$r_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_r}$			
Объемная доля водяных паров			
$r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_r}$			
Объемная доля трехатомных газов и водяных паров $r_n = r_{RO_2} + r_{H_2O}$			

\* Для котлов ДЕ – 25 таблица содержит два газохода.

#### 4. Расчет энтальпии воздуха и продуктов сгорания.

Для всех видов топлива энтальпии теоретических объемов воздуха и продуктов сгорания, в  $\text{кДж/м}^3$ , при расчетной температуре  $t^\circ\text{C}$ , определяют по формулам:

$$J_B^0 = V^0 \cdot C_B \cdot v \quad (4.1)$$

$$J_r^0 = (V_{RO_2} \cdot C_{RO_2} + V_{N_2}^0 \cdot C_{N_2} + V_{H_2O}^0 \cdot C_{H_2O}) \cdot v \quad (4.2)$$

Энтальпия продуктов сгорания при избытке воздуха  $\alpha$ )1

$$J_r = J_r^0 + (\alpha'' - 1) \cdot J_B^0 \quad (4.3)$$

В приведенных формулах :  $C_B; C_{RO_2}; C_{N_2}; C_{H_2O}$  - теплоемкость соответственно воздуха, трехатомных газов, азота и водяных паров, кДж/м<sup>3</sup>К, значения выбираются по табл. П1 в приложении:

$\alpha''$  – коэффициент избытка воздуха за поверхностью нагрева,

$J_{эл}$  – энтальпия золы, кДж/кг, для твёрдого топлива.

$$J_{эл} = 0,01 a_{уп} A^F C_{эл} v$$

где  $C_{эл}$  – теплоёмкость золы, кДж/кг К приведена в табл. П. 1;

$a_{уп}$  – доля золы топлива, уносимая продуктами сгорания: для слоевых топок при сжигании бурых и каменных углей  $a_{уп} 0,2 \div 0,5$ ; антрацитов – 0,3.

Энтальпия золы невелика по сравнению с другими составляющими и учитывается когда приведённая величина уноса золы

$$1000 \frac{A^p a_{уп}}{Q_n^p} > 1,4$$

Результаты расчёта энтальпии газов при действительных избытках воздуха сводятся в таблицу 5.

Таблица 5. Энтальпия продуктов сгорания

Поверхность нагрева	Темпер за поверх но- стью $v$ , °С	$J_r^0$	$J_B^0$	$(\alpha'' - 1) \cdot J_B^0$	$J_r = J_r^0 + (\alpha'' - 1) \cdot J_B^0 + J_{эл}$
Топочная камера $\alpha_T$	2000 900				
Газоход $\alpha_r = \alpha_T + \Delta\alpha_{газ}$	1100 200				
Экономайзер $\alpha_3 = \alpha_r + \Delta\alpha_3$	300 100				

Поскольку на данном этапе расчета температура газов за той или иной поверхностью нагрева еще неизвестна, расчет энтальпий газов делается на весь возможный за данной поверхностью диапазон температур.

При наличии у парового котла двух газоходов расчёт энтальпии производится для каждого газохода в отдельности. Котёл типа ДЕ – 25 имеет два газохода. Температура за поверхностью нагрева 1<sup>го</sup> газохода  $t = 1100 \div 500$ , 2<sup>го</sup> газохода  $t = 600 \div 200$ .

По результатам расчета строится  $J - v$  диаграмма см. рис. 1П в приложении.  $J - v$  диаграмму следует построить на миллиметровой бумаге, так как от точности построения её будет зависеть точность последующих расчётов.

## 5. Тепловой баланс парового котла

Распределение теплоты, вносимой в котел при сжигании топлива, на полезно использованную теплоту и тепловые потери носит название теплового баланса.

Тепловой баланс составляется на 1 кг твёрдого топлива или жидкого топлива и 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива.

Уравнение теплового баланса имеет вид:

$$Q_p^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \quad , \quad \text{кДж/кг} \quad , \quad \text{кДж/м}^3 \quad (5.1)$$

где  $Q_p^p$  - располагаемая теплота топлива;

$Q_1$  - полезно используемая теплота для производства водяного пара;

$Q_2$  - потери теплоты с уходящими газами;

$Q_3$  - потери теплоты от химической неполноты сгорания;

$Q_4$  - потери теплоты от механической неполноты сгорания; (для твёрдого топлива)

$Q_5$  - потери теплоты в окружающую среду;

$Q_6$  - потери с физической теплотой шлаков; (для твёрдого топлива)

Если отнести все слагаемые теплового баланса к располагаемой теплоте и выразить их в процентах, то уравнение (5.1) примет вид:

$$100 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6, \% \quad (5.2)$$

Коэффициент полезного действия котельного агрегата (брутто) определяется из данного уравнения:

$$\eta_{бр} = q_1 = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6), \% \quad (5.3)$$

Располагаемая теплота топлива определяется по уравнению:

$$Q_p^p = Q_n^p + Q_{тл} + Q_{внш} + Q_{п.ф} \quad (5.4)$$

Для большинства видов достаточно сухих и малосернистых твёрдых топлив и газообразного топлива  $Q_p^p = Q_n^p$ . Для сильновлажных твердых топлив и мазута учитывается физическая теплота топлива  $Q_{тл}$ .

$$Q_{тл} = c_{тл} \cdot t_{тл}, \text{ кДж/кг} \quad (5.5)$$

где  $c_{тл}$  - теплоемкость мазута;

$t_{тл}$  - температура мазута, обычно она составляет  $90 \div 140^\circ\text{C}$ . Зависит от сернистости мазута, чем больше сернистость, тем выше  $t_{тл}$ .

$$c_{тл} = 1,74 + 0,0025 \cdot t_{тл}, \text{ кДж/кгK} \quad (5.6)$$

В случае предварительного подогрева дутьевого воздуха в калориферах теплоту такого подогрева  $Q_{внш}$  включают в располагаемую теплоту топлива.

$$Q_{внш} = \beta (i_{гв}^o - i_{хв}^o) \quad (5.7)$$

$$\beta' = \frac{G}{G_o} \quad (5.8)$$

где  $G$  – количество действительно вводимого воздуха, кг/г;

$G_o$  – количество теоретически необходимого воздуха, кг/г;

$i_{гв}^o, i_{хв}^o$  – энтальпии теоретического объёма горячего и холодного воздуха.

При использовании для распыла мазута паромеханических форсунок в топку котла вместе с разогретым топливом поступает пар. Он вносит дополнительную теплоту  $Q_{п.ф}$ .

$$Q_{п.ф} = G (i_p - 2510) \quad (5.9)$$

где  $G$  – расход пара на 1 кг топлива, кг/кг;

$i_p$  – энтальпия дутьевого пара;

2510 – величина расчётной энтальпии водяного пара, сбрасываемого с продуктами сгорания в атмосферу.

При паровом распыливании мазута расход пара составляет  $G = 0,3 \div 0,35$  кг/кг.

При слоевом сжигании антрацита и подаче пара под решётку  $G = 0,2 \div 0,4$  кг/кг.

Потеря теплоты с уходящими газами определяется по формуле:

$$q_2 = \frac{J_{yx} - \alpha_{yx} \cdot J_B^o}{Q_p} \cdot (100 - q_4), \% \quad (5.10)$$

где  $J_{yx}$  – энтальпия уходящих газов при  $\alpha_{yx}$  и  $v_{yx}$ , кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>,

определяется по  $J-v$  диаграмме;

$\alpha_{yx}$  – коэффициент избытка воздуха за экономайзером,

$J_B^o$  –

энтальпия воздуха при температуре в котельной  $t_{хв}=30^\circ\text{C}$ ,

определяется по формуле (4.1).

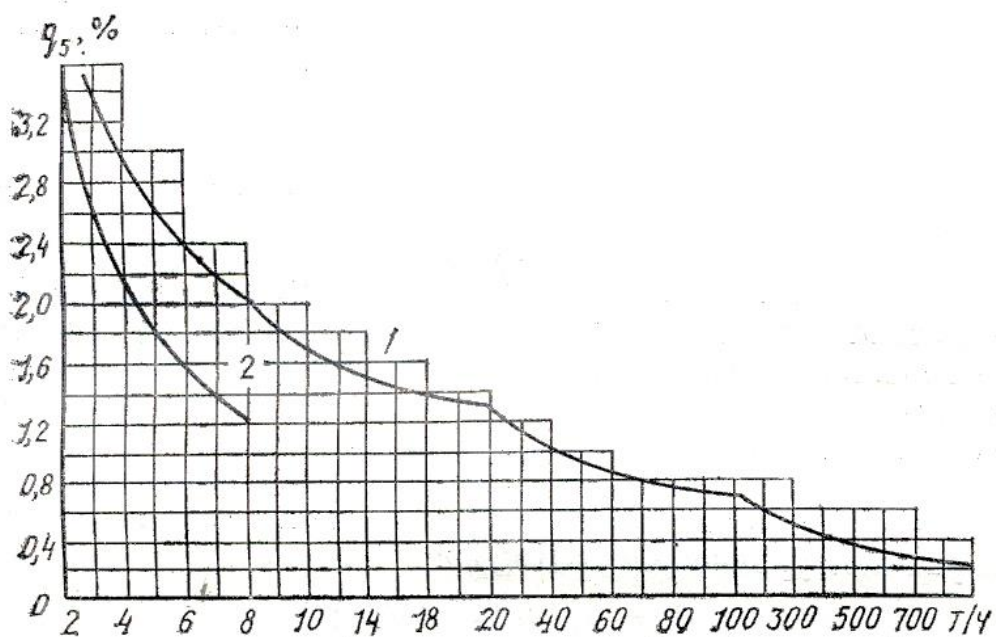
Теплоёмкость воздуха при  $t_{хв}=30^\circ\text{C}$  составляет  $c_{хв} = 1,29$

Потеря теплоты от химической неполноты сгорания  $q_3$  зависит от рода топлива и типа топочного устройства. Опыты показали, что при сжигании твердого топлива в слое  $q_3$  лежит обычно в пределах от 0,5 до 30%, а при сжигании

в камерных топках – от 0,5 до 1,5%. При сжигании мазута и природного газа  $q_3 = 0,5\%$ .

Величина потерь теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4$  учитывается только для твердого топлива. Для слоевых топок  $q_4$  может составлять от 1÷2 до 18%, для камерных топок от 1 до 5% [4, табл. 3-14].

Потеря теплоты от наружного охлаждения  $q_5$  для стационарных паровых котлов принимается по данным рис.2. Распределение  $q_5$  по отдельным элементам котельного агрегата, производится пропорционально количеству теплоты, отдаваемому продуктами сгорания в соответствующем элементе и учитывается введением коэффициента сохранения теплоты  $\varphi$ :



1 – котёл с хвостовыми поверхностями нагрева (водяным экономайзером или воздухонагревателем);

2 – котёл без хвостовых поверхностей нагрева.

Рис 2. Потери теплоты от наружного охлаждения котла в зависимости от паропроизводительности котла.

$$\varphi = 1 - \frac{q_5}{\eta_{\text{бр}} + q_5} \quad (5.11)$$

Потери теплоты с физической теплотой шлаков  $q_6$  определяется по [2, стр 53];

Полное количество полезно используемой теплоты  $Q_1$  для производства водяного пара определяется по формуле :

$$Q_1 = D \cdot \left[ (i'' - i_{п.в}) + \frac{\Pi}{100} \cdot (i' - i_{п.в}) \right], \text{ кДж/ч} \quad (5.12)$$

где  $D$  - паропроизводительность агрегата, кг/ч;

$i''$ ,  $i'$  – энтальпия, соответственно насыщенного пара, котловой воды, кДж/кг, принимается при давлении в котле [ Таблица Пб];

$i_{п.в}$  – энтальпия питательной воды, кДж/кг, принимается в соответствии с формулой:

$$i_{п.в} = c_{в} \cdot t_{п.в}$$

где  $c_{в}$  – теплоёмкость питательной воды, принимают равной 4,19 кДж/кг;

$t_{п.в}$  – температура питательной воды, принимают равной 104 °С.

$\Pi$  - процент непрерывной продувки, принимается равным 3%.

Расход топлива, подаваемого в топку, определяется по формуле:

$$B = \frac{Q_1}{3600 \cdot Q_p^p \cdot \eta_{6p}} 100, \text{ кг/с, м}^3/\text{с} \quad (5.13)$$

Расчетный расход топлива определяется с учетом потери теплоты от механической неполноты сгорания, для твёрдого топлива.

$$B^p = B \cdot \left( 1 - \frac{q_4}{100} \right) \quad (5.14)$$



## 6. Расчет теплообмена в топке

Топка парового котла служит для сжигания топлива и получения продуктов сгорания с высокой температурой. Перенос теплоты в топке от факела горящего топлива и высокотемпературных продуктов сгорания к экранным поверхностям нагрева осуществляется, в основном, излучением. Поэтому, расчет теплообмена в топке проводится с условием преобладающего влияния в сложном теплообмене радиационной составляющей.

Целью расчета является определение температуры продуктов сгорания на выходе из топки  $v_t''$ , удельной нагрузки на единицу объема топки  $q_v$ . Полученные при расчете значения должны находиться в пределах, рекомендуемых [1].

Таблица 6(а). Конструктивные характеристики топки

Наименование величины	Обозначение	Размеры	ДЕ 4	ДЕ 6,5	ДЕ 10	ДЕ 16	ДЕ 25
Лучевосприн. поверхность нагрева	$F_{\text{л}}$	$\text{М}^2$	21,81	27,93	38,96	48,13	60,46
Полная поверхность стен топки	$F_{\text{ст}}$	$\text{М}^2$	23,80	29,97	41,47	51,84	64,22
Объем топочной камеры	$V_t$	$\text{М}^3$	8,01	11,20	17,17	22,6	29,0
Диаметр труб	$d$	мм	51	51	51	51	51
Шаг труб	$S$	мм	55	55	55	55	55

В данном разделе даются показания по ходу выполнения расчета.

Отношение площади стен, занятой лучевоспринимающей поверхностью  $F_{\text{л}}$  к полной площади стен  $F_{\text{ст}}$  называется степенью экранирования топки:

$$X = \frac{F_{\text{л}}}{F_{\text{ст}}} \quad (6.1)$$

При слоевом сжигании топлива:

$$X = \frac{F_{\text{л}}}{F_{\text{ст}} - R} \quad (6.2)$$

где  $R$  - поверхность зеркала горения,  $\text{м}^2$ .

При расчетах излучения в топках различают пламя, образующееся при сжигании газа, мазута и твердого топлива. Принимается, что в пламени газа и мазута основными излучающими компонентами являются трехатомные газы  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  и взвешенные в них мельчайшие сажистые частицы; в пламени твердых топлив – трехатомные газы  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , частицы золы и кокса.

При сжигании газового и жидкого топлива коэффициент теплового излучения факела определяется по формуле:

$$\xi_{\text{ф}} = m \cdot \xi_{\text{св}} + (1 - m) \cdot \xi_{\text{г}} \quad (6.3)$$

где  $\xi_{\text{св}}$ ,  $\xi_{\text{г}}$  - коэффициенты теплового излучения светящейся части факела и несветящихся газов. Коэффициент  $\xi_{\text{г}}$  находится по номограмме П 3,

Коэффициент  $\xi_{\text{св}}$  определяется также по номограмме П 3 при

$$k_p S = k \cdot 0,1 \cdot S \quad (6.4)$$

$S$  – эффективная величина излучающего слоя.

$$k = k_r \cdot r_n + k_c, \quad \text{I/м МПа} \quad (6.5)$$

где  $k_c$  - коэффициент ослабления лучей сажистыми частицами, образующихся в ядре факела:

$$k_c = 0,3 \cdot (2 - \alpha_t) \cdot (1,6 \cdot 10^{-3} \cdot v_t'' - 0,5) \cdot \frac{C^p}{H^p}, \text{ I/м МПа} \quad (6.6)$$

где  $C^p$ ,  $H^p$  - содержание углерода и водорода в рабочей массе топлива, при сжигании природного газа.

$$\frac{C^p}{H^p} = 0,12 \cdot \sum_n \frac{m}{n} \cdot C_m H_n \quad (6.7)$$

При сжигании твердого топлива коэффициент ослабления лучей топочной средой  $k$  определяется коэффициентом ослабления лучей трехатомными газами ( $k_r \cdot r_n$ ), золовыми частицами ( $k_z \cdot \mu_{\text{з}}$ ) и горячими коксовыми частицами ( $k_k$ ).

$$k = k_r \cdot r_n + k_{\mu} \cdot \mu_{\mu} + k_k \cdot z_1 \cdot z_2 \quad (6.8)$$

где  $k_n$  - определяется по рисунку П.9 приложения;

$\mu_{\mu}$  - см. табл. 4;

$k_k$  - коэффициент ослабления лучей коксовыми частицами равен 10 1/м МПа;

$z_1$  - коэффициент, зависящий от вида топлива, для низкорреакционных топлив (АШ, ПА, Т)  $z_1 = 1$ , для высокорреакционных: каменных, бурых углей  $z_1 = 0,5$ ;

$z_2$  - коэффициент, зависящий от способа сжигания топлива, при камерном  $z_2 = 0,1$ , при слоевом  $z_2 = 0,3$ .

Параметр М, учитывающий характер распределения температуры по высоте топки при сжигании газа и мазута определяется по формуле:

$$M = 0,54 - 0,2 \cdot X_T \quad (6.9)$$

при сжигании твердого топлива:

$$M = 0,59 - 0,5 \cdot X_T \quad (6.10)$$

где  $X_T$  - относительное местоположение максимума температуры пламени.

Для камерных топок и верхнем отводе газов:

$$X_T = \frac{h_r}{H_T} \quad (6.11)$$

где  $h_r$  - высота расположения оси горелки, см. чертеж, м;

$H_T$  - расстояние от пода топки до середины выходного окна, м.

При горизонтальном развитии факела, (для котлов серии ДЕ)  $X_T = 0,49$  для котлов серии ДЕ 25-14 ГМ ;  $X_T = 0,265$  - для остальных котлов.

Значение параметра М в формулах 6.8 и 6.9 не должно быть выше 0,5.

Полученная по рисунку П.4 действительная температура газов на выходе из топки  $v_T''$ , сравнивается с ранее принятой температурой.

Если их значения отличаются менее чем на 50<sup>0</sup>С, то уточнения расчета не требуется, в противном случае производится перерасчет. Полученная температура на выходе из топки будет численно равна температуре газов на входе в газоход. Порядок расчета топки приведен в табл.6.

Таблица 6. Расчет теплообмена в топке

Рассчитываемая величина	Обозначение	Размерность	Формула и обоснование	Расчет
1	2	3	4	5
Коэффициент избытка воздуха в топке	$\alpha_T$	-	[ табл.2]	
Теплота, вносимая дутьевым воздухом	$Q_B$	$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$	$\alpha_T \cdot V^0 \cdot C_B \cdot t_{XB}$	
Полезное тепловыделение в топке	$Q_T$	$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$	$(Q_p^0 \cdot (100 - q_3) / 100) + Q_B$	
Энтальпия	$J_{T,Л}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$	$J_{T,Л} = Q_T$	
Теоретическая температура горения	$v_{T,Л}$	°С	По J – v диаграмме, по $J_{T,Л}$	
Лучевоспринимающая поверхность	$F_{Л}$	м <sup>2</sup>	Табл. 6 (а)	
Полная поверхность стен топки	$F_{СТ}$	м <sup>2</sup>	Табл. 6 (а)	
Объем топки	$V_T$	м <sup>3</sup>	Табл. 6 (а)	
Степень экранирования топки	X	-	Ф-ла 6.1 или 6.2	
Эффективная толщина излучающего слоя	S	м	$3,6 \cdot \frac{V_T}{F_{СТ}}$	
Температура на выходе из топки	$v_T''$	°С	900÷1100	
Суммарная поглощательная способность 3-х атомных газов	$P_n \cdot S$	м · МПа	$r_n \cdot P \cdot S$ , где P=0,1МПа	
Коэффициент ослабления лучей 3-х атомных газов	$k_r$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	[рис.П.2]	
Сила поглощения потока	$k_p S$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	$k_r \cdot (P_n \cdot S)$	

Рассчитываемая величина	Обозначение	Размерность	Формула и обоснование	Расчет
1	2	3	4	5
Коэффициент теплового излучения несветящихся газов	$\xi_g$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	[рис.П.3]	
Коэффициент ослабления лучей сажистыми частицами	$k_c$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	Ф-ла 6.6	
Коэффициент теплового излучения	$\xi_{св}$	-	Ф-лы 6.4,6.5 [рис.П.3]	
Коэффициент усреднения	m	-	[табл.П.2]	
Коэффициент теплового излучения факела при сжигании мазута и газа	$\xi_{\phi}$	-	Ф-ла 6.3	
Коэффициент теплового излучения факела при сжигании твердого топлива	$\xi_{\phi}$	-	Ф-ла 6.8, рис. П.3	
Условный коэффициент загрязнения лучевоспринимающей поверхности	$\xi$	-	[табл.П.3]	
Относительный шаг труб настенного экрана	$S/d$	-	Таблица 6а	
Угловой коэффициент экрана	x	-	$1 - 0,2 \cdot (S/d - 1)$	
Коэффициент тепловой эффективности экранов	$\psi$	-	$\xi \cdot x$	
Тепловыделение в топке на 1 м. ограждающей поверхности	$\frac{B_p \cdot Q_T}{F_{ст}}$	$\frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$	$\frac{B_p \cdot Q_T}{F_{ст}}$	
Параметр	M	-	Формула 6.9 или 6.10	
Температура газов на выходе из топки	$v''_T$	°C	[рис.П.4]	

Рассчитываемая величина	Обозначение	Размерность	Формула и обоснование	Расчет
1	2	3	4	5
Энтальпия газов на выходе из топки	$J_t''$	$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$	По $J - v$ диаграмме	
Коэффициент сохранения теплоты	$\varphi$		Ф-ла 5.11	
Количество теплоты, воспринятое в топке	$Q_l$	$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$	$\varphi \cdot (Q_t - J_t'')$	
Среднее тепловое напряжение лучевоспринимающей поверхности нагрева	$g_l$	$\frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$	$\frac{B_p \cdot Q_l}{F_l}$	
Теплонапряжение топочного объема	$g_v$	$\frac{\text{кВт}}{\text{м}^3}$	$\frac{B_p \cdot Q_p^p}{V_t}$	

#### 7. Расчет теплообмена в газоходе парового котла.

Целью расчета является определение температуры продуктов сгорания  $v_t''$  на выходе из газохода и количество теплоты, воспринятое поверхностью нагрева газохода.

Из справочной литературы [4,5] и с чертежа парового котла в таблицу 7 заносятся конструктивные основные характеристики газохода.

Таблица 7. Конструктивные характеристики газохода

Наименование величины	Обоз нач ение	Размер ность	ДЕ 4	ДЕ 6,5	ДЕ 10	ДЕ 16	ДЕ – 25	
							I <sub>г</sub>	П <sub>г</sub>
Расположение труб			коридорное				Шах м.	Кори дор.
Поверхность нагрева	Н	м <sup>2</sup>	48,51	68,04	117,6 9	156,0	16,36	196,0
Диаметр труб	d	мм	51	51	51	51	51	51
Расчетные шаги труб:								
поперечный	S <sub>1</sub>	мм	110	110	110	110	220	110
продольный	S <sub>2</sub>	мм	100	100	100	100	95	95
Число труб, пересекаемых потоком газов	Z <sub>1</sub>	-	7	7	8	8	5	8

Число рядов труб по ходу газов	$Z_2$	-	19	27	40	>10	10	55
Живое сечение для прохода газов	$F_r$	$m^2$	0,338	0,348	0,41	0,713	1,245	0,851
Эффективная толщина излучающего слоя	$S$	$m$	$\left(1,87 \cdot \frac{S_1 + S_2}{d} - 4,1\right)d$					

Если конвективная поверхность котла состоит из двух газоходов, то сначала выполняется расчет первого газохода, затем по аналогии – второго газохода.

При расчете конвективной поверхности котла предварительно принимают два значения температуры на выходе из газохода. Например: для котла с одним газоходом можно принять  $\nu_1''=500$  °С и  $\nu_2''=300$  °С. При расчете двух газоходов принимаем для первого газохода  $\nu_1''=700$  °С и  $\nu_2''=400$  °С, а для второго -  $\nu_1''=400$  °С и  $\nu_2''=200$  °С. По двум принятым температурам проводят параллельно расчеты. Порядок проведения расчетов приведен в таблице 8.

После проведения расчетов действительную температуру продуктов сгорания за газоходом определяют графическим путем по величинам тепловосприятия, рассчитанных по уравнениям теплового баланса  $Q_{\text{б}}$  и теплопередачи  $Q_{\text{т}}$  при двух ранее принятых температурах  $\nu_1''$  и  $\nu_2''$ . Порядок определения искомого значения  $\nu_A''$  показан на рис.3.

Для получения действительной температуры газов на выходе из газохода прямые  $Q_{\text{б}}$  и  $Q_{\text{т}}$  могут быть продлены в любом направлении до пересечения. Полученное действительное значение температуры продуктов сгорания на выходе из газохода будет являться температурой на входе в следующую поверхность нагрева (во второй газоход, если он есть или в экономайзер).

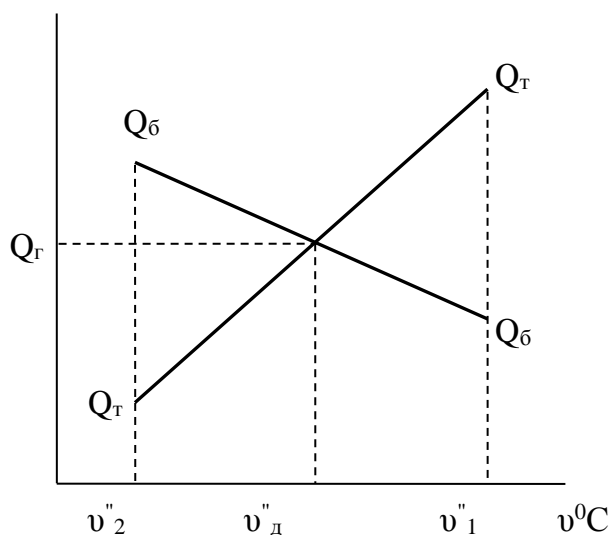


Рис .3. Определение действительной температуры на выходе из газохода.

Таблица 8.Расчет теплообмена в газоходе.

Рассчитываемая величина	Обозначение	Размерность	Формула и обоснование	Расчет
1	2	3	4	5
Температура газов на входе	$v'$	$^{\circ}\text{C}$	из расчета топки $v'_г = v''_г$	
Энтальпия	$J'$	$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$	$J-v$ диаграмма (по графику газохода)	
Температура газов на выходе из газохода	$v''$	$^{\circ}\text{C}$	принимается	
Энтальпия	$J''$	$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$	$J-v$ диаграмма	
Энтальпия присоса воздуха	$\Delta J_B$	$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$	$\Delta J_B = \Delta \alpha_r \cdot V_o \cdot c_B \cdot T_{XB}$ $\Delta \alpha_r$ -рис.1; $c_B = 1,29$ ; $T_{XB} = 30^{\circ}\text{C}$	
Коэффициент сохранения теплоты	$\varphi$		Ф-ла 5.11	
Тепловосприятие газохода по уравнению теплового баланса	$Q_б$	$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$	$\varphi \cdot (J' - J'' + \Delta J_B)$	
Средняя температура газов	$v_{cp}$	$^{\circ}\text{C}$	$\frac{(v' + v'')}{2}$	
Средняя скорость газов в газоходе	$W_{cp}$	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	$\frac{B_p \cdot V_r \cdot (273 + v_{cp})}{F_r \cdot 273}$ ; $B_p$ – ф-ла 5.13; $V_r$ -табл.4; для	



Рассчитываемая величина	Обозначение	Размерность	Формула и обоснование	Расчет
1	2	3	4	5
			газохода $F_r$ – табл.7	
Коэффициент теплоотдачи конвекцией	$\alpha_k$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	[рис.П.5 (1,2 ч.) или П.6 (1,2 ч.)], в зависимости от расположения труб в газоходе.	
Произведение	$P_n \cdot S$	м · МПа	$r_n \cdot P \cdot S$ , где $P=0,1$ МПа; $S$ -табл.7; $r_n$ -табл.4; для газохода	
Коэффициент ослабления лучей 3-х атомных газов	$k_r$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	[рис.П.2]	
Оптическая толщина	$k_p S$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	$k_r \cdot P_n \cdot S$	
Коэффициент теплового излучения	$\xi$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	[рис.П.3]	
Температура обогреваемой среды	$t_n$	°С	температура насыщения при давлении в барабане котла (таблица П6)	
Температура наружной поверхности загрязненной стенки	$t_3$	°С	$t_n + \Delta t$ $\Delta t$ - [табл.П.5]	
Коэффициент теплоотдачи излучением	$\alpha_l$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	[рис.П.7]	
Коэффициент тепловой эффективности котельного пучка	$\psi$	-	[табл.П.4]	
Коэффициент теплопередачи	$K$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$\psi \cdot (\alpha_k + \alpha_l)$	

Рассчитываемая величина	Обозначение	Размерность	Формула и обоснование	Расчет
1	2	3	4	5
Температурный напор	$\Delta t$	$^{\circ}\text{C}$	$\frac{v' - v''}{2,3 \cdot \lg \frac{(v' - t_n)}{(v'' - t_n)}}$	
Тепловосприятие газохода по уравнению теплопередачи	$Q_T$	$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{K \cdot \Delta t \cdot H}{10^3 \cdot V_p}$ Где H (табл. 7)	

## 8. Тепловой расчет экономайзера

При поверочном расчете чугунного водяного экономайзера температура газов на входе  $v$  принимается из теплового расчета газохода, температура газов на выходе  $v_3$  была предварительно принята из табл.1,  $v''_3 = v_{yx}$ .

Целью расчета является определение поверхности нагрева экономайзера  $H_3$ . Экономайзер komponуется из отдельных ребристых чугунных труб длиной 2 метра, с поверхностью нагрева с газовой стороны  $f_3 = 2,95 \text{ м}^2$  и живым сечением для прохода газов  $f = 0,12 \text{ м}^2$ .

Проходное сечение для газового потока можно определить по формуле:

$$F_{\text{эк}} = n \cdot f, \text{ м}^2 \quad (8.1)$$

где  $n$  – число труб в ряду экономайзера. Для ДЕ 4 –  $n = 2$ ; для ДЕ 6,5 –  $n = 3$ ; для ДЕ 10 –  $n = 5$ ; для ДЕ 16 –  $n = 7$ ; для ДЕ 25 –  $n = 9$ .

Порядок расчета экономайзера приведен в таблице 9.

Для котлов DE 16-14 ГМ и DE 25-14 ГМ длина ребристых труб равна 3 м.  $f = 0,184 \text{ м}^2$ ;  $f_3 = 4,49 \text{ м}^2$ .

Таблица 9. Расчет экономайзера.

Рассчитываемая величина	Обозначение	Размерность	Формула и обоснование	Расчет
1	2	3	4	5
Температура газов на входе	$v'_3$	°C	из расчета газохода $v'_3 = v''_d$	
Энтальпия	$J'_3$	$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$	J – v диаграмма	
Температура газов на выходе	$v''_3$	°C	Табл.1, $v''_3 = v_{yx}$	
Энтальпия	$J''_3$	$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$	J – v диаграмма	
Коэффициент сохранения теплоты	$\varphi$		Ф-ла 5.11	
Тепловосприятие водяного экономайзера	$Q_3$	$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$	$\varphi \cdot (J'_3 - J''_3 + \Delta\alpha \cdot V^0 \cdot C_B \cdot t_{xb})$	
Количество питательной воды проходящей через экономайзер	$D_3$	$\frac{\text{кг}}{\text{ч}}$	паропроизводительность котла	
Температура питательной воды на входе в экономайзер	$t'_3$	°C		104
Температура питательной воды на выходе	$t''_3$	°C	$t'_3 + \frac{3600 \cdot Q_3 \cdot B_p}{c \cdot D_3}$ $B_p$ – ф-ла 5.13; $c=4,19 \text{ КДж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$	
Разность температур	-	°C	$t_h - t''_3$	
Средняя температура газов	$v_{cp}$	°C	$\frac{(v'_3 + v''_3)}{2}$	
Средняя скорость газов	$W_{cp}$	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	$\frac{B_p \cdot V_r \cdot (v_{cp} + 273)}{F_{эк} \cdot 273}$ $F_{эк}$ – ф-ла 8.1 $V_r$ – табл. 4( для экономайзера)	
Температурный напор	$\Delta t$	°C	$\frac{(v'_3 + v''_3)}{2} - \frac{t'_3 + t''_3}{2}$	
Коэффициент теплопередачи	$k_3$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	[рис.П.8]	
Расчетная поверхность нагрева	$H_3$	$\text{м}^2$	$\frac{10^3 \cdot Q_3 \cdot B_p}{k_3 \cdot \Delta t}$	
Число труб в ряду	$n$	шт.	Из ф-лы 8.1	

Рассчитываемая величина	Обозначение	Размерность	Формула и обоснование	Расчет
1	2	3	4	5
Число горизонтальных рядов	m	шт.	$\frac{H_3}{n \cdot f_3}$	

### 9. Определение невязки теплового баланса котла

Невязка теплового баланса котла:

$$\Delta Q = Q_p^p \cdot \eta_{бр} - (Q_{л} + Q_{г} + Q_{3}) \quad (9.1)$$

где  $Q_{л}$  – таблица 6;

$Q_{г}$  – тепловосприятие газохода при  $v_g$ ; ( для ДЕ-25 две величины  $Q_{г}$  )

$Q_3$  – таблица 9.

Относительная невязка:

$$/\delta Q/ = \frac{/\Delta Q/}{Q_p^p} \cdot 100\% \leq 5\% \quad (9.2)$$

Невыполнение условия требует пересчета теплового баланса котла.

10.Окончательные данные поверочного расчета парового котла рекомендуется свести в таблицу 10.

Таблица 10. Данные теплового расчета парового котла ....., топливо - .....,  $Q_p = \dots \text{МДж/кг(м}^3\text{)}$ , расход  $V_p = \dots \text{кг/с}$ .

среда, поверхность нагрева	Величина	Поверхность нагрева					
		топка		газоход		экономайзер	
		ВХОД	ВЫХОД	ВХОД	ВЫХОД	ВХОД	ВЫХОД
Рабочая среда(вода)	Температура $t$ , °С				$t$ котлово й воды	104	
Продукты сгорания	Температура $v$ , °С						
	Энтальпия $J$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$						
	Тепловосприятие поверхности $Q$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$						
	Скорость газов	-					
	Коэффициент теплопередачи $k$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	-					
Поверхность	Поверхность нагрева $F$ , $\text{м}^2$	-		-			

### Библиографический список

1. Тепловой расчёт котельного агрегата (нормативный метод), под редакцией Н.В Кузнецова, В. В. Митора, И.Е. Дубовицкого и др. – 2 – е изд., переработанное – М.: Энергия. 1973. – 295с.
2. Теплогенерирующие установки: Учебник для вузов / Г.Н. Делягин, В.И. Лебедев, В.А. Пермяков. - М.: Стройиздат, 1986. - 559 с.
3. Компонировка и тепловой расчет парового котла.: Учебное пособие для вузов./ Ю.М. Липов, Ю.Ф. Самойлов, Т.В. Вишневский - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 208с.
4. Справочник по котельным установкам малой производительности / К.Ф. Роддатис, А.Н. Полтарецкий - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 487 с.
5. Эстеркин, Р. И. Промышленные котельные установки / Р. И. Эстеркин. - Л.: Энергоатомиздат, 1985. - 400 с.
6. Гусев. Ю. П. Основы проектирования котельных установок / Ю. П. Гусев. - Мл Стройиздат, 1973. - 248 с.
7. Аэродинамический расчет котельных установок (нормативный метод} / под ред. С. И. Мочана. - Л.: Энергия, 1977. - 256 с.

## Приложения

Таблица П 1. Средние теплоемкости воздуха, газов, водяных паров и золы, кДж/м<sup>3</sup> К.

$\vartheta$	$C_B$	$C_{RO_2}$	$C_{N_2}$	$C_{H_2O}$	$C_{эл}$	$\vartheta$	$C_B$	$C_{RO_2}$	$C_{N_2}$	$C_{H_2O}$	$C_{эл}$
100	1,32	1,70	1,30	1,49	0,81	1300	1,47	2,28	1,43	1,80	1,04
300	1,34	1,86	1,31	1,54	0,88	1500	1,49	2,33	1,44	1,85	1,16
500	1,37	1,98	1,33	1,59	0,92	1700	1,50	2,37	1,46	1,90	1,21
700	1,40	2,08	1,35	1,64	0,95	1900	1,52	2,41	1,47	1,94	1,23
900	1,43	2,17	1,38	1,69	0,97	2100	1,54	2,44	1,48	1,98	1,26
1100	1,46	2,23	1,41	1,74	1,0	2300	1,55	2,46	1,50	2,02	-

Рисунок П.1 J-V диаграмма.

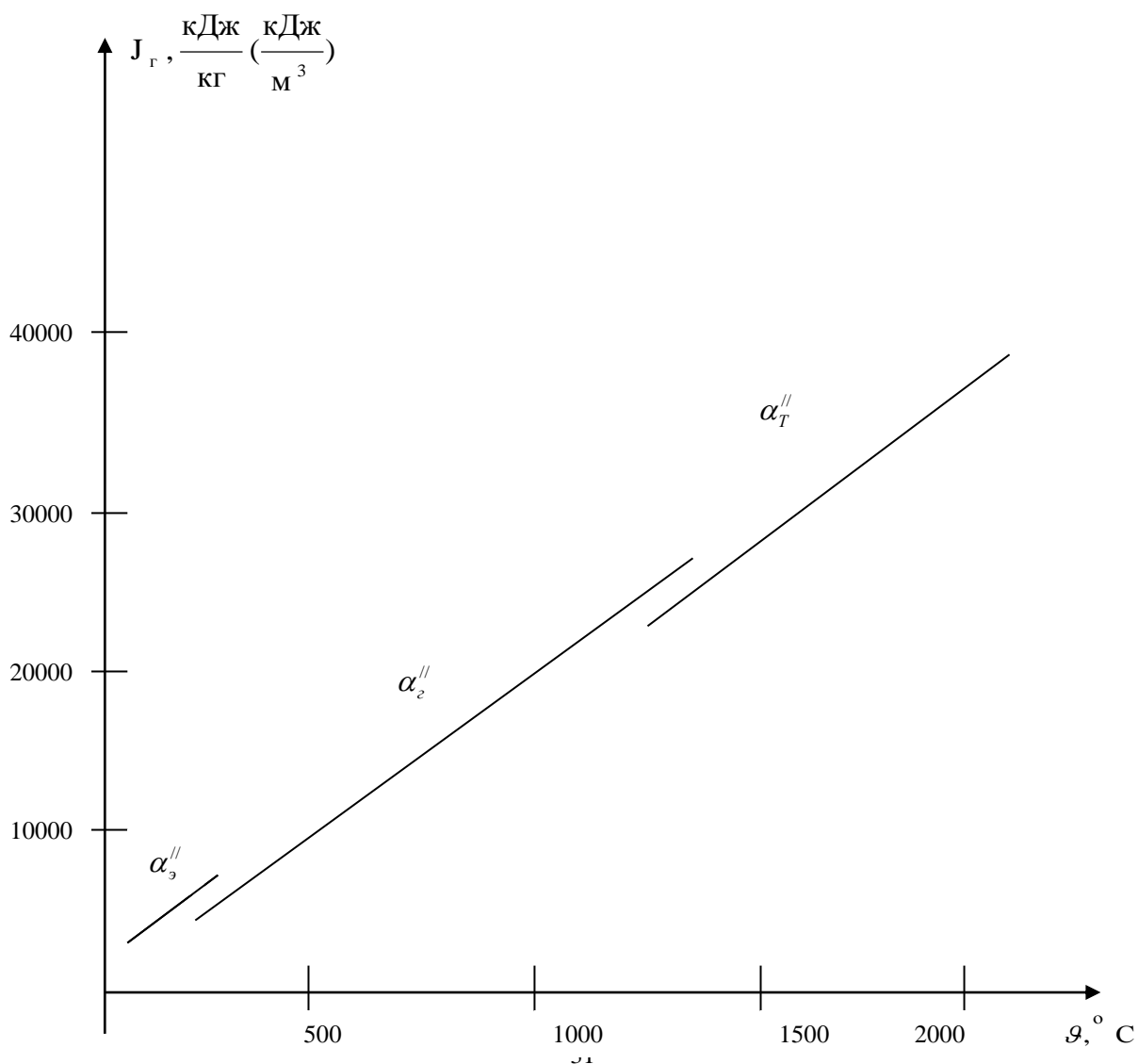


Таблица П 2. Доля топочного объема, заполненная светящимся факелом.

Сжигаемое топливо	Коэффициент
Светящийся газовый факел	0,1
Мазутное пламя	0,55

Таблица П 3. Коэффициент загрязнения лучевоспринимающих поверхностей нагрева.

Вид лучевоспринимающей поверхности	Топливо		
	Природный газ	Мазут	Твердое топливо, сжигаемое в слое
Гладкотрубные плавниковые экраны	0,65	0,55	0,6

Таблица П 4. Коэффициент тепловой эффективности.

Поверхность нагрева	Топливо		
	Природный газ	Мазут	Твердое топливо
Котельные пучки	0,85	0,65	0,65

Таблица П 5. Поправка для определения температуры.

Вид сжигаемого топлива	$\Delta t$
При сжигании твердого топлива для шахматных и коридорных пучков труб, мазута.	60°C
При сжигании газа.	25°C



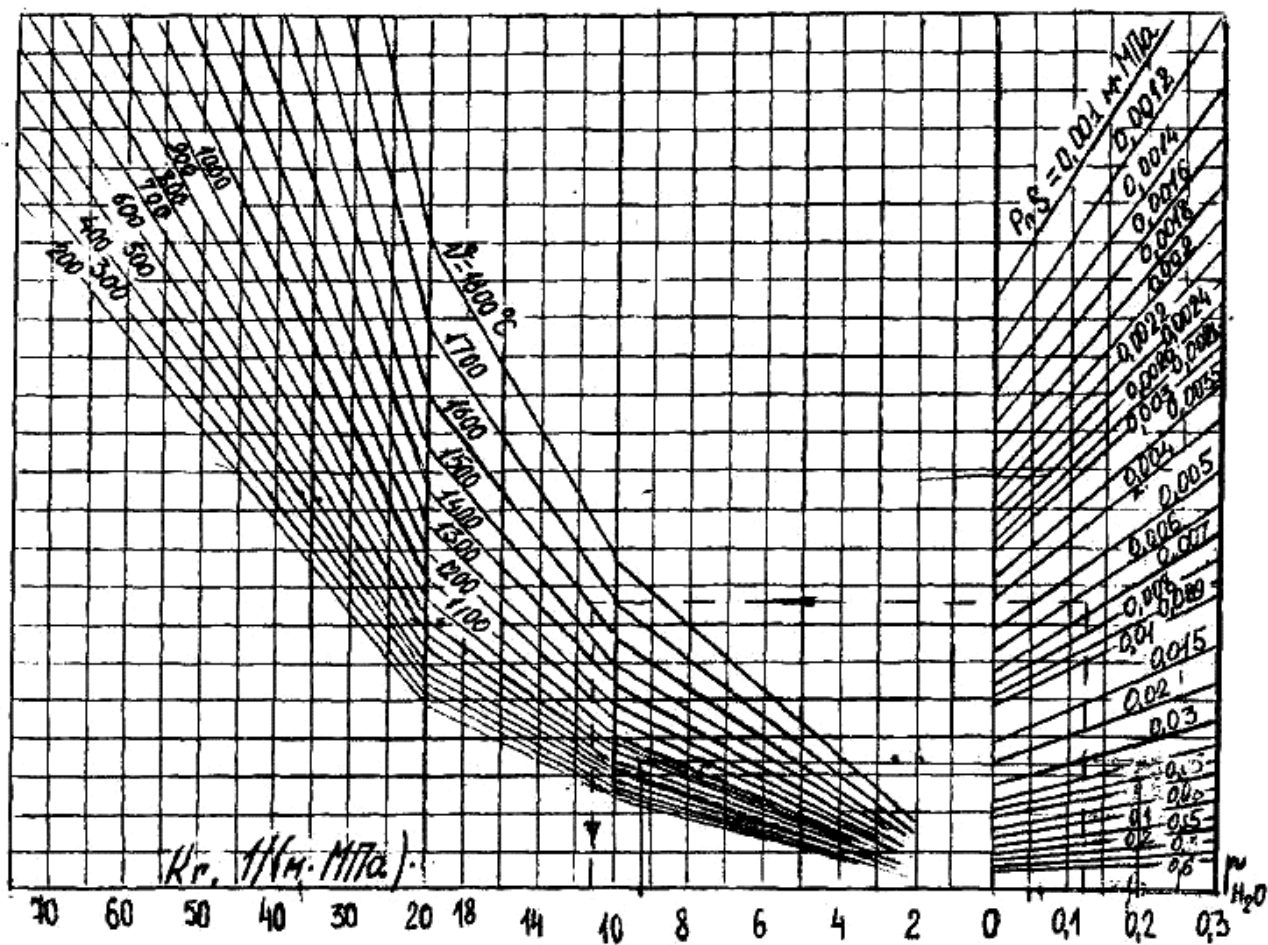


Рис. П. 2.  
К ОПРЕДЕЛЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТА ОСЛАБЛЕНИЯ ЛУЧЕЙ  
ТРЕХАТОМНЫМИ ГАЗАМИ

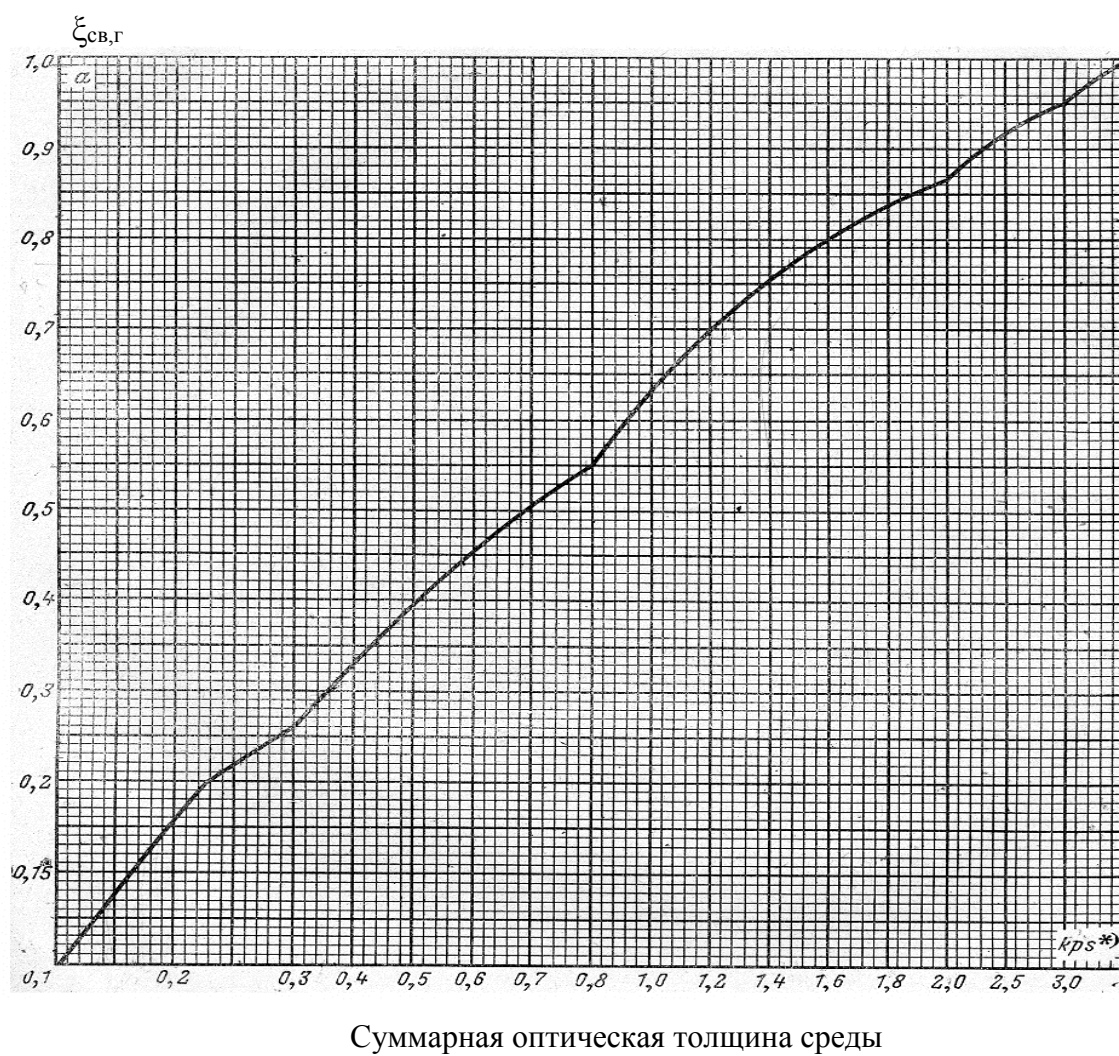
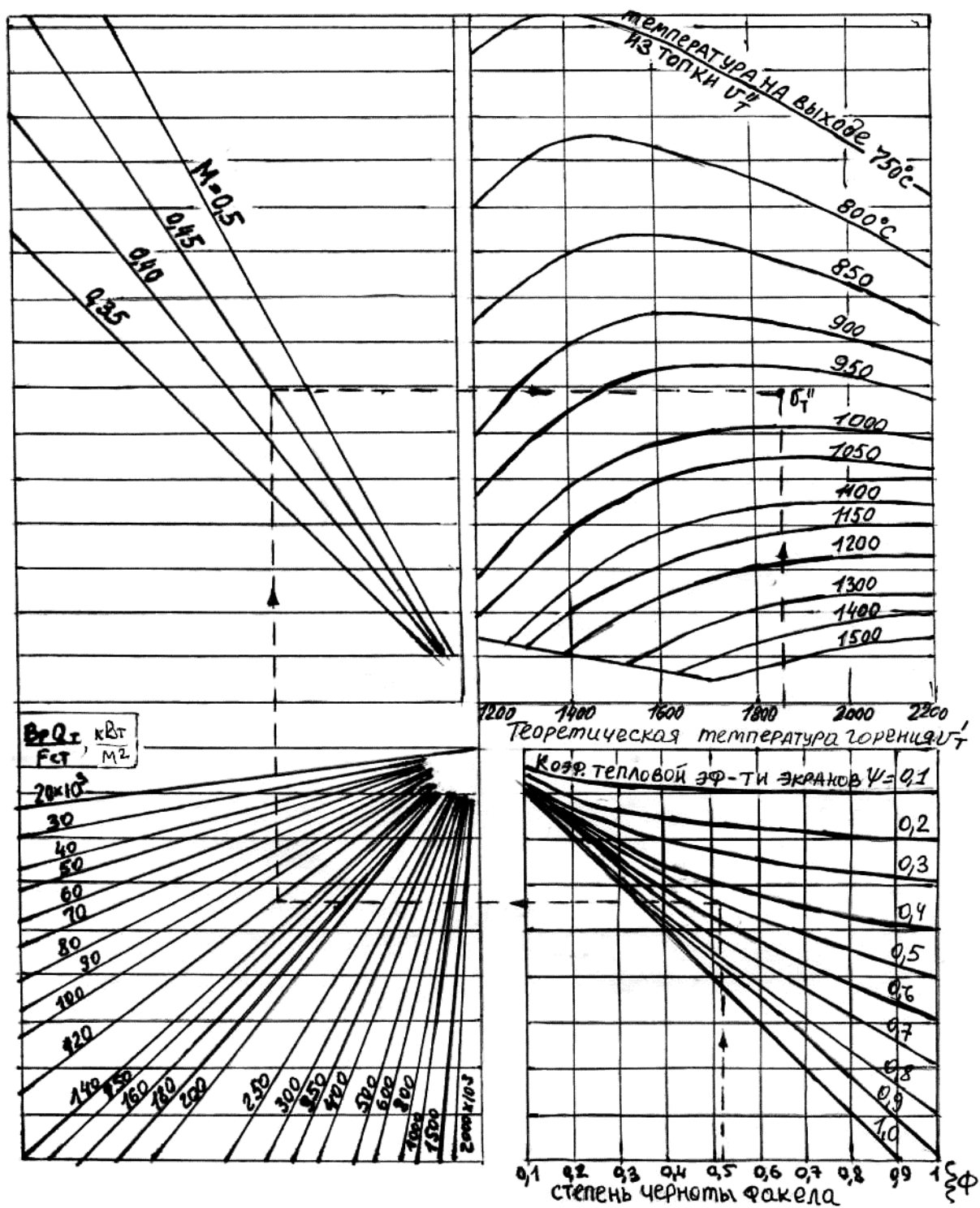


Рис. П. 3. СТЕПЕНЬ ЧЕРНОТЫ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ



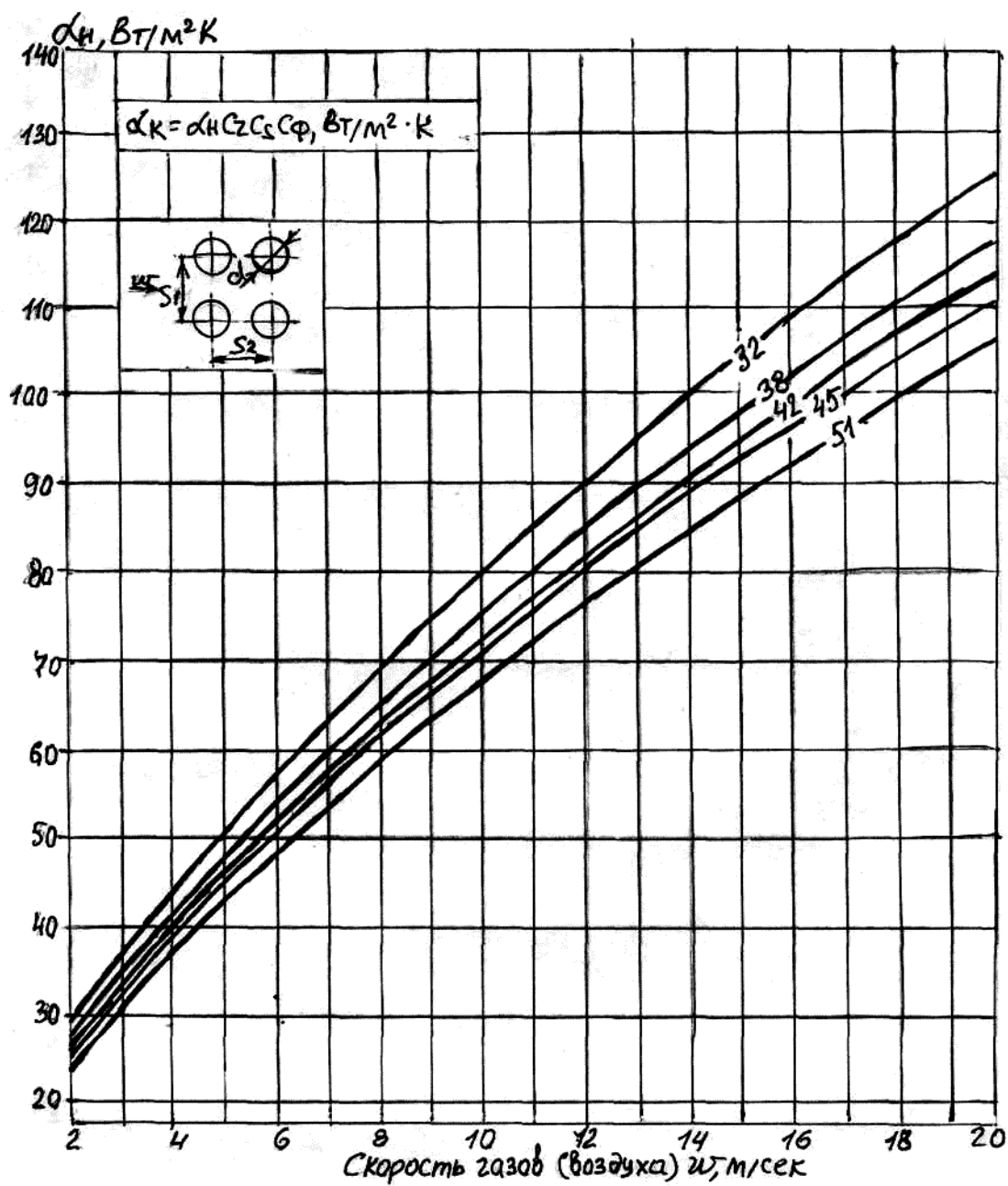


Рис. П. 5. КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛООТДАЧИ КОНВЕКЦИЕЙ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ОМЫВАНИИ КОРИДОРНЫХ ГЛАДКОТРУБНЫХ ПУЧКОВ (1 часть)

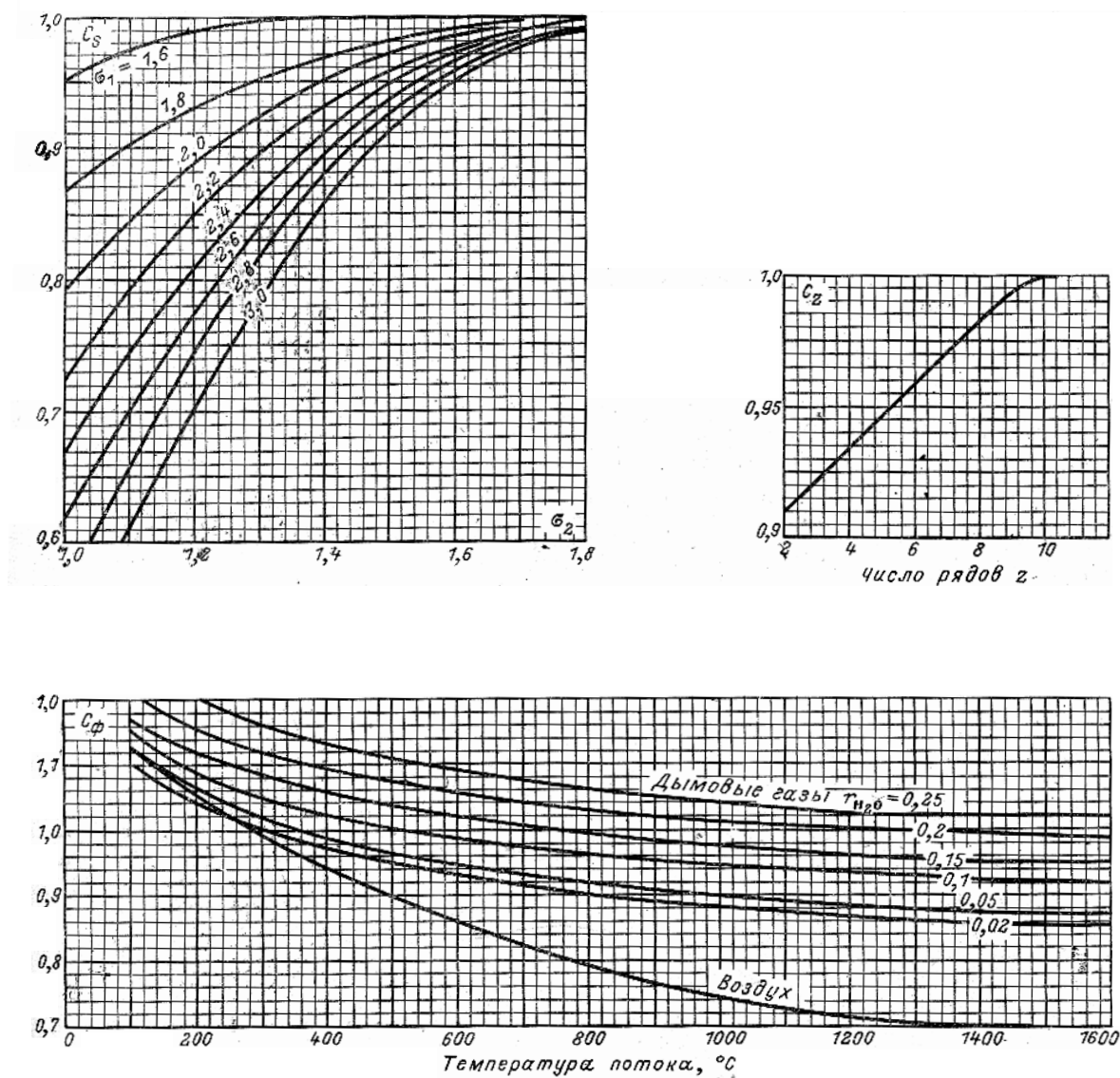


Рис. П. 5. КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛООТДАЧИ КОНВЕКЦИЕЙ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ОМЫВАНИИ КОРИДОРНЫХ ГЛАДКОТРУБНЫХ ПУЧКОВ (2 часть)

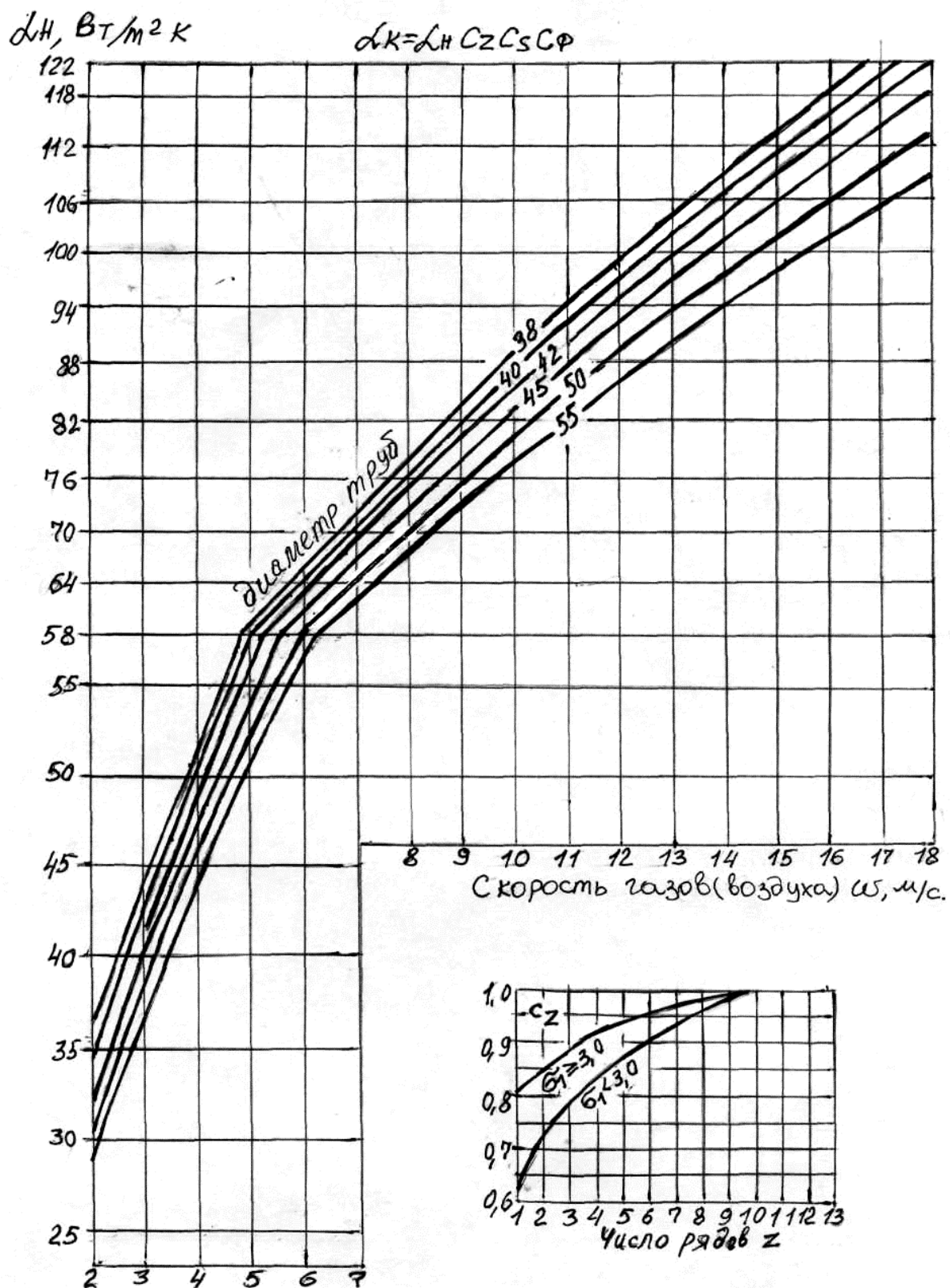


Рис. П. 6. КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛООТДАЧИ КОНВЕКЦИЕЙ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ОМЫВАНИИ ШАХМАТНЫХ ГЛАТКОТРУБНЫХ ПУЧКОВ (1 ч.)

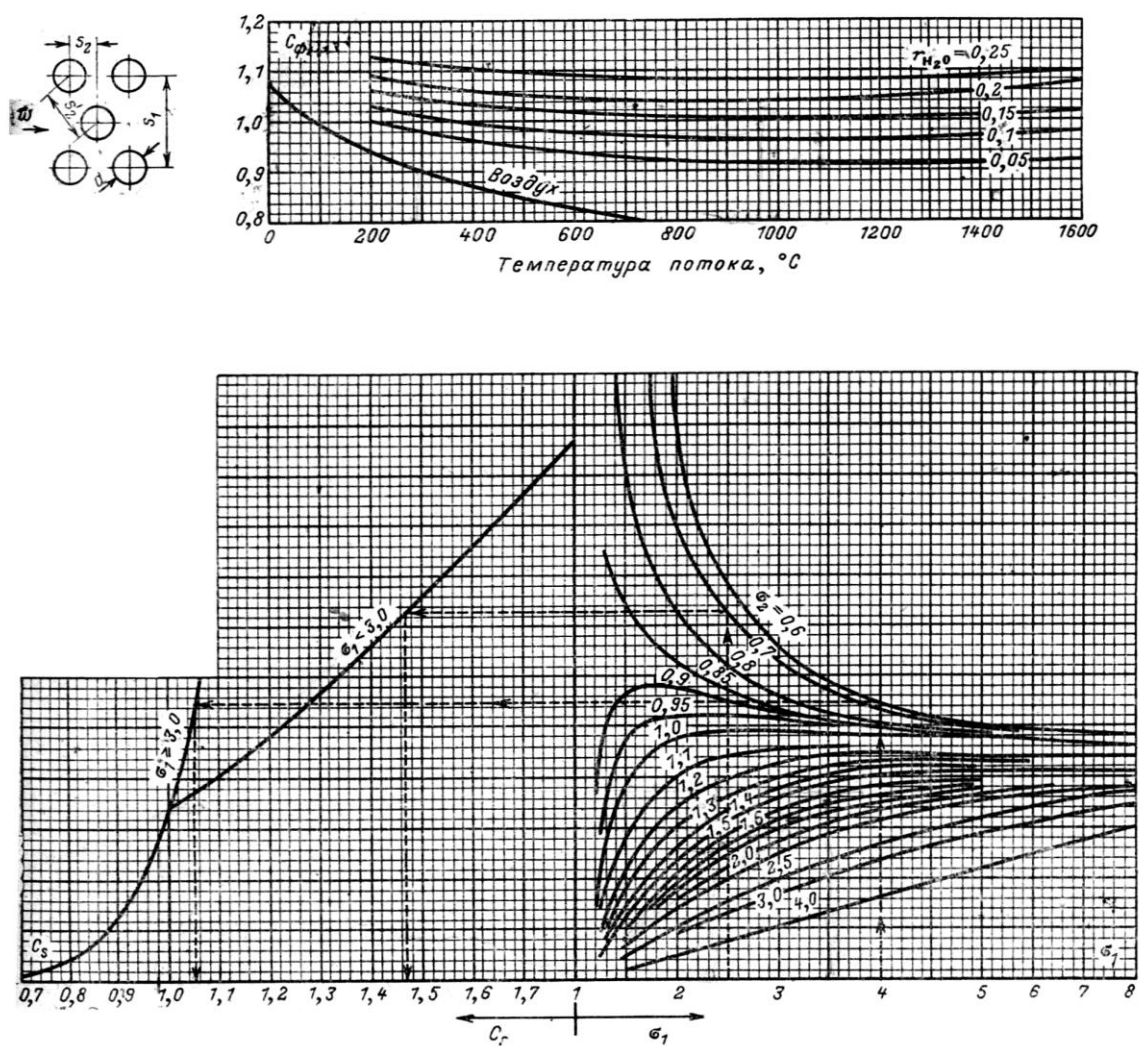


Рис. П. 6. КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛООТДАЧИ КОНВЕКЦИЕЙ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ОМЫВАНИИ ШАХМАТНЫХ ГЛАТКОТРУБНЫХ ПУЧКОВ (2 часть)



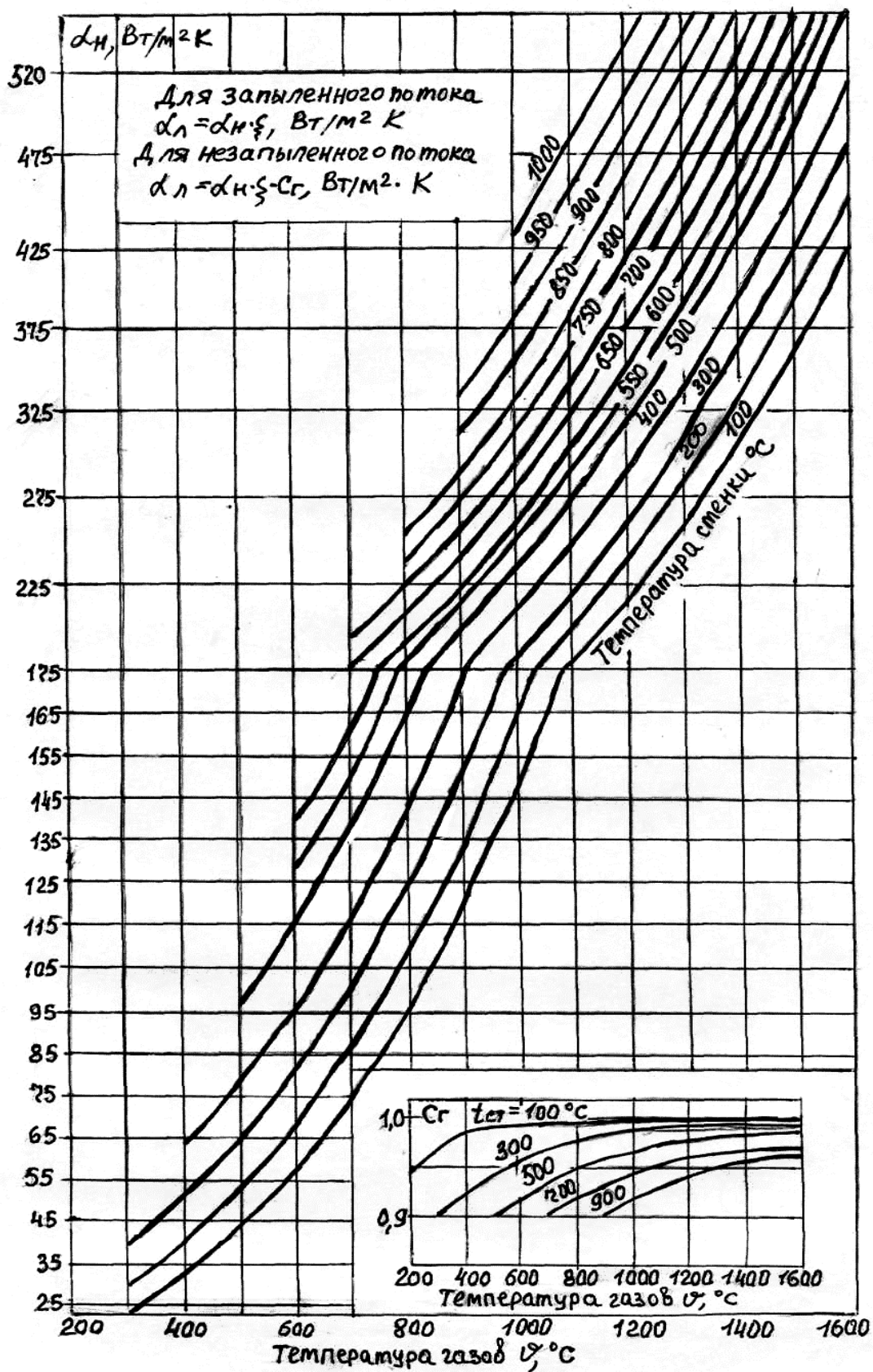


Рис. П.7. КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛООТДАЧИ ИЗЛУЧЕНИЕМ



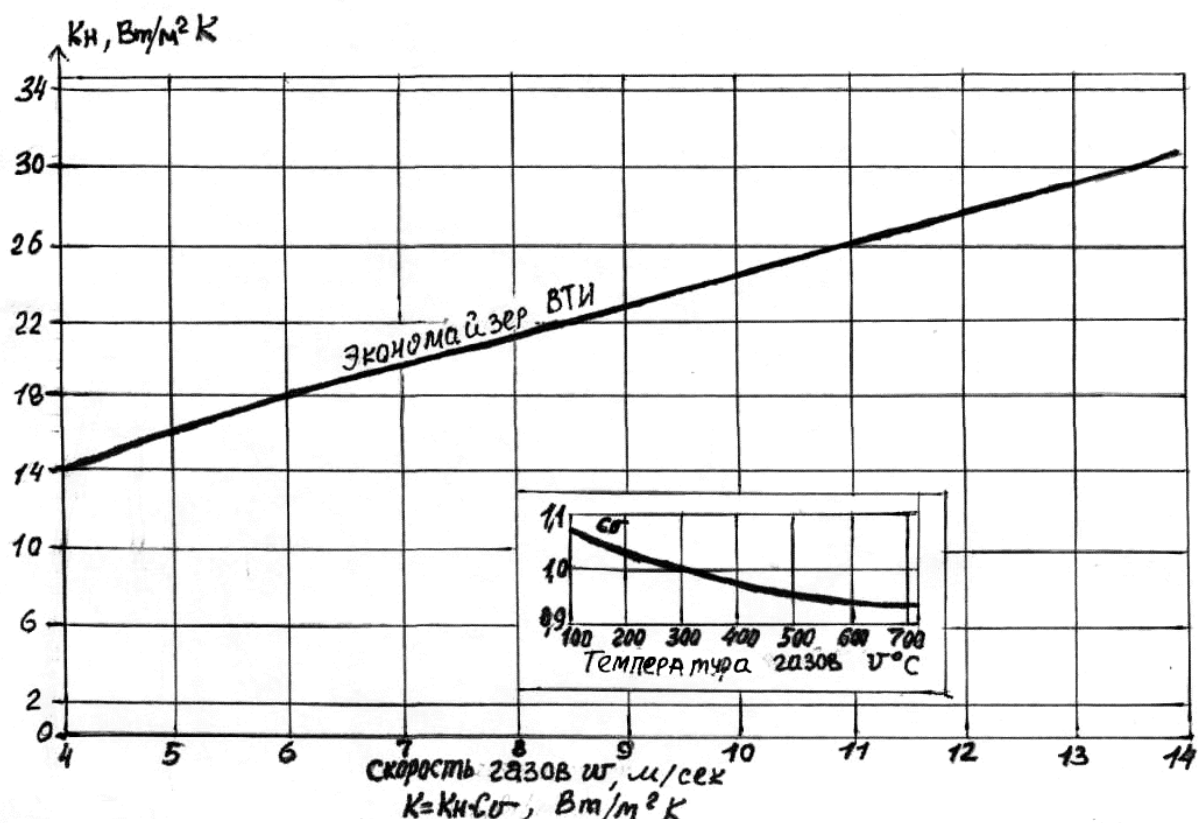


Рис. П.8. КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ЧУГУННЫХ РЕБРИСТЫХ ВОДЯНЫХ ЭКОНОМАЙЗЕРОВ ВТИ

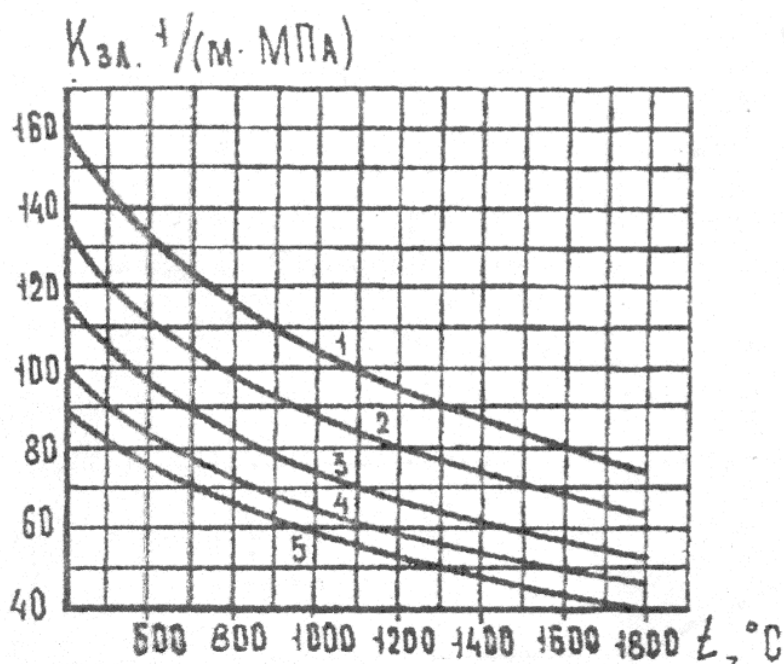


Рис П9. К ОПРЕДЕЛЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТА ОСЛАБЛЕНИЯ ЛУЧЕЙ  
ЗОЛОВЫМИ ЧАСТИЦАМИ.

- 1 – при сжигании пыли в циклонных топках;  
 2 - при сжигании углей, размолотых в шаровых барабанных мельницах;  
 3 - при сжигании углей, размолотых в среднеходовых  
и молотковых мельницах и мельницах-вентиляторах;  
 4 - при сжигании дробленки в циклонных топках и топлива  
в слоевых топках;  
 5 - при сжигании торфа в камерных топках.

Таблица. Пб. Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (аргумент – давление)

p, бар	t, °C	v', м³/кг	v'', м³/кг	h', кДж/кг	h'', кДж/кг	r, кДж/кг	s', кДж/(кг·К)	s'', кДж/(кг·К)
0,010	6,982	0,0010001	129,208	29,33	2513,8	2484,5	0,1060	8,9756
0,015	13,034	0,0010006	87,982	54,71	2525,0	2470,3	0,1956	8,8278
0,020	17,511	0,0010012	67,006	73,45	2533,2	2459,8	0,2606	8,7236
0,025	21,094	0,0010020	54,256	88,44	2539,7	2451,3	0,3119	8,6431
0,030	24,098	0,0010027	45,668	101,00	2545,2	2444,2	0,3543	8,5776
0,035	26,692	0,0010033	39,480	111,84	2549,9	2438,1	0,3907	8,5224
0,040	28,981	0,0010040	34,803	121,41	2554,1	2432,7	0,4224	8,4747
0,045	31,034	0,0010046	31,142	129,98	2557,8	2427,8	0,4507	8,4327
0,050	32,90	0,0010052	28,196	137,77	2561,2	2423,4	0,4762	8,3952
0,055	34,60	0,0010058	25,772	144,91	2564,2	2419,3	0,4995	8,3613
0,060	36,18	0,0010064	23,742	151,50	2567,1	2415,6	0,5209	8,3305
0,065	37,65	0,0010069	22,017	157,64	2569,7	2412,1	0,5401	8,3022
0,070	39,02	0,0010074	20,532	163,38	2572,2	2408,8	0,5591	8,2760
0,075	40,32	0,0010079	19,241	168,77	2574,5	2405,7	0,5763	8,2517
0,080	41,53	0,0010084	18,106	173,87	2576,7	2402,8	0,5926	8,2289
0,085	42,69	0,0010089	17,102	178,69	2578,8	2400,1	0,6079	8,2076
0,090	43,79	0,0010094	16,206	183,28	2580,8	2397,5	0,6224	8,1875

$p$ , бар	$t$ , °C	$v'$ , м³/кг	$v''$ , м³/кг	$h'$ , кДж/кг	$h''$ , кДж/кг	$g$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/(кг·К)	$s''$ , кДж/(кг·К)
0,095	44,83	0,0010098	15,402	187,66	2582,6	2394,9	0,6361	8,1685
0,100	45,83	0,0010102	14,676	191,84	2584,4	2392,6	0,6493	8,1505
0,11	47,71	0,0010111	13,418	199,68	2587,8	2388,1	0,6738	8,1171
0,12	49,45	0,0010119	12,364	206,94	2590,9	2384,0	0,6963	8,0867
0,13	51,06	0,0010126	11,467	213,70	2593,7	2380,0	0,7172	8,0588
0,14	52,58	0,0010133	10,696	220,03	2596,4	2376,4	0,7367	8,0330
0,15	54,00	0,0010140	10,025	225,98	2598,9	2372,9	0,7549	8,0089
0,16	55,34	0,0010147	9,4348	231,60	2601,3	2369,7	0,7721	7,9865
0,17	56,62	0,0010154	8,9128	236,93	2603,5	2366,6	0,7883	7,9655
0,18	57,83	0,0010160	8,4470	242,00	2605,7	2363,7	0,8036	7,9456
0,19	58,98	0,0010166	8,0288	246,83	2607,7	2360,9	0,8182	7,9269
0,20	60,09	0,0010172	7,6515	251,46	2609,6	2358,1	0,8321	7,9092
0,21	61,15	0,0010178	7,3091	255,89	2611,5	2355,6	0,8454	7,8923
0,22	62,16	0,0010183	6,9967	260,14	2613,2	2353,1	0,8581	7,8762
0,23	63,14	0,0010189	6,7110	264,24	2614,9	2350,7	0,8703	7,8609
0,24	64,08	0,0010194	6,4483	268,18	2616,6	2348,4	0,8820	7,8462
0,25	64,99	0,0010199	6,2060	271,99	2618,1	2346,1	0,8932	7,8321
0,26	65,87	0,0010204	5,9819	275,68	2619,7	2344,0	0,9041	7,8186
0,27	66,72	0,0010209	5,7739	279,24	2621,1	2341,9	0,9146	7,8057
0,28	67,55	0,0010214	5,5804	282,70	2622,6	2339,9	0,9248	7,7932
0,29	68,35	0,0010219	5,3998	286,05	2624,0	2337,9	0,9346	7,7811
0,30	69,12	0,0010223	5,2308	289,31	2625,3	2336,0	0,9441	7,7695
0,32	70,62	0,0010232	4,9238	295,55	2627,8	2332,2	0,9623	7,7474
0,34	72,03	0,0010241	4,6518	301,48	2630,3	2328,8	0,9795	7,7266
0,36	73,37	0,0010249	4,4092	307,12	2632,5	2325,4	0,9958	7,7070
0,38	74,66	0,0010257	4,1915	312,50	2634,7	2322,2	1,0113	7,6886
0,40	75,89	0,0010265	3,9949	317,65	2636,8	2319,2	1,0261	7,6711
0,42	77,06	0,0010272	3,8165	322,60	2638,8	2316,2	1,0403	7,6544
0,44	78,19	0,0010280	3,6537	327,36	2640,7	2313,3	1,0539	7,6386
0,46	79,28	0,0010287	3,5047	331,95	2642,5	2310,5	1,0669	7,6234
0,48	80,33	0,0010294	3,3678	335,35	2644,3	2308,9	1,0794	7,6090
0,50	81,35	0,0010301	3,2415	340,57	2646,0	2305,4	1,0912	7,5951
0,55	83,74	0,0010317	2,9648	350,61	2650,0	2299,4	1,1194	7,5627
0,60	85,95	0,0010333	2,7329	359,93	2653,6	2293,7	1,1454	7,5332
0,65	88,02	0,0010347	2,5357	368,62	2657,0	2288,4	1,1696	7,5061
0,70	89,96	0,0010361	2,3658	376,77	2660,2	2283,4	1,1921	7,4811
0,75	91,78	0,0010375	2,2179	384,45	2663,2	2278,8	1,2132	7,4577
0,80	93,51	0,0010387	2,0879	391,72	2666,0	2274,3	1,2330	7,4360
0,85	95,14	0,0010400	1,9728	398,63	2668,6	2270,0	1,2518	7,4155
0,90	96,71	0,0010412	1,8701	405,21	2671,1	2265,9	1,2696	7,3963
0,95	98,20	0,0010423	1,7779	411,49	2673,5	2262,0	1,2865	7,3781
1,00	99,63	0,0010434	1,6946	417,51	2675,7	2258,2	1,3027	7,3608
1,1	102,32	0,0010455	1,5501	428,84	2680,0	2251,2	1,3330	7,3288
1,2	104,81	0,0010476	1,4289	439,36	2683,8	2244,4	1,3609	7,2996
1,3	107,13	0,0010495	1,3258	449,19	2687,4	2238,2	1,3868	7,2728
1,4	109,32	0,0010513	1,2370	458,42	2690,8	2232,4	1,4109	7,2480
1,5	111,37	0,0010530	1,1597	467,13	2693,9	2226,8	1,4336	7,2248
1,6	113,32	0,0010547	1,0917	475,38	2696,8	2221,4	1,4550	7,2032
1,7	115,17	0,0010563	1,0315	483,22	2699,5	2216,3	1,4752	7,1829
1,8	116,93	0,0010579	0,97775	490,70	2702,1	2211,4	1,4944	7,1638
1,9	118,62	0,0010594	0,92951	497,85	2704,6	2206,8	1,5127	7,1458
2,0	120,23	0,0010608	0,88592	504,7	2706,9	2202,2	1,5301	7,1286
2,1	121,78	0,0010623	0,84636	511,3	2709,2	2197,9	1,5468	7,1123
2,2	123,27	0,0010636	0,81027	517,6	2711,3	2193,7	1,5628	7,0967
2,3	124,71	0,0010650	0,77724	523,7	2713,3	2189,6	1,5781	7,0819

$p$ , бар	$t$ , °C	$v'$ , м³/кг	$v''$ , м³/кг	$h'$ , кДж/кг	$h''$ , кДж/кг	$g$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/(кг·К)	$s''$ , кДж/(кг·К)
2,4	126,09	0,0010663	0,74684	529,6	2715,3	2185,7	1,5929	7,0676
2,5	127,43	0,0010675	0,71881	535,4	2717,2	2181,8	1,6072	7,0540
2,6	128,73	0,0010688	0,69288	540,9	2719,0	2178,1	1,6209	7,0409
2,7	129,98	0,0010700	0,66878	546,2	2720,7	2174,5	1,6342	7,0282
2,8	131,20	0,0010712	0,64636	551,4	2722,3	2170,9	1,6471	7,0161
2,9	132,39	0,0010724	0,62544	556,5	2723,9	2167,4	1,6596	7,0044
3,0	133,54	0,0010735	0,60586	561,4	2725,5	2164,1	1,6717	6,9930
3,1	134,66	0,0010746	0,58750	566,2	2727,0	2160,8	1,6834	6,9820
3,2	135,76	0,0010757	0,57027	570,9	2728,4	2157,5	1,6948	6,9714
3,3	136,82	0,0010768	0,55402	575,5	2729,8	2154,3	1,7059	6,9611
3,4	137,86	0,0010779	0,53871	579,9	2731,2	2151,3	1,7168	6,9511
3,5	138,88	0,0010789	0,52425	584,3	2732,5	2148,2	1,7273	6,9414
3,6	139,87	0,0010799	0,51056	588,5	2733,8	2145,3	1,7376	6,9320
3,7	140,84	0,0010809	0,49758	592,7	2735,0	2142,3	1,7476	6,9228
3,8	141,79	0,0010819	0,48527	596,8	2736,2	2139,4	1,7575	6,9138
3,9	142,72	0,0010829	0,47357	600,8	2737,4	2136,6	1,7670	6,9051
4,0	143,62	0,0010839	0,46242	604,7	2738,5	2133,8	1,7764	6,8966
4,1	144,52	0,0010848	0,45181	608,5	2739,7	2131,2	1,7856	6,8883
4,2	145,39	0,0010858	0,44168	612,3	2740,7	2128,4	1,7946	6,8802
4,3	146,25	0,0010867	0,43201	616,0	2741,8	2125,8	1,8034	6,8723
4,4	147,09	0,0010876	0,42276	619,6	2742,8	2123,2	1,8120	6,8645
4,5	147,92	0,0010885	0,41392	623,2	2743,8	2120,6	1,8204	6,8570
4,6	148,73	0,0010894	0,40544	626,7	2744,8	2118,1	1,8287	6,8496
4,7	149,53	0,0010903	0,39731	630,1	2745,8	2115,7	1,8368	6,8424
4,8	150,31	0,0010911	0,38950	633,5	2746,7	2113,2	1,8448	6,8352
4,9	151,09	0,0010920	0,38202	636,8	2747,6	2110,8	1,8527	6,8283
5,0	151,85	0,0010928	0,37481	640,1	2748,5	2108,4	1,8604	6,8215
5,2	153,33	0,0010945	0,36120	646,5	2750,2	2103,7	1,8754	6,8083
5,4	154,77	0,0010961	0,34857	652,8	2751,9	2099,1	1,8899	6,7955
5,5	155,47	0,0010969	0,34259	655,8	2752,7	2096,9	1,8970	6,7893
5,6	156,16	0,0010977	0,33681	658,8	2753,4	2094,6	1,9040	6,7832
5,8	157,52	0,0010993	0,32583	664,7	2755,0	2090,3	1,9176	6,7713
6,0	158,84	0,0011009	0,31556	670,4	2756,4	2086,0	1,9308	6,7598
6,2	160,12	0,0011024	0,30593	676,0	2757,8	2081,8	1,9437	6,7487
6,4	161,38	0,0011039	0,29689	681,5	2759,2	2077,7	1,9562	6,7379
6,5	161,99	0,0011046	0,29257	684,2	2759,9	2075,7	1,9623	6,7326
6,6	162,60	0,0011053	0,28837	686,8	2760,5	2073,7	1,9684	6,7274
6,8	163,79	0,0011068	0,28033	692,0	2761,7	2069,7	1,9803	6,7173
7,0	164,96	0,0011082	0,27274	697,1	2762,9	2065,8	1,9918	6,7074
7,2	166,10	0,0011096	0,26556	702,0	2764,1	2062,1	2,0031	6,6978
7,4	167,21	0,0011110	0,25875	706,9	2765,2	2058,3	2,0141	6,6884
7,5	167,76	0,0011117	0,25548	709,3	2765,8	2056,5	2,0195	6,6838
7,6	168,30	0,0011123	0,25228	711,7	2766,3	2054,6	2,0249	6,6793
7,8	169,37	0,0011137	0,24614	716,4	2767,4	2051,0	2,0354	6,6704
8,0	170,42	0,0011150	0,24030	720,9	2768,4	2047,5	2,0457	6,6618
8,2	171,44	0,0011163	0,23472	725,4	2769,3	2043,9	2,0558	6,6532
8,4	172,45	0,0011176	0,22941	729,8	2770,3	2040,5	2,0657	6,6450
8,5	172,95	0,0011182	0,22685	732,0	2770,8	2038,8	2,0705	6,6409
8,6	173,44	0,0011188	0,22434	734,2	2771,2	2037,0	2,0753	6,6369
8,8	174,40	0,0011201	0,21948	738,4	2772,1	2033,7	2,0848	6,6289
9,0	175,36	0,0011213	0,21484	742,6	2773,0	2030,4	2,0941	6,6212
9,2	176,29	0,0011226	0,21038	746,8	2773,8	2027,0	2,1033	6,6136
9,4	177,21	0,0011238	0,20612	750,8	2774,7	2023,9	2,1122	6,6062
9,6	178,12	0,0011250	0,20202	754,8	2775,5	2020,7	2,1210	6,5989
9,8	179,01	0,0011262	0,19809	758,7	2776,2	2017,5	2,1297	6,5917

$p$ , бар	$t$ , °C	$v'$ , м³/кг	$v''$ , м³/кг	$h'$ , кДж/кг	$h''$ , кДж/кг	$g$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/(кг·К)	$s''$ , кДж/(кг·К)
10,0	179,88	0,0011274	0,19430	762,6	2777,0	2014,4	2,1382	6,5847
10,5	182,01	0,0011303	0,18546	772,0	2778,7	2006,7	2,1588	6,5677
11,0	184,06	0,0011331	0,17739	781,1	2780,4	1999,3	2,1786	6,5515
11,5	186,04	0,0011359	0,17000	789,9	2782,0	1992,1	2,1976	6,5359
12,0	187,96	0,0011386	0,16320	798,4	2783,4	1985,0	2,2160	6,5210
12,5	189,81	0,0011412	0,15693	806,7	2784,8	1978,1	2,2338	6,5066
13,0	191,60	0,0011438	0,15112	814,7	2786,0	1971,3	2,2509	6,4927
13,5	193,35	0,0011464	0,14574	822,5	2787,3	1964,8	2,2675	6,4794
14,0	195,04	0,0011489	0,14072	830,1	2788,4	1958,3	2,2836	6,4665
14,5	196,68	0,0011514	0,13603	837,5	2789,4	1951,9	2,2992	6,4539
15,0	198,28	0,0011538	0,13165	844,7	2790,4	1945,7	2,3144	6,4418
15,5	199,84	0,0011562	0,12754	851,7	2791,3	1939,6	2,3292	6,4300
16,0	201,37	0,0011586	0,12368	858,6	2792,2	1933,6	2,3436	6,4187
16,5	202,85	0,0011610	0,12004	865,3	2793,0	1927,7	2,3576	6,4075
17,0	204,30	0,0011633	0,11661	871,8	2793,8	1922,0	2,3712	6,3967
17,5	205,72	0,0011656	0,11338	878,3	2794,5	1916,2	2,3846	6,3862
18,0	207,10	0,0011678	0,11031	884,6	2795,1	1910,5	2,3976	6,3759
18,5	208,46	0,0011700	0,10740	890,7	2795,8	1905,1	2,4103	6,3659
19,0	209,79	0,0011722	0,10464	896,8	2796,4	1899,6	2,4227	6,3561
19,5	211,09	0,0011744	0,10202	902,7	2796,9	1894,2	2,4349	6,3466
20,0	212,37	0,0011766	0,09953	908,6	2797,4	1888,8	2,4468	6,3373
20,5	213,62	0,0011787	0,09715	914,3	2797,9	1883,6	2,4585	6,3281
21,0	214,85	0,0011808	0,09488	919,9	2798,3	1878,4	2,4699	6,3192
21,5	216,05	0,0011830	0,09271	925,5	2798,7	1873,2	2,4812	6,3104
22,0	217,24	0,0011850	0,09064	930,9	2799,1	1868,2	2,4922	6,3018
22,5	218,40	0,0011871	0,08866	936,3	2799,5	1863,2	2,5030	6,2934
23,0	219,54	0,0011891	0,08676	941,6	2799,8	1858,2	2,5136	6,2851
23,5	220,67	0,0011912	0,08494	946,8	2800,1	1853,3	2,5240	6,2771
24,0	221,78	0,0011932	0,08319	951,9	2800,4	1848,5	2,5343	6,2691
24,5	222,86	0,0011952	0,08151	957,0	2800,6	1843,6	2,5444	6,2613
25,0	223,94	0,0011972	0,07990	962,0	2800,8	1838,8	2,5543	6,2536
25,5	224,99	0,0011991	0,07834	966,9	2801,0	1834,1	2,5640	6,2460
26,0	226,03	0,0012011	0,07685	971,7	2801,2	1829,5	2,5736	6,2386
26,5	227,06	0,0012030	0,07541	976,5	2801,4	1824,9	2,5831	6,2313
27,0	228,06	0,0012050	0,07402	981,2	2801,5	1820,3	2,5924	6,2241
27,5	229,06	0,0012069	0,07268	985,9	2801,6	1815,7	2,6016	6,2170
28,0	230,04	0,0012088	0,07138	990,5	2801,7	1811,2	2,6106	6,2101
28,5	231,01	0,0012107	0,07013	995,0	2801,8	1806,8	2,6195	6,2032
29,0	231,96	0,0012126	0,06892	999,5	2801,8	1802,3	2,6283	6,1964
29,5	232,91	0,0012145	0,06775	1004,0	2801,9	1797,9	2,6370	6,1898
30,0	233,84	0,0012163	0,06662	1008,4	2801,9	1793,5	2,6455	6,1832
31	235,66	0,0012200	0,06446	1017,0	2801,9	1784,9	2,6623	6,1703
32	237,44	0,0012237	0,06243	1025,5	2801,8	1776,3	2,6786	6,1577
33	239,18	0,0012273	0,06052	1033,7	2801,7	1768,0	2,6946	6,1454
34	240,88	0,0012310	0,05872	1041,8	2801,5	1759,7	2,7101	6,1335
35	242,54	0,0012345	0,05702	1049,8	2801,3	1751,5	2,7253	6,1218
36	244,16	0,0012381	0,05540	1057,6	2801,0	1743,4	2,7402	6,1103
37	245,75	0,0012416	0,05388	1065,3	2800,7	1735,4	2,7548	6,0992
38	247,31	0,0012451	0,05243	1072,8	2800,3	1727,5	2,7690	6,0883
39	248,84	0,0012486	0,05105	1080,2	2799,9	1719,7	2,7830	6,0775
40	250,33	0,0012521	0,04974	1087,5	2799,4	1711,9	2,7967	6,0670
41	251,80	0,0012555	0,04849	1094,6	2798,9	1704,3	2,8101	6,0566
42	253,24	0,0012589	0,04729	1101,7	2798,4	1696,7	2,8233	6,0465
43	254,66	0,0012623	0,04615	1108,6	2797,8	1689,2	2,8362	6,0366
44	256,05	0,0012657	0,04506	1115,5	2797,2	1681,7	2,8489	6,0268

Таблица П7.

Месторождение	Состав сухого газа по объему, %								
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	Q <sub>H</sub> кДж/м <sup>3</sup>
Уренгойское	92.5	2.0	0.66	0.5	0.15	0.33	3.7	-	33500
Медвежье	85.9	4.7	3.1	1.6	1.0	0.48	3.2	-	37600
Заполярье	98.4	0.07	0.01	-	0.01	0.2	1.3	-	32950
Тазовское 1	98.6	0.1	0.03	0.02	0.01	0.2	1.0	-	33200
Тазовское 2	93.1	2.1	0.28	0.06	0.11	0.4	3.2	-	35710
Тазовское 3	87.5	6.7	2.1	0.59	0.11	0.6	2.4	-	35700
Губкинское	98.4	0.13	0.01	0.005	0.01	0.15	1.3	-	33000
Комсомольское 1	97.2	0.12	0.01	-	0.01	0.1	2.5	-	32570
Комсомольское 2	94.5	2.1	0.5	0.1	0.1	0.2	1.6	-	33530
Юбилейное	98.4	0.07	0.01	-	-	0.4	1.1	-	32900
Мессояхское	97.4	0.1	0.03	0.01	0.01	0.6	1.6	-	32700
Соленинское	95.8	2.9	0.07	0.02	0.15	0.4	0.5	-	34250
Берёзовское	95.8	1.2	0.3	0.1	0.06	0.5	3.0	-	32860
Вуктыльское	81.8	8.8	2.8	0.94	0.3	0.3	5.1	-	36550
Вой-Вожское	84.4	5.2	1.3	0.43	0.15	0.18	8.2	-	33160
Седь-Иоль (Коми)	85.8	2.3	1.0	0.3	0.05	0.05	10.5	-	32700
Бугурусланское	81.7	5.0	2.0	1.2	0.6	0.4	8.5	0.6	34175
Ставропольское	98.7	0.3	0.12	0.06	0.06	0.1	0.7	-	33400
Оренбургское	92.7	2.2	0.8	0.22	0.15	0.2	1.1	2.6	34120

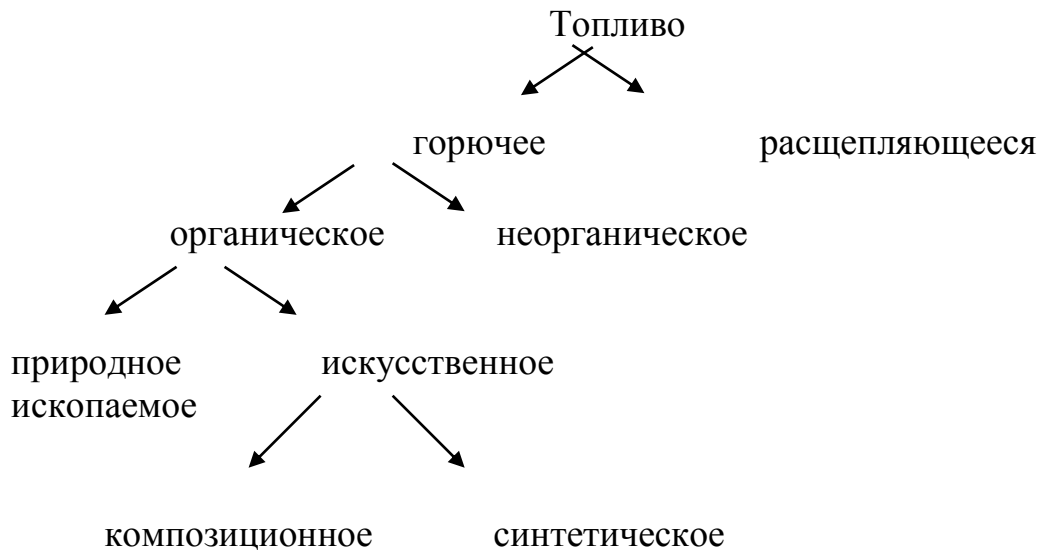
Таблица П8

## Жидкое топливо

Средний элементар ный состав	Малосернистый		Многосернистый		
	40	100	40	100	200
C <sup>P</sup>	85,00	84,75	84,10	83,10	83,10
H <sup>P</sup>	10,90	10,80	10,70	10,30	10,30
S <sup>P</sup> <sub>об</sub>	0,50	0,50	3,50	3,05	3,05
O <sup>P</sup> +N <sup>P</sup>	0,55	0,90	0,75	0,45	0,40
A <sup>P</sup>	0,15	0,15	0,15	0,15	0,30
W <sup>P</sup>	2,00	2,00	2,00	2,00	1,00
Q <sup>P</sup> <sub>п</sub> , кДж/кг	39805,0	39595,5	39805,0	39092,7	39595,5

## Теоретические ссылки.

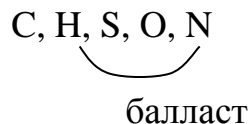
**Топливом** называют вещество, выделяющее при определенных условиях большое количество тепловой энергии.



По составу органическое топливо делится на твердое, жидкое, газообразное.

Состав органического топлива делится на горючую и негорючую части.

Для твердого и жидкого топлива горючими являются 5 элементов:

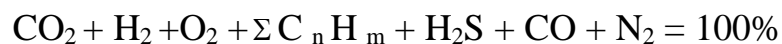


Негорючая часть состоит из влажности  $W$  и минеральной части  $M$ , которая при сжигании дает золу  $A$ .

Состав твердого и жидкого топлива обычно выражают в % по массе.

$$C^p + H^p + S^p + O^p + N^p + W^p + A^p = 100\%$$

Газообразное топливо по составу элементарному можно записать:



Для обеспечения полного сжигания топлива в топочном объеме, в него вводят воздуха больше, чем требуется по химическим реакциям.



Дополнительное количество воздуха оценивают коэффициентом избытка воздуха  $\alpha_T$ .

$$\alpha = \frac{V}{V_0}$$

где  $V$  - действительный объем воздуха

$V_0$  – теоретический объем воздуха

**Энтальпия** (газа) – это величина численно равная количеству теплоты, которое подведено к газу в процессе его нагревания от  $0^{\circ}\text{C}$  до заданной температуры при постоянном давлении.

**Энтальпия продуктов сгорания** – это количество теплоты, которое содержат продукты сгорания при сжигании единицы объема или массы топлива и заданной температуре.

Энергетический потенциал топлива характеризуется такими величинами как: низшая теплота сгорания и высшая теплота сгорания.

Количество теплоты, которое может выделиться при полном сгорании 1кг твердого или жидкого, или  $1\text{м}^3$  газообразного топлива, при условии, что образующиеся в продуктах сгорания водяные пары конденсируются, называется **высшей теплотой сгорания топлива**.

Если при сгорании топлива водяные пары не конденсируются, то теплота сгорания единицы массы или объема топлива уменьшается на величину теплоты конденсации водяных паров  $Q_{\text{H}_2\text{O}}$ ; разность  $Q_{\text{в}}^p - Q_{\text{H}_2\text{O}} = Q_{\text{н}}^p$  - носит название **низшей теплоты сгорания топлива**.

Потеря теплоты  $q_2$  – с уходящими газами – зависит от температуры уходящих газов, при снижении  $\vartheta_{\text{yx}}$  на  $15^{\circ}\text{C}$   $q_2$  уменьшается на 1%;  $q_2$  – уменьшается пропорционально уменьшению коэффициента избытка воздуха  $\alpha_{\text{yx}}$ ; т.е с уменьшением коэффициентов избытка воздуха в топке  $\alpha_T$  и  $\alpha_{\text{yx}}$ , уменьшается  $q_2$ ; этого можно достичь путем совершенствования процессов горения и ликвидацией присосов по газозвоздушному тракту.

$q_3$  – потеря от химической неполноты сгорания зависит от рода топлива и типа топочного устройства.

Причинами появления химического недожога могут быть: недостаток воздуха, низкая температура в топочном объеме котла, особенно в зоне догорания топлива, плохое смесеобразование, особенно в начальных стадиях горения топлива.

Для снижения  $q_3$ , улучшают условия перемешивания газов, применяя острое дутьё и повышают температуру в зоне горения путём подогрева, вводимого в топочный объём воздуха, величина  $q_3$  для слоевых топок колеблется от 0,5 до 30 %, для камерных топок при сжигании угля от 0,5 до 1,5 %.

При сжигании мазута и газа  $q_3 = 0,5$  %.

**q<sub>4</sub>** – потеря от механической неполноты сгорания топлива, учитывается только для твёрдого топлива, т.к складывается из потери с провалами топлива через отверстия в колосниковой решетке, с потерями в шлаке и с потерями уноса частиц топлива по газовоздушному тракту из зоны горения топлива. Для слоевых топок q<sub>4</sub> может составлять от 1 до 18 %, для камерных топок от 1 до 5 %.

**q<sub>5</sub>** – потеря теплоты от наружного охлаждения, она наблюдается т.к температура наружной поверхности котла всегда выше температуры окружающей среды.

**q<sub>6</sub>** – потеря с физической теплотой шлаков, образуются из-за разницы температуры шлака, удаляемого из котла и температуры окружающей среды.