



Марков О.Е.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПЕЧЕЙ КУЗНЕЧНО – ПРЕССОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

**Учебное пособие для студентов
специальности «Обработка металлов давлением»
по дисциплине «Теплоэнергетика»**

Марков О.Е.

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПЕЧЕЙ КУЗНЕЧНО – ПРЕССОВОГО
ПРОИЗВОДСТВА**

**Учебное пособие для студентов
специальности «Обработка металлов давлением»
по дисциплине «Теплоэнергетика»**

Утверждено на заседании
ученого совета ДГМА
Протокол № от

Краматорск 2006

ББК 31.391

УДК 669.046

М - 26

Рецензенты:

Кухарь В.В., кандидат технических наук, доцент кафедры «Кузнечно-штамповочное производство» Приазовского государственного технического университета.

Пыц Я.Е., кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Машины и технологии обработки металлов давлением» Донбасской государственной машиностроительной академии.

Марков О.Е.

М - 26 Методика расчета печей кузнечно-прессового производства: Учеб. пособие для студентов специальности «Обработка металлов давлением» по дисциплине «Теплоэнергетика». – Краматорск: ДГМА, 2006. - 128с.

ISBN

Реферат

В методических указаниях в логической последовательности приведены основные этапы расчета нагревательных печей, применяемых в кузнечно-штамповочном производстве. При выполнении расчетных работ студенты могут использовать табличный материал. В пособии рассмотрена методика, необходимая для расчета современных печей. Пособие рассчитано на студентов, изучающих теплоэнергетику, разрабатывающих дипломный проект.

ББК 31.391

© Марков О.Е., 2006

ISBN

© ДГМА, 2006

СОДЕРЖАНИЕ	Стр.
Введение.....	6
1 Расчет горения топлива.....	8
1.1 Пересчет состава топлива.....	8
1.2 Теплота сгорания топлива.....	8
1.3 Объем воздуха и продуктов сгорания.....	8
1.4 Массовый баланс процесса горения.....	10
1.5 Калометрическая температура горения.....	11
1.6 Пример расчета горения топлива.....	14
2 Расчет основных размеров печи.....	17
2.1 Расчет размеров камерной печи.....	19
2.2 Предварительный расчет размеров методической печи.....	22
2.3 Пример расчета камерной печи.....	25
2.4 Пример расчета методической печи.....	27
3 Расчет теплообмена в рабочем пространстве печи.....	30
3.1 Теплообмен в камерных печах.....	30
3.2 Теплообмен в методических печах.....	35
3.3 Пример расчета теплообмена для камерной печи.....	37
3.4 Пример расчета теплообмена в методической двухзонной печи..	39
4 Расчет нагрева металла.....	41
4.1 Расчет нагрева металла в камерных печах.....	41
4.2 Расчет нагрева металла в методических печах.....	57
4.3 Пример расчета нагрева металла в камерных печах	65
4.4 Пример расчета нагрева металла в методической печи.....	71
5 Тепловой баланс печи и определение расхода топлива.....	76
5.2 Тепловой баланс печей непрерывного действия.....	76
5.3 Тепловой баланс печей периодического действия.....	81
5.4 Пример расчета теплового баланса методической печи	86
5.5 Пример расчета теплового баланса камерной печи.....	92
6 Выбор устройств для сжигания топлива.....	98
6.1 Пример расчета короткопламенной горелки	99
6.2 Пример расчета длиннопламенной горелки	100
7 Расчет рекуператора.....	101
7.1 Расчет трубчатого рекуператора.....	101
7.2 Пример расчета трубчатого рекуператора.....	105
7.3 Расчет игольчатого рекуператора.....	108
8 Расчет дымового тракта.....	110
8.1 Определение общих потерь давления.....	110
8.2 Расчет дымовой трубы.....	117
8.3 Пример расчета дымового тракта.....	121
8.4 Пример расчета дымовой трубы.....	122
Заключение.....	124
Перечень ссылок.....	126

Введение

Курсовое проектирование является завершающим этапом изучения дисциплины «Теплоэнергетика».

Цель курсового проектирования – закрепление, углубление и расширение теоретических знаний и практических навыков, полученных студентом на лекциях, ознакомительной практике; приобретение навыков проектирования и расчётов металлургических печей; развитие у студента навыков самостоятельной творческой работы и инженерного подхода к решению технических задач.

Задачи курсового проектирования

- ознакомление с устройствами для нагрева заготовок под обработку давлением или термическую обработку;
- приобретение навыков инженерного проектирования теплотехнических установок и умения работать с технической литературой;
- подготовка к последующим специальным дисциплинам: «Термообработка», «Технологияковки», «Горячая объёмная штамповка», курсовому и дипломному проектированию;
- закрепление навыков подготовки технической документации и технико-экономического обоснования выбора эффективных способов нагрева заготовок.

Результатом курсового проектирования является защита перед комиссией разработанного проекта установки для нагрева заготовок.

Объём пояснительной записки - 40-50 страниц формата А4 и графической части – 4 листа формата А1.

Содержание пояснительной записки

Техническое задание – проектирование нагревательных или термических печей. Тип печи выбирается в зависимости от размеров нагреваемых заготовок, их материала и производительности кузнечного оборудования, на котором предполагается их последующая обработка.

Пояснительная записка содержит следующие разделы:

Введение. Приводятся данные о способах нагрева заготовок или их термической обработки. Обосновывается тип нагревательного устройства на основе анализа соответствующей литературы.

Расчёт горения топлива. В этом разделе вычисляются: теплота горения топлива, количество воздуха, необходимого для сгорания топлива, состав продуктов горения, температура горения и плотность продуктов горения.

Расчёт теплообмена излучением. Рассчитывается рабочее пространство печи, определяются рациональные способы размещения заготовок в печи, коэффициенты излучения.

Расчёт горения металла. Устанавливаются зависимости механических и теплофизических свойств металла, рассчитываются размер и режим нагрева заготовок, температуры газов, печи, заготовки, плотность теплового потока и удельная рабочая мощность.

Расчёт теплового баланса. Производится выбор материалов для кладки печи, определяется толщина слоёв кладок стен, свода, пода и прочих конструктивных элементов печи. Рассчитываются тепловые потери по законам теплопередачи через кладку стен, свода, пода, окна и другие элементы печи. Составляется тепловой баланс, вычисляются мощность, расходы топлива, КПД.

Расчёт рекуператора. Назначаются тип и конструкция теплообменного аппарата, рассчитываются поверхность нагрева и размеры рекуператора.

Расчёт топливосжигающих устройств. Расчётным путём определяются тип, размеры и количество топливосжигающих аппаратов.

Расчёт дымового тракта. Проектируется схема и вычисляются размеры дымового тракта, потери давления при движении дымовых газов и высота дымовой трубы.

Заключение. Приводится технико-экономическая характеристика спроектированной печи, её предназначение и сопоставление с аналогичными печами.

Перечень ссылок. Включает в себя все источники, которые рассматривались при проектировании печи и на которые сделаны ссылки.

Приложения. Приводятся спецификации на спроектированную печь, таблицы и рисунки, не вошедшие в основную часть пояснительной записки, расчёты на ЭВМ.

Содержание графической части

На трёх листа формата А1 показываются основные разрезы печи (фронтальный, горизонтальный и вертикальный), на четвёртом листе – рекуператор к печи.

Вид печи с разрезами должен давать полное представление о конструкции и принципах ее работы. Прототипы печи выбираются по атласам металлургических печей либо заводским чертежам. Чертежи выполняются в соответствии со всеми требованиями, предъявляемыми к технической документации.

Номер чертежа должен содержать шифр группы, вариант, название печи (КВП – камерная с выкатным подом, КНП – камерная с неподвижным подом, МП – методическая печь, ЭП – электропечь и т.д.). После буквенных обозначений следуют три группы цифр, по три в каждой. Первая группа - к обозначению узлов, вторая - подузлов, третья – деталей. Например: ОМД 021.09.КНП 001.005.010.

1 Расчёт горения топлива

Расчет горения топлива – важный этап при проектировании нагревательных печей. В процессе расчета определяют: объём воздуха, необходимого для горения; состав и количество газообразных продуктов горения; количество теплоты, выделившиеся при сгорании топлива; температуру горения топлива [1].

1.1 Пересчёт состава топлива

Пересчёт состава твёрдого топлива и жидкого топлива выполняется уточнением процентного содержания компонентов заданного состава на коэффициент [2], значения которого приведены в индивидуальном задании.

Тепловые расчеты производятся по рабочей массе топлива, характеризующей состав топлива в практических условиях его применения. Для газообразного топлива коэффициент пересчёта состава сухого газа на влажный определяется по следующему выражению:

$$K = \frac{100 - H_2O}{100}, \quad H_2O = \frac{100W}{803,6 + W},$$

где H_2O – содержание влаги в газе по объёму, %;

W – содержание водяных паров в сухом газе, $г/м^3$ (указывается в задании);

803,6 – плотность водяных паров при $0^\circ C$ и 101,325 кПа, $г/м^3$.

Состав влажного газа определяется умножением соответствующих компонентов сухого газа на коэффициент пересчета K :

$$CO_2^{Bл} = CO_2 K\%; \quad CO^{Bл} = CO K\%; \quad \text{и т.д. для всех компонентов горючей}$$

смеси. Таким образом определяется состав рабочего топлива.

1.2 Теплота сгорания топлива

Теплота сгорания для газообразного топлива $кДж/м^3$, определяется по составу влажного газа по формуле,

$$\begin{aligned} Q_H^P = & 127 CO^{Bл} + 108 H_2^{Bл} + 357 CH_4^{Bл} + 596 C_2H_4^{Bл} + \\ & + 636 C_2H_6^{Bл} + 913 C_3H_8^{Bл} + 1185 C_4H_{10}^{Bл} + 1465 C_5H_{12}^{Bл}. \end{aligned} \quad (1.1)$$

В формуле (1.1) $CO^{Bл}$, $H_2^{Bл}$, $CH_4^{Bл}$ и т.д. – процентное содержание соответствующих компонентов в топливе с учётом влагосодержания.

1.3 Объём воздуха и продуктов полного сгорания

Объём воздуха, необходимого для полного сгорания топливной смеси,

$\text{м}^3 / \text{м}^3$,

$$L_0 = 0,0476[0,5CO^{Bl} + 0,5H_2^{Bl} + 2CH_4^{Bl} + 3C_2H_4^{Bl} + 3,5C_2H_6^{Bl} + 5C_3H_8^{Bl} + 6,5C_4H_{10}^{Bl} + 8C_5H_{12}^{Bl} - O_2^{Bl}](1 - 0,00124 d_B),$$

где d_B – влагосодержание сухого воздуха, $\text{г} / \text{м}^3$;

CO^{Bl} , H_2^{Bl} , CH_4^{Bl} и т.д. – содержание соответствующих компонентов в топливе с учётом влагосодержания, %.

Влагосодержание сухого воздуха d_B может приниматься равным $10 \text{ г} / \text{м}^3$ или определяется как произведение относительной влажности для данных атмосферных условий на влагосодержание, соответствующее температуре насыщения (таблица 1.1).

Таблица 1.1 - Влагосодержание в топливе при давлении $101,325 \text{ кН} / \text{м}^2$

Температура, °C	Влагосодержание			
	на 1 м^3 сухого газа		на 1 м^3 влажной смеси	
	г/м ³	м ³ /м ³	г/м ³	м ³ /м ³
0	4,8	0,0060	4,8	0,0060
5	7,0	0,0087	6,9	0,0086
10	9,8	0,0122	9,7	0,0121
15	13,7	0,0170	13,5	0,0168
20	18,9	0,0235	18,5	0,0230
25	26,0	0,0323	25,2	0,0313
30	35,1	0,0436	33,6	0,0418
35	47,3	0,0587	44,6	0,0555
40	63,1	0,0785	58,5	0,0726
45	84,0	0,1043	76,0	0,0945
50	111,4	0,1385	97,9	0,1218
55	148,0	0,184	125,0	0,155
60	196,0	0,244	158,0	0,195
65	265,0	0,330	199,0	0,248
70	361,0	0,449	249,0	0,316
75	499,0	0,629	308,0	0,383
80	716,0	0,891	379,0	0,471
85	1092,0	1,358	463,0	0,576
90	1871,0	2,334	563,0	0,700
95	4381,0	5,450	679,0	0,845
100	—	—	816,0	1,000

Действительный объём воздуха, который отличается от теоретического коэффициентом избытка воздуха, зависящего от типа топлива, вида печи и типа используемой горелки для сжигания газа, можно определить, $\text{м}^3 / \text{м}^3$ [1],

$$L_{\partial} = L_0 \alpha,$$

где α – коэффициент избытка воздуха (задаётся в исходных данных) или определяется по таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Коэффициент избытка воздуха

Тип горелки	α
Длиннопламенная	1,10 – 1,15
Короткопламенная	1,03 – 1,05

В методических печах рекомендуется использовать длиннопламенные горелки. В камерных печах - короткопламенные горелки.

При сгорании топлива образуются: углекислый газ CO_2 , водяной пар, остаётся кислород O_2 и азот N_2 , поэтому суммарное количество дымовых газов, м³/м³ [1],

$$V_{\partial.2} = V'_{CO_2} + V'_{H_2O} + V'_{O_2} + V'_{N_2},$$

где V'_{CO_2} V'_{H_2O} V'_{O_2} V'_{N_2} – объемы составляющих продуктов сгорания:

$$V'_{CO_2} = 0,01(CO^{Bl} + CO_2^{Bl} + CH_4^{Bl} + 2C_2H_4^{Bl} + 2C_2H_6^{Bl} + 3C_3H_8^{Bl} + 4C_4H_{10}^{Bl} + 5C_5H_{12}^{Bl});$$

$$V'_{H_2O} = 0,01(H_2^{Bl} + 2CH_4^{Bl} + 2C_2H_4^{Bl} + 3C_2H_6^{Bl} + 4C_3H_8^{Bl} + 5C_4H_{10}^{Bl} + 6C_5H_{12}^{Bl} + H_2O^{Bl} \frac{0,124d_B L_{\partial}}{1 + 0,00124d_B});$$

$$V'_{O_2} = 0,21(\alpha - 1) \frac{L_{\partial}}{1 + 0,00124d_B};$$

$$V'_{N_2} = 0,01(N_2^{Bl} + \frac{79L_{\partial}}{1 + 0,00124d_B}).$$

$$V_{\partial.2} = V'_{CO_2} + V'_{H_2O} + V'_{O_2} + V'_{N_2} = 0,36 + 0,5983 + 2,206 + 0,074 = 3,235$$

Процентное содержание газов в продуктах сгорания, %:

$$V_{CO_2} = \frac{V'_{CO_2}}{V_{\partial.2}} \cdot 100\%; \quad V_{H_2O} = \frac{V'_{H_2O}}{V_{\partial.2}} \cdot 100\%;$$

$$V_{O_2} = \frac{V'_{O_2}}{V_{\partial.2}} \cdot 100\%; \quad V_{N_2} = \frac{V'_{N_2}}{V_{\partial.2}} \cdot 100\%.$$

Проверкой полученных результатов является сумма всех компонентов продуктов горения, которая составляет 100%,

$$V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{O_2} + V_{N_2} = 100\%.$$

1.4 Массовый баланс процесса горения

Сумма масс сгораемого воздуха m_{∂} и топлива m_{∂} должна быть равна массе дымовых газов $m_{\partial.2}$,

$$m_{\partial} + m_{\partial} = m_{\partial.2}.$$

Масса 1 м³ газа равна, кг,

$$m_{\partial} = V_{\partial} \cdot \rho_{\partial} = 1 \cdot \rho_{\partial},$$

где ρ_2 – плотность газа, кг/м³,

$$\rho_2 = \frac{16CH_4^{Bl} + 28C_2H_2^{Bl} + 20C_2H_6^{Bl} + 44C_3H_8^{Bl} + 58C_4H_{10}^{Bl}}{2240} + \frac{28CO^{Bl} + 44CO_2^{Bl} + 2H_2^{Bl} + 28N_2^{Bl} + 18H_2O^{Bl} + 32O_2^{Bl}}{2240}.$$

Масса 1 м³ воздуха, кг, $m_в = L_д \rho_в$.

Плотность воздуха $\rho_в = 1,29$ кг/м³

Масса дымовых газов, кг,

$$m_{д.г} = V_{д.г} \rho_{д.г},$$

где $\rho_{д.г}$ – плотность дымовых газов, кг/м³,

$$\rho_{д.г} = \frac{44V_{CO_2} + 18V_{H_2O} + 28V_{N_2} + 32V_{O_2}}{2240}.$$

Проверкой служит погрешность вычисления массового баланса:

$$\Delta = \left| \frac{(m_г + m_в) - m_{д.г}}{m_{д.г}} \right| \cdot 100\% \leq 1,5\%.$$

1.5 Калориметрическая температура горения

Калориметрическая температура горения определяется из условия, что всё выделившееся при горении тепло расходуется только на повышение температуры продуктов сгорания [3].

Продукты сгорания любого топлива представляют собой смесь различных газообразных составляющих: H_2O , CO_2 , O_2 , N_2 . Каждой из этих составляющих при той или иной температуре присуща определённая величина теплоёмкости и теплосодержания (энтальпия). В связи с этим калориметрическую температуру определяют методом последовательного приближения.

Начальное теплосодержание продуктов горения, кДж/м³,

$$i_{нач} = i_о + i_в + i_г, \quad (1.2)$$

где $i_о$ – теплосодержание продуктов сгорания, кДж/м³;

$i_в$ – теплосодержание подогретого воздуха, кДж/м³;

$i_г$ – теплосодержание подогретого газа, кДж/м³.

$$i_о = \frac{Q_H^P}{V_{д.г}}; \quad i_в = \frac{L_д t_в C_в}{V_{д.г}},$$

где $t_в$ – температура воздуха, подаваемого в горелку (задаётся в исходных данных), °С;

$C_в$ – теплоёмкость воздуха (определяется по таблице 1.3), кДж/м³°С.

$$i_2 = \frac{0,01}{V_{d2}} t_2 (CH_4^{Bl} \cdot C_{CH_4} + C_2H_4^{Bl} \cdot C_{C_2H_4} + C_2H_6^{Bl} \cdot C_{C_2H_6} + C_3H_8^{Bl} \cdot C_{C_3H_8} + C_3H_{10}^{Bl} \cdot C_{C_3H_{10}} + \\ + C_5H_{12}^{Bl} \cdot C_{C_5H_{12}} + H_2^{Bl} \cdot C_{H_2} + CO^{Bl} \cdot C_{CO} + CO_2^{Bl} \cdot C_{CO_2} + N_2^{Bl} \cdot C_{N_2} + O_2^{Bl} \cdot C_{O_2}),$$

где t_2 – температура подогрева газа (задаётся в исходных данных), °С;

$CH_4^{Bl}, C_2H_4^{Bl}, C_2H_6^{Bl}$ и т.д. – процентный состав влажного газа, % ;

$C_{CH_4}, C_{C_2H_4}, C_{C_2H_6}$ и т.д. – теплоемкость составляющих газа (топлива)

при заданной температуре подогрева газа, кДж/(м³°С) (определяется по таблице 1.3).

Таблица 1.3 - Средняя теплоёмкость газов

Темпе- ратура, °С	Газ									
	CO ₂	H ₂ O	Воздух	N ₂	O ₂	H ₂	CO	O ₃	CH ₄	C ₂ H ₄
0	1,61	1,48	1,29	1,29	1,30	1,27	1,295	1,73	1,54	1,87
100	1,73	1,49	1,295	1,295	1,31	1,29	1,30	1,82	1,61	2,10
200	1,80	1,51	1,30	1,30	1,33	1,295	1,31	1,87	1,74	2,32
300	1,87	1,54	1,31	1,31	1,35	1,30	1,315	1,96	1,88	2,52
400	1,94	1,56	1,32	1,32	1,37	1,30	1,33	2,0	2,0	2,72
500	2,00	1,58	1,33	1,33	1,39	1,315	1,335	2,7	2,12	2,90
600	2,05	1,61	1,34	1,34	1,41	1,32	1,34	2,12	2,24	3,2
700	2,10	1,63	1,35	1,35	1,42	1,325	1,37	2,14	2,34	3,18
800	2,14	1,66	1,36	1,36	1,43	1,33	1,38	2,17	2,42	3,31
900	2,18	1,68	1,38	1,37	1,44	1,335	1,385	2,24	2,54	3,42
1000	2,21	1,71	1,39	1,38	1,45	1,34	1,39	2,26	2,64	3,53
1100	2,25	1,74	1,40	1,39	1,46	1,345	1,40	2,29	-	-
1200	2,27	1,76	1,41	1,40	1,47	1,35	1,42	2,295	-	-
1300	2,30	1,78	1,42	1,41	1,475	1,355	1,425	2,30	-	-
1400	2,32	1,79	1,44	1,42	1,48	1,36	1,43	2,31	-	-
1500	2,34	1,81	1,445	1,44	1,50	1,365	1,46	2,315	-	-
1600	2,36	1,815	1,45	1,445	1,55	1,37	1,47	2,32	-	-
1700	2,38	1,83	1,46	1,45	1,51	1,375	1,475	2,325	-	-
1800	2,39	1,90	1,49	1,46	1,52	1,38	1,48	2,33	-	-
1900	2,41	1,92	1,50	1,47	1,53	1,385	1,49	2,335	-	-
2000	2,42	1,93	1,55	1,48	1,54	1,39	1,50	2,40	-	-
2100	2,43	1,95	1,51	1,49	1,55	1,395	1,51	2,41	-	-
2200	2,44	1,97	1,515	1,90	1,56	1,40	1,515	2,415	-	-
2300	2,45	1,99	1,52	1,51	1,565	1,405	1,52	2,42	-	-
2400	2,46	2,10	1,525	1,515	1,57	1,41	1,5215	2,425	-	-
2500	2,47	2,40	1,53	1,52	1,58	1,415	1,53	2,43	-	-
2600	2,48	2,60	1,54	1,53	1,59	1,42	1,54	2,435	-	-
2700	2,49	2,70	1,55	1,54	1,60	1,43	1,545	2,44	-	-

После расчёта $i_{нач.}$ по формуле (1.2) задаются предполагаемой температурой горения t_k^1 и определяют теплосодержание продуктов горения

полученного состава при данной температуре. Начальную температуру t_k^1 принимают больше 1000°C.

$$i_1 = i_{CO_2}^1 + i_{H_2O}^1 + i_{O_2}^1 + i_{N_2}^1, \quad (1.3)$$

где $i_{CO_2}^1 = 0,01V_{CO_2}i_{CO_2},$;

$i_{H_2O}^1 = 0,01V_{H_2O}i_{H_2O},$;

$i_{O_2}^1 = 0,01V_{O_2}i_{O_2},$;

$i_{N_2}^1 = 0,01V_{N_2}i_{N_2},$

$i_{CO_2}^1, i_{H_2O}^1, i_{O_2}^1, i_{N_2}^1$ – теплосодержание отдельных газов, входящих в продукты сгорания при данной температуре, кДж/м³, определяется по таблице 1.4.

После расчёта значения i_1 по формуле (1.3) сравнивают его со значением $i_{нач}$ из формулы (1.2). Если $i_1 < i_{нач}$, то калориметрическая температура должна быть выше t_k^1 . Увеличивают температуру на 100°C ($t_k^2 = t_k^1 + 100^\circ C$) и повторяют расчёт теплосодержания.

Увеличение температуры производят до тех пор, пока $i_n > i_{нач}$, после чего определяют калориметрическую температуру, °C,

$$t_k = t_k^{n-1} + \frac{i_{нач} - i_{n-1}}{i_n - i_{n-1}} \cdot 100,$$

где i_n – теплосодержание продуктов горения, превышающее $i_{нач}$, кДж/м³;

i_{n-1} – предыдущее значение теплосодержания, меньше $i_{нач}$, кДж/м³;

t_k^{n-1} – принятая температура, при которой теплосодержание продуктов горения i_{n-1} меньше $i_{нач}$, °C.

Для проведения данных расчётов целесообразно применение ЭВМ.

Сжигание топлива в рабочем пространстве печей неразрывно связано с прямой отдачей тепла нагреваемым изделием, кладке и пр., в следствие чего действительная температура горения топлива всегда ниже калориметрической,

$$t_{\partial} = t_k \cdot \eta_{пир},$$

где $\eta_{пир}$ – пирометрический коэффициент, зависит от конструкции и размеров печи, в среднем составляет 0,65 – 0,75 [1].

Таблица 1.4 - Теплосодержание газов, кДж/м³

Темпе- ратура, °С	Газ									
	CO ₂	H ₂ O	Воздух	N ₂	O ₂	H ₂	CO	O ₃	CH ₄	C ₂ H ₄
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
100	171,3	150,0	130,0	130,0	132,3	129,2	130,2	182,0	160,9	210,1
200	360,6	302,4	261,9	261,6	267,2	259,6	261,5	379,2	349,4	465,9
300	563,9	418,7	395,7	394,6	409,4	390,6	395,7	589,5	563,2	759,5
400	777,1	623,4	533,0	530,1	551,4	521,7	532,2	810,2	800,7	1080,0
500	1001,1	690,2	672,4	667,8	699,6	654,0	671,0	1037,9	1060,2	1447,0
600	1236,4	964,3	814,7	389,4	850,8	785,9	802,2	1274,4	1341,8	1830,5
700	1475,1	1143,0	959,0	950,9	1004,5	919,5	960,7	1510,7	1549,5	2233,8
800	1718,8	1328,9	1106,9	1098,7	1160,5	1086,9	1110,3	1751,8	1968,3	2675,5
900	1967,5	1526,8	1259,4	1247,7	1320,2	1041,3	1261,1	1997,6	2300,3	2991,2
1000	2219,5	1721,0	1412,3	1399,3	1479,7	1330,2	1414,4	2243,8	2647,0	3564,8
1100	2476,6	1910,9	1564,9	1553,8	1629,0	1469,6	1570,1	2655,5	-	-
1200	2732,8	2113,6	1721,7	1708,3	1802,5	1614,5	1726,3	2738,3	-	-
1300	2992,4	2321,1	1879,5	1862,8	1970,0	1758,5	1926,8	2994,9	-	-
1400	3256,3	2536,3	2038,6	2021,9	2133,5	1904,2	2042,8	3246,2	-	-
1500	3520,0	2750,9	2272,7	2180,6	2298,2	2072,5	2199,8	3497,4	-	-
1600	3784,6	2977,4	2355,6	2337,6	2463,2	2200,3	2361,5	3747,4	-	-
1700	4049,7	3204,6	2515,5	2496,7	2629,8	2350,5	2521,8	4005,3	-	-
1800	4316,8	3430,4	2677,2	2660,0	2801,5	2505,5	2683,9	4262,4	-	-
1900	4584,8	3656,1	2836,3	2818,7	2974,9	2658,7	2847,2	4932,3	-	-
2000	4852,7	3889,7	3000,4	2871,0	3146,6	2813,7	3007,9	4651,7	-	-
2100	5124,8	4127,5	3162,4	3142,7	3315,3	2970,2	3174,2	5024,4	-	-
2200	5397,0	4362,8	3321,1	3309,0	3485,7	3132,3	3337,5	5284,0	-	-
2300	5669,2	4601,5	3510,3	3472,3	3661,1	3291,8	3502,4	5539,4	-	-
2400	5937,2	4840,1	3650,2	3636,4	3838,2	3452,6	3667,8	5799,0	-	-
2500	6213,5	5078,8	3820,6	3802,2	4012,3	3615,5	3834,8	6054,4	-	-
2600	6481,4	5325,8	3983,5	3968,8	4191,2	3779,1	4002,7	6309,8	-	-
2700	6753,6	5564,5	4151,8	4131,3	4362,8	3940,0	4166,9	6569,4	-	-

Кроме калориметрической и действительных температур горения различают понятия теоретической температуры горения, отличающейся от калориметрической учётом расхода тепла на диссоциацию H_2O и CO_2 . Для температур, присущих нагревательным печам, диссоциация H_2O и CO_2 ничтожно мала и теоретическую температуру можно считать равной калориметрической [2]. Результаты расчётов горения топлива сводятся в таблицу 1.5.

Таблица 1.5 - Результаты расчётов

Q_H^P , кДж/м³	L_d , м³/м³	$V_{d.г.}$, м³/м³	V_{CO_2} , %	V_{H_2O} , %	V_{O_2} , %	V_{N_2} , %	$\rho_г$, кг/м³	$\rho_{d.г.}$, кг/м³	$i_{нач.}$, кДж/м³	t_K , С°	t_d , С°

1.6 Пример расчета горения топлива

При расчете горения топлива необходимо определить:

- теплоту сгорания топлива Q_H^P , кДж/м³;
- расход воздуха L_D , м³/м³;
- количество продуктов сгорания V_D , м³/м³;
- состав продуктов сгорания;
- температуру горения топлива t_k , °С.
- тип топливосжигающего устройства;
- температуру подогрева воздуха.

Вычисление теплоты сгорания топлива, расхода воздуха и количества продуктов сгорания проводят по формулам, приведенным в подразделе 1.1-1.3. Предварительно проводят пересчет состава топлива с сухого на влажный.

Необходимо выполнить расчёт горения коксодового газа.

Состав сухого газа в процентах: $CH_4=11,7$; $CO=19,6$; $H_2=26,4$; $CO_2=6,5$; $N_2=35,8$.

Сжигание газа производят в длиннопламенной горелке, влажность газа $W=40$ г/м³, температура подогрева газа 100°С.

Объёмное содержание влаги в 100 м³ газа, %,

$$H_2O^{Bl} = \frac{100W}{803,6 + W} = \frac{40 \cdot 100}{803,6 + 40} = 4,741.$$

Коэффициент пересчёта с сухого состава газа на влажный:

$$K = \frac{100 - H_2O^{Bl}}{100} = \frac{100 - 4,741}{100} = 0,953.$$

Состав влажного газа, %:

$$CO_2^{Bl} = CO_2 K\% = 0,953 \cdot 6,5 = 6,194;$$

$$CO^{Bl} = CO K\% = 0,953 \cdot 19,6 = 18,678;$$

$$CH_4^{Bl} = CH_4 K\% = 0,953 \cdot 11,7 = 11,15;$$

$$H_2^{Bl} = H_2 K\% = 0,953 \cdot 26,4 = 25,159;$$

$$N_2^{Bl} = N_2 K\% = 0,953 \cdot 35,8 = 34,117.$$

Примечание. После пересчёта состава газа необходимо проверить, чтобы общее содержание газа, включая и H_2O , было равно $100\% \pm 2\%$.

Теплота сгорания газа, кДж/м³,

$$\begin{aligned} Q_H^P &= 127 CO^{Bl} + 108 H_2^{Bl} + 357 CH_4^{Bl} = \\ &= 127 \cdot 18,678 + 108 \cdot 25,159 + 357 \cdot 11,15 = 9069,828. \end{aligned}$$

Теоретический расход воздуха, м³/м³,

$$L_0 = 0,0476[0,5CO^{Bл} + 0,5H_2^{Bл} + 2CH_4^{Bл}](1 - 0,00124 d_B) =$$

$$= 0,0476 \cdot (0,5 \cdot 18,678 + 0,5 \cdot 25,159 + 2 \cdot 11,15) \cdot (1 - 0,00124 \cdot 10) = 2,079,$$

где d_B – влагосодержание сухого воздуха, приняли $d_B = 10$ г/м³.

Действительный объём воздуха, м³/м³,

$$L_0 = L_0 \alpha = 1,15 \cdot 2,079 = 2,39,$$

где $\alpha = 1,15$.

Объём продуктов сгорания, м³/м³:

$$V'_{CO_2} = 0,01(CO^{Bл} + CO_2^{Bл} + CH_4^{Bл}) = 0,01 \cdot (18,678 + 6,194 + 11,15) = 0,36;$$

$$V'_{H_2O} = 0,01(H_2^{Bл} + 2CH_4^{Bл} + H_2O^{Bл} \frac{0,124 d_B \cdot L_0}{1 + 0,00124 d_B}) =$$

$$= 0,01 \cdot (25,159 + 2 \cdot 11,15 + 4,741 \cdot \frac{10 \cdot 2,39 \cdot 0,124}{1 + 0,00124 \cdot 10}) = 0,613;$$

$$V'_{O_2} = 0,21(\alpha - 1) \frac{L_0}{1 + 0,00124 d_B} = 0,21 \cdot (1,15 - 1) \cdot \frac{2,39}{1 + 0,00124 \cdot 10} = 0,074;$$

$$V'_{N_2} = 0,01(N_2^{Bл} + \frac{79L_0}{1 + 0,00124 d_B}) = 0,01 \cdot 34,117 + \frac{79 \cdot 2,39}{1 + 0,00124 \cdot 10} = 2,206;$$

$$V_{\partial.2} = V'_{CO_2} + V'_{H_2O} + V'_{O_2} + V'_{N_2} =$$

$$= 0,36 + 0,5983 + 2,206 + 0,074 = 3,235$$

Процентное содержание газов в продуктах сгорания, %:

$$V_{CO_2} = \frac{V'_{CO_2}}{V_{\partial}} \cdot 100\% = \frac{0,36 \cdot 100}{3,235} = 11,12;$$

$$V_{H_2O} = \frac{V'_{H_2O}}{V_{\partial}} \cdot 100\% = \frac{0,602 \cdot 100}{3,235} = 18,4;$$

$$V_{O_2} = \frac{V'_{O_2}}{V_{\partial}} \cdot 100\% = \frac{0,974 \cdot 100}{3,235} = 2,29;$$

$$V_{N_2} = \frac{V'_{N_2}}{V_{\partial}} \cdot 100\% = \frac{2,206 \cdot 100}{3,235} = 68,1.$$

$$V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{O_2} + V_{N_2} = 11,12 + 18,4 + 2,29 + 68,1 = 100\%.$$

Плотность газа, кг/м³,

$$\rho_2 = \frac{16CH_4^{Bл} + 2H_2^{Bл} + 28CO^{Bл} + 44CO_2^{Bл} + 28N_2^{Bл} + 18H_2O^{Bл}}{2240} =$$

$$= \frac{16 \cdot 11,5 + 2 \cdot 25,159 + 28 \cdot 18,678 + 44 \cdot 6,194 + 28 \cdot 34,117 + 18 \cdot 4,741}{2240} = 0,92.$$

Масса 1 м³ газа равна, кг,

$$m_2 = V_2 \rho_2 = 1 \cdot \rho_2 = 1 \cdot 0,92 = 0,92.$$

Масса 1 м³ воздуха, кг,

$$m_{\text{в}} = L_{\text{в}} \rho_{\text{в}} = 2,39 \cdot 1,287 = 3,076,$$

где $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха, $\rho_{\text{в}} = 1,29$ кг/м³.

Плотность продуктов сгорания, кг/м³,

$$\begin{aligned} \rho_{\text{д.г}} &= \frac{44V_{\text{CO}_2} + 18V_{\text{H}_2\text{O}} + 28V_{\text{N}_2} + 32V_{\text{O}_2}}{2240} = \\ &= \frac{44 \cdot 11,12 + 18 \cdot 18,4 + 28 \cdot 68,1 + 32 \cdot 2,29}{2240} = 1,25. \end{aligned}$$

Масса дымовых газов, кг,

$$m_{\text{д.г}} = V_{\text{д.г}} \rho_{\text{д.г}} = 3,235 \cdot 1,25 = 4,043.$$

где $\rho_{\text{д.г}}$ – плотность дымовых газов, кг/м³.

$$\begin{aligned} m_{\text{г}} + m_{\text{в}} &= m_{\text{д.г}} \\ 3,076 + 0,92 &= 4,043; \\ 3,996 &\approx 4,043. \end{aligned}$$

Погрешность расчёта материального баланса, %:

$$\Delta = \left| \frac{(m_{\text{г}} + m_{\text{в}}) - m_{\text{д.г}}}{m_{\text{д.г}}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{3,996 - 4,043}{4,043} \right| \cdot 100\% = 1,16\% < 1,5\%.$$

Расчёт выполнен верно.

Теплосодержание продуктов горения, кДж/м³,

$$i_{\text{о}} = \frac{Q_{\text{H}}^{\text{P}}}{V_{\text{д.г}}} = \frac{9069,828}{3,076} = 2787,55.$$

Теплосодержание подогретого воздуха, кДж/м³,

$$i_{\text{в}} = \frac{L_{\text{в}} t_{\text{в}} C_{\text{в}}}{V_{\text{д.г}}} = \frac{2,39 \cdot 300 \cdot 1,32}{3,235} = 292,56,$$

где $C_{\text{в}} = 1,32$ кДж/(м³°C) (определяется по таблице 1.3).

$$\begin{aligned} i_{\text{г}} &= \frac{0,01}{V_{\text{д.г}}} t_{\text{г}} (CH_4^{\text{Бл}} \cdot C_{CH_4} + H_2^{\text{Бл}} \cdot C_{H_2} + CO^{\text{Бл}} \cdot C_{CO} + CO_2^{\text{Бл}} \cdot C_{CO_2} + N_2^{\text{Бл}} \cdot C_{N_2}) = \\ &= \frac{0,01 \cdot 100}{3,235} \cdot (11,15 \cdot 2,448 + 25,159 \cdot 1,445 + 18,678 \cdot 1,044 + 6,194 \cdot 0,914 + \\ &+ 34,117 \cdot 1,034) = 38,35. \end{aligned}$$

Начальное теплосодержание продуктов сгорания, кДж/(м³°C),

$$i_{\text{нач}} = i_{\text{о}} + i_{\text{в}} + i_{\text{г}} = 2787,55 + 292,56 + 38,35 = 3403,94.$$

Задаёмся предполагаемой температурой горения: $t'_{\text{к}} = 2000^\circ\text{C}$. Тогда теплосодержание продуктов сгорания, кДж/м³:

$$i_{CO_2}^1 = 0,01 V_{CO_2} i_{CO_2} = 0,01 \cdot 11,7 \cdot 4852,7 = 567,66;$$

$$i_{H_2O}^1 = 0,01 V_{H_2O} i_{H_2O} = 0,01 \cdot 19,57 \cdot 3889,7 = 761,21;$$

$$i_{O_2}^1 = 0,01V_{O_2}i_{O_2} = 0,01 \cdot 2,4 \cdot 3156,6 = 75,52;$$

$$i_{N_2}^1 = 0,01V_{N_2}i_{N_2} = 0,01 \cdot 66,33 \cdot 2971,0 = 1970,66;$$

$$i_1 = i_{CO_2}^1 + i_{H_2O}^1 + i_{O_2}^1 + i_{N_2}^1 = 567,77 + 761,21 + 75,52 + 1970,66 = 3375,16.$$

Сравниваем i_1 и $i_{нач}$: $3375,16 < 3403,94$.

Задаёмся температурой, $t_k^2 = t_k' + 100 = 2000 + 100 = 2100^\circ C$.

Теплосодержание продуктов горения при этой температуре, кДж/(м³°C):

$$i_{CO_2}^2 = 0,01V_{CO_2}i_{CO_2} = 0,01 \cdot 11,7 \cdot 5124,8 = 599,6;$$

$$i_{H_2O}^2 = 0,01V_{H_2O}i_{H_2O} = 0,01 \cdot 19,57 \cdot 4127,5 = 807,75;$$

$$i_{O_2}^2 = 0,01V_{O_2}i_{O_2} = 0,01 \cdot 2,4 \cdot 3315,3 = 79,57;$$

$$i_{N_2}^1 = 0,01V_{N_2}i_{N_2} = 0,01 \cdot 66,33 \cdot 3142,7 = 2084,55;$$

$$i_2 = i_{CO_2}^2 + i_{H_2O}^2 + i_{O_2}^2 + i_{N_2}^2 = 599,6 + 807,75 + 79,57 + 2084,55 = 3571,77.$$

Сравниваем i_2 и $i_{нач}$,

$$3571,77 > 3403,94.$$

Так как $i_2 > i_{нач}$, то калориметрическая температура определяется по формуле, °C,

$$t_k = t_k' + \frac{i_{нач} - i_1}{i_2 - i_1} \cdot 100 = 2000 + \frac{3403,94 - 3375,16}{3571,77 - 3375,16} \cdot 100 = 2015.$$

Действительная температура, °C,

$$t_\partial = t_k \cdot \eta_{нур} = 2015 \cdot 0,75 = 1511,25,$$

где $\eta_{нур} = 0,75$.

Таблица 1.6 – Результаты расчета

Q_H^P , кДж/м ³	L_∂ , м ³ /м ³	$V_{\partial.г}$, м ³ /м ³	V_{CO_2} , %	V_{H_2O} , %	V_{O_2} , %	V_{N_2} , %	$\rho_{г}$, кг/м ³	$\rho_{\partial.г}$, кг/м ³	$i_{нач}$, кДж/м ³	t_K , C°	t_∂ , C°
9069,88	2,39	3,235	11,12	18,4	2,29	68,1	0,92	1,25	3403,94	2015	1511,25

2 Расчёт основных размеров печи

Конструкции и габаритные размеры нагревательных печей в машиностроительном производстве разнообразны, так как в них нагревают заготовки разных форм по сечению и длине [1]. Главными критериями для выбора печи служат:

- способ производства поковок (свободная ковка или штамповка);
- характер производства (единичное, мелкосерийное, серийное, массовое);
- особенности нагрева металла (температура, энергоноситель);
- степень допустимого окалинообразования (обычный или безокислительный нагрев).

В условиях единичного и мелкосерийного производства нагревательная печь должна быть универсальной, так как размеры и форма нагреваемых заготовок могут изменяться в широком диапазоне. В таких условиях целесообразнее применять камерные печи.

В случае необходимости нагрева только концов заготовок под последующую штамповку высадкой (например, на ГКМ) используют очковые печи для коротких заготовок и щелинные – для длинных заготовок (прутков).

Нагрев крупных слитков для устранения трещинообразования возможен только в камерных печах с переменной температурой в рабочем пространстве и выкатным подом (рис 2.1).

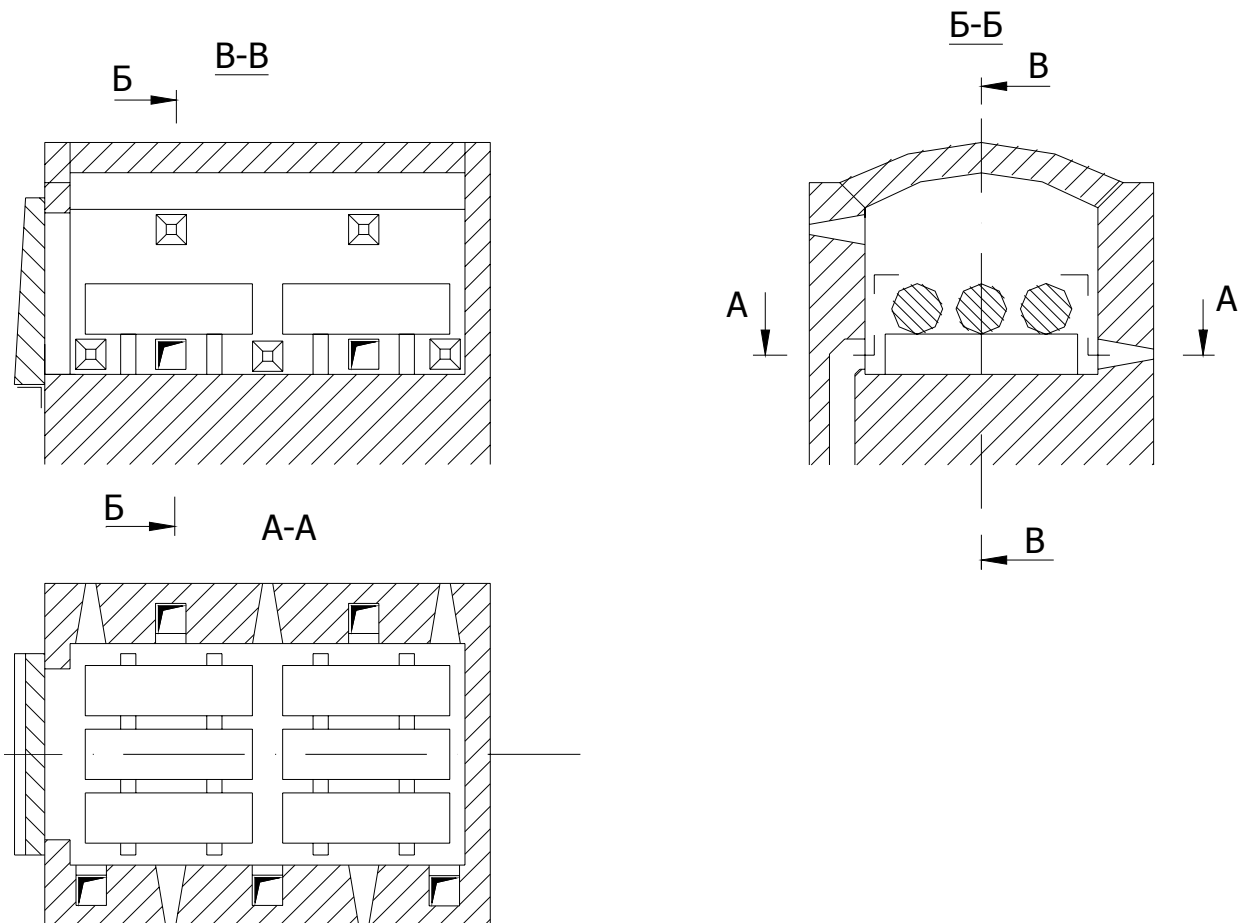


Рисунок 2.1 – Эскиз камерной печи с выкатным подом

Увеличение масштабов производства требует использование печей со средствами автоматизации и механизации загрузочно-выгрузочных работ. В этом случае эффективней всего применение методических и полуметодических печей толкательного типа (рис. 2.2).

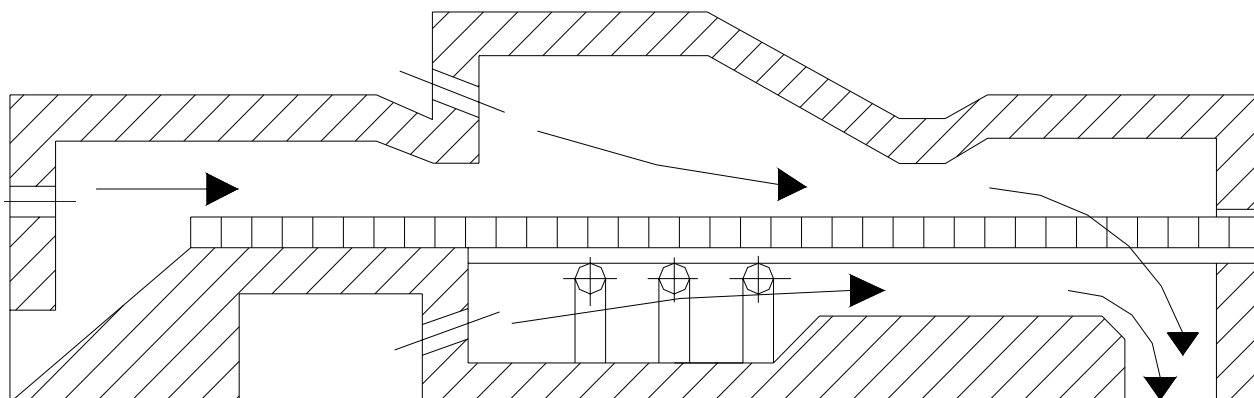


Рисунок 2.2 – Эскиз методической печи

В условиях массового производства небольших заготовок для уменьшения затрат топлива и увеличения качества поковок следует внедрить скоростной нагрев в специальных камерных высокотемпературных печах, в том числе и рециркуляционного типа.

Приведённые рекомендации не являются полными и оптимальными. При выборе нагревательного устройства необходимо учитывать условия работы конкретного производства [1]. Тип печи задаётся в индивидуальном задании или обосновывается студентом самостоятельно, как наиболее рациональный.

Размеры рабочего пространства печи должны учитывать такие условия. Длина печи L и ширина B пода должны обеспечивать заданную производительность печи G , высота H – условию полного сгорания топлива, теплообмена между печными газами и заготовками, садке в рабочем пространстве. Размеры пода зависят от продолжительности нагрева τ [1].

Если в печи нагревают заготовки одинаковых размеров и формы, то её продуктивность определяется в штуках N . Масса металла, которая одновременно нагревается в печи,

$$K = G\tau = Ng\tau,$$

где G – производительность печи, кг/ч;

τ – продолжительность нагрева, ч;

g – масса одной заготовки, кг.

2.1 Расчёт размеров камерной печи

Исходными данными для расчёта площади пода камерных печей служат: производительность печи, напряжённость активного пода или размеры и количество нагреваемых изделий (оговаривается в индивидуальном задании).

В случае известных размеров и количества заготовок, одновременно находящихся в печи, расчёт ведут следующим образом.

Определяется количество рядов и заготовок в ряду. Заготовки в печи (ряды) размещают параллельно боковым стенкам печи (рис. 2.3). Ширина пода B определяется шириной заготовок S и количеством рядов по ширине n . Для садочных камерных печей ширина пода, м,

$$B = nS + (n - 1)\delta + 2a, \quad (2.1)$$

где S – размер заготовки в горизонтальном направлении, для цилиндрических заготовок $S = d_{заг}$;

δ – зазор между заготовками $\delta = (1...2)S$;

a – зазор между заготовками и стенками $a = (1...2)S$.

Длина рабочего пространства печи, м,

$$L = ml + (m - 1)\delta + 2b, \quad (2.2)$$

где m – количество заготовок в ряду;

l – длина заготовки, м;

b – зазор между заготовками и торцевыми стенками печи, м $b = (1...2)S$.

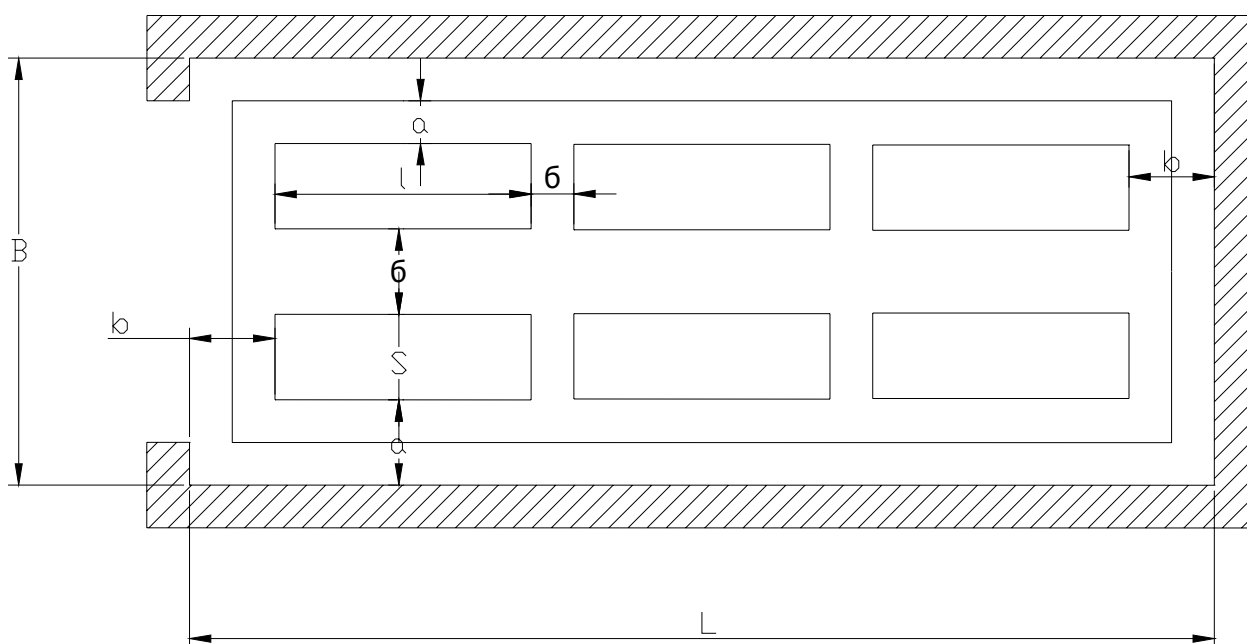


Рисунок 2.3 – Вид камерной печи сверху с продольным расположением заготовок

В случае размещения заготовок перпендикулярно боковым стенкам в формуле (2.1) ширина заготовок S меняется на длину l , а в формуле (2.2) длина l – на ширину S .

По найденным значениям B и L определяют полную площадь пода F_n . Под полезной площадью пода понимают ту часть пода, которая занята

металлом,

$$F_n = BL.$$

Общая высота рабочего пространства печи, м,

$$H_0 = H + h_{np} + S_B K + (K - 1)\Delta,$$

где H – высота от садки по верхней точки заготовки до свода печи, для пламенных печей она определяется по формуле М.А. Глинкова,

$$H = 0,001(0,6 + 0,05B)t_n,$$

где K – количество заготовок по высоте (этажей), шт.;

B – ширина рабочего пространства печи, м;

Δ – зазор по высоте между заготовками (0,1...0,3 м);

t_n – температура печи, °С, зависит от марки материала заготовки (табл. 2.1);

S_B – вертикальный размер заготовки, (для заготовок круглого сечения – диаметр) м;

h_{np} – высота проложки под заготовками (0,1...0,5 м).

Примечания:

1 Ширина пода камерной печи не должна превышать 6м.

2 В целях снижения потерь тепла при выгрузке и загрузке заготовок необходимо, чтобы печь имела в плане прямоугольную форму, с соотношением длины L к ширине B :

– для камерных с неподвижным подом - $L / B = 1,2 \dots 2,0$;

– для камерных с выкатным подом - $L / B = 2 \dots 4$.

3 При больших соотношениях рекомендуется увеличить число рядов по ширине, по высоте или изменить расположение заготовок (перпендикулярно боковым стенкам).

Большинство камерных печей для нагрева поковок имеют арочный свод. Стрела арочного свода, м,

$$h_{CT} = \frac{B}{2} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{4}, \quad (2.3)$$

где B – ширина печи, м;

α – центральный угол, принимают 60° – для небольших печей, 120° – для крупных печей.

Радиус арочного свода принимают равным ширине печи B ($R_{св} = B$).

Максимальная высота свода, м, $H_{\max} = H + h_{CT}$.

Средняя высота печи, м, $H_{cp} = \frac{H + H_{\max}}{2}$.

При ширине печи более 3,5 м свод принимается плоским (подвесным). Для небольших камерных печей, которые работают с постоянной температурой, высота рабочей камеры $H=0,4 \dots 0,9$ м, а для крупных печей с переменной температурой высота может составлять от 2 до 5 м.

Таблица 2.1 - Температуры печи и нагрева заготовок под ОМД

Марка стали	Нагрев доковки		Температурный интервалковки		
	Температура печи при выдержке (± 20), t_n	Максимальная температура металла T_H	Началоковки $T_{H.K}$	Окончаниековки $T_{П.К.К}$	
				При интенсивных обжатиях	При проглаживании
Ст0...Ст3, 10...35, 08кп	1300	1280	1250	750	700
Ст4...Ст6, 15Х...40Х, 38ХА, 22К-ЭВ1	1300	1280	1250	800	700
15ХМА, 25Н...35Н, 15ХМ...35ХМ, 20ХНВА, 30ХНМА, 20Г...30Г, 16ГНМА, 40, 45	1270	1250	1210	800	750
12ХН2А, 12Х1МФ, 15Х2МФА, 25Х1МФ, 1Х2М	1270	1250	1210	850	800
12Х2Н4А, 20Х2Н4А, 40НМА				800	700
15ХНМФ, 12Х13, 20Х13				850	800
50...60, 45Х...55Х, 35Г...50Г, 50Г2, 50НТ, 50С2, 09Г2С, 20ХМА...50ХМА, 40Н, 40ХН...60ХН, 14ХГСА...35ХГСА 08ГДНФ, Р2МА, 34ХН1МА, 25ХСНВФА, 5ХВС, 5ХНМ, 5ХГС, 20Х2МФА, 30Х2М1Ф1Н, 20ХН3МФА, 35ХНВ, 15Х2НМФА, 10ГН2МФА, 38ХМЮА, 08Х18Н10Т	1240	1220	1200	800	750
12Х18Н10Т, 08Х18Н12Т, 10Х17Н13М2Т	1220	1190	1180	900	850
35ХГ2; 38ХГН; Х12М; 60ХГ; 4Х5В2ФС; 38ХС	1220	1190	1180	850	800

2.2 Предварительный расчет размеров методической печи

Современные кузнечно-прессовые цеха имеют в своём составе скоростное оборудование: кривошипные горячештамповочные прессы (КГШП), радиально-ковочные машины и т.д. Для возможности обеспечения их производительности необходимо непрерывно обеспечивать подачу качественно нагретого металла. Этим требованиям лучше всего отвечают методические и полуметодические проходные печи [1].

С точки зрения тепловой работы принципиальных различий между печами нет, или имеется различное соотношение геометрических размеров рабочего пространства: в полуметодических печах - соотношение $L/B = 4$; в методических - L/B до 8. Полуметодические печи чаще всего имеют две зоны нагрева, методические - три, особенно для термически толстых заготовок ($S > 100$ мм).

Для методических и полуметодических нагревательных печей габариты печей и длина зон определяются при заданных производительностях, размерах заготовок.

Обычно длинные заготовки в методических проходных печах толкательного типа располагаются в один ряд, причём длина заготовки l совпадает с шириной печи B , м [4], $B = nl + (n + 1)a + (n - 1)\delta$,

где n – количество рядов;

a – зазор между торцами заготовок и боковыми стенками печи (принимается 0,1...0,3 м);

δ – зазор между заготовками, при $n > 1$ принимается 0,25...0,3 м.

Короткие заготовки можно расположить в несколько рядов. Количество рядов также зависит и от производительности печи. Расчёт длины печи можно производить различными способами в зависимости от исходных данных.

а) Длина активного пода толкательных печей ограничена максимальной длиной проталкивания. В случае квадратной заготовки в печи можно располагать не более 200...220 заготовок, а для слабов – 250 штук.

$$L_{акт} = mS,$$

где m – количество заготовок в ряду, шт.;

S – горизонтальный размер заготовок, м.

б) Длину печи при n – рядной загрузке, можно определить через активную площадь пода печи, м [5]:

$$L_{акт} = \frac{F_{акт}}{l \cdot n},$$

где $F_{акт}$ – активная площадь пода, м²;

l – длина заготовки, м;

n – число рядов заготовок в печи.

Ориентировочно длина методической печи составляет 25...40 м. При больших длинах печи следует применять двухрядную загрузку.

Активную площадь пода методической печи можно определить,

$$F_{akm} = \frac{G}{K},$$

где K – коэффициент напряжённости пода (удельная производительность печи), $\frac{кг}{(м^2 \cdot ч)}$, принимается от 300 до 1000 $\frac{кг}{(м^2 \cdot ч)}$ [6];

G – производительность кузнечного оборудования, $\frac{кг}{ч}$, задаётся в исходных данных.

в) Размеры методической печи можно определить исходя из производительности, размера и времени нагрева заготовки. Садка металла, который постоянно находится в печи, кг [3],

$$M_M = G\tau,$$

где τ – время нагрева заготовки, ч, можно определить по эмпирической формуле Н.Ю. Тайца [7]: $\tau = \frac{(7,5 + 0,05S)S}{60}$,

или по формуле,

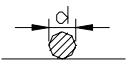
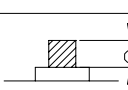




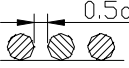
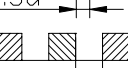
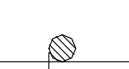
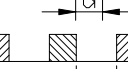
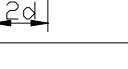
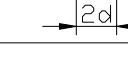
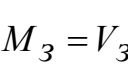

$$\tau = \alpha_p K S \sqrt{S},$$

где S – толщина или диаметр заготовки, м;

α_p – коэффициент, учитывающий способ размещения заготовки на поду печи (таблица 2.2);

K – коэффициент: для углеродистых сталей – 10, для легированных и высокоуглеродистых – 20.

Таблица 2.2 - Коэффициент, учитывающий способ размещения заготовки на поду

Размещение заготовок	L_p	Размещение заготовок	L_p
	1		1
	1		1.4
	2		4
	2		2.2
	1.4		2
	1.3		1.8
			

Масса одной заготовки, кг, $M_3 = V_3 \rho$,

где V_3 – объём заготовки, м³;

ρ – плотность металла, можно принимать усредненно 7850 кг/м³.

$$V_3 = F_3 l,$$

$$F_3^{кр\text{уг}} = \frac{\pi}{4} d^2; \quad F_3^{пр\text{ям}} = ab,$$

где $F_3^{кр\text{уг}}$ и $F_3^{пр\text{ям}}$ – площадь поперечного сечения заготовки для круглого и прямоугольного сечения.

Количество заготовок, постоянно находящихся в печи, шт, $N = \frac{M_M}{M_3}$.

При $N < 200$ штук делают однорядную печь, длина которой, м, $L = SN$,

при двухрядной печи - $L = S \frac{N}{2}$.

Высоту методических печей над поверхностью заготовок определяют конструктивно по опыту хорошо работающих печей. Высота расположения свода в каждой зоне по формуле М.А. Глинкова, м, $H = 0,001(A + 0,05B)t_2$,

где A – коэффициент, равный 0,5 – 0,55 для частей печи с температурой газов меньше 900°С и 0,65 - с температурой больше 1500°С;

t_2 – температура газов в определяемой части печи, °С;

B – ширина печи.

Высота боковых стен $H_0 = H + S_B$.

Для определения объёмов зон печи с арочным сводом необходимо знать

среднюю высоту боковых зон, $H^{cp} = \frac{S_B + H + H^{\max}}{2}$.

Как правило, методические печи имеют две или три зоны в зависимости от размеров (сечения) нагреваемых заготовок. Средняя высота свода печи в этих зонах различна: высота сварочной зоны – 2...3,2 м; высота томильной зоны – 1,2...1,5 м; методической – 1,0...1,2 м; высота пережимов – 0,6...0,7 м. В дальнейших расчётах будет применяться средняя высота печи для упрощения расчётов.

Так же как и для камерных печей, свод выбирается в зависимости от ширины печи. Если ширина печи меньше 3,5 м, то свод принимается арочным, иначе – плоским, подвесным [1]. Размеры арочного свода рассчитываются так же, как и для камерных печей по формуле (2.3).

Окончательные размеры методической печи (длина зон) определяются при расчёте теплообмена в рабочем пространстве.

В конце пункта приводится в масштабе схема расположения заготовок на поду печи, горизонтальный и вертикальный разрез с указанием основных размеров печи, заготовок и величиной зазоров (между заготовками в двух направлениях; между заготовками и стенками печи), приводится соотношение L / B (смотри пример расчёта).

2.3 Пример расчёта камерной печи

Рассчитать размеры камерной печи с выкатным подом. Исходные данные для расчёта:

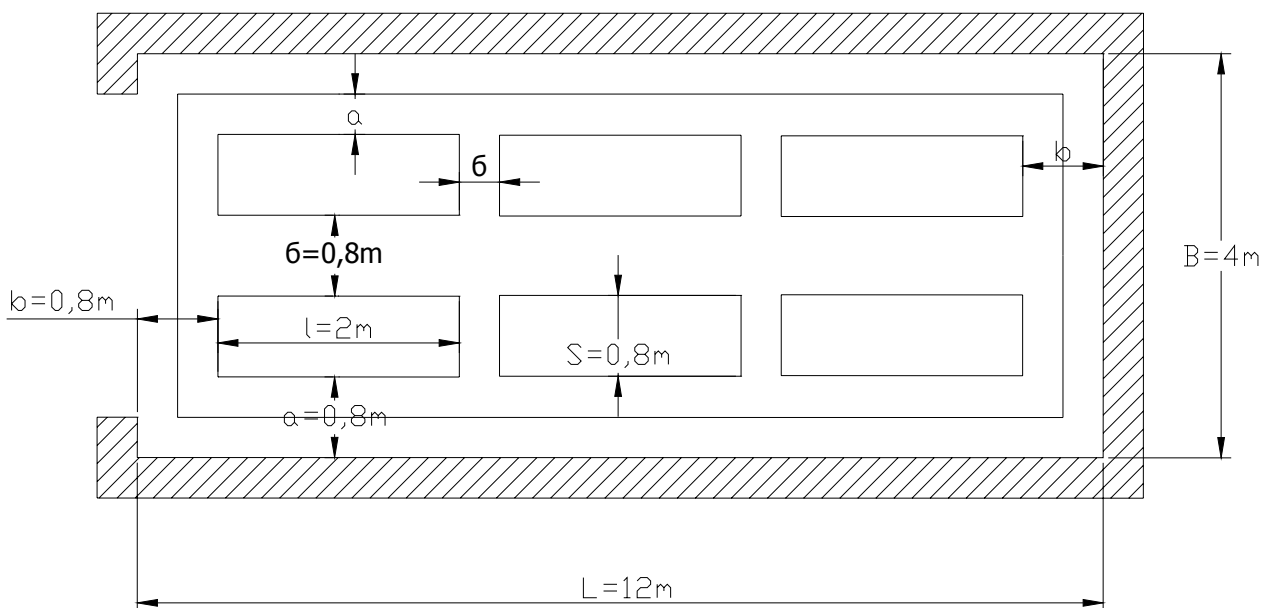
- длина заготовок $l = 2$ м;
- сечение $S = 0,8$ м;
- количество заготовок $N = 8$ шт.;
- материал - Сталь 40ХН.

Основные размеры камерной печи – ширина B , длина L и высота H .

Принимаем рекомендуемое расположение заготовок – параллельно боковым стенкам печи (рис. 2.4) в два ряда, по 4 шт. в ряду: $n = 2$; $m = 4$; $k = 1$.

Ширина пода, м, $B = nS + (n - 1)\delta + 2a = 2 \cdot 0,8 + (2 - 1) \cdot 0,8 + 2 \cdot 0,8 = 4$.

Длина пода, м, $L = ml + (m - 1)\delta + 2b = 4 \cdot 2 + (4 - 1) \cdot 0,8 + 2 \cdot 0,8 = 12$.



Масштаб 1:100 $L/B=3$

Рисунок 2.4 – План камерной печи с выкатным подом

$$\frac{L}{B} = \frac{12}{4} = 3 - \text{соотношение не выходит из рекомендуемого диапазона.}$$

Полная площадь пода печи, м^2 , $F_n = BL = 4 \cdot 12 = 48$

Высота рабочего пространства печи, м, $H_0 = H + h_{np} + S_B K + (K - 1)\Delta$;

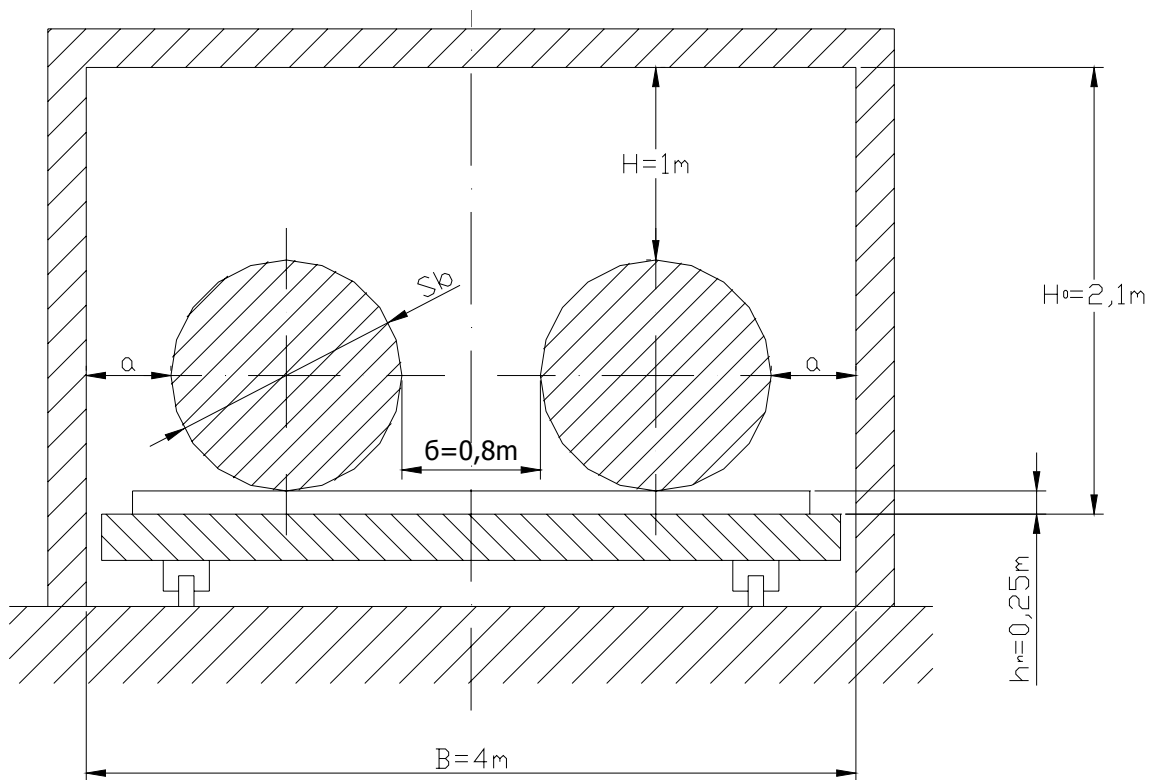
$$H = 0,001(0,6 + 0,05B)t_n = 0,001 \cdot (0,6 + 0,05 \cdot 4) \cdot 1240 = 0,992.$$

Принимаем: $H = 1$ м.

$$H_0 = 1 + 0,25 + 0,8 \cdot 1 = 2,05.$$

Округляем до $H_0 = 2,1$ м.

Так как ширина печи больше 3,5 м, то принимаем свод плоский подвесной. Вертикальный разрез печи представлен на рисунке 2.5.



Масштаб 1:100

Рисунок 2.5 – Вертикальный разрез камерной печи с выкатным подом

2.4 Пример расчёта методической печи

Рассчитать ориентировочные (предварительные) размеры методической печи.

Исходные данные

- длина заготовки $l = 2,2$ м;
- сечение $S = 0,3 \times 0,4$ м²;
- производительность печи $G = 30$ т/ч;
- материал - Сталь 45;
- температура уходящих газов $t_{yx.} = 750^\circ\text{C}$;
- температура нагрева $t_H = 1240^\circ\text{C}$ (табл. 2.1).

а) Принимается однорядное расположение заготовок (большая относительная длина заготовки 2,2 м и относительно невысокая производительность).

В этом случае ширина печи, м,

$$B = nl + (n + 1)a + (n - 1)\delta = 1 \cdot 2,2 + (1 + 1) \cdot 0,15 + 0 = 2,5$$

б) Длину печи по известной производительности можно определить, м:

$$L_{акт} = \frac{F_{акт}}{l \cdot n}; \quad F_{акт} = \frac{G}{K} = \frac{30 \cdot 1000}{400} = 75 \text{ м}^2; \quad L_{акт} = \frac{75}{2,2 \cdot 1} = 34,09$$

Принимаем: $L = 0,4$ м.

в) Время нагрева заготовок, ч, $\tau = \alpha_p K S \sqrt{S} = 4 \cdot 10 \cdot 0,4 \cdot \sqrt{0,4} = 7,6$.

Масса металла в печи, кг, $M_m = G \cdot \tau = 30 \cdot 10^3 \cdot 7,6 = 228000$.

Масса одной заготовки, кг, $M_3 = V_3 \rho = 0,3 \cdot 0,4 \cdot 2,2 \cdot 7850 = 2072$.

Количество заготовок в печи, шт., $N = \frac{228000}{2072} = 110$

Длина однорядной методической печи, м, $L = SN = 0,3 \cdot 110 = 33$.

При нагреве термически толстых заготовок (сечение больше 100 мм) применяют трёхзонные методические печи с томильной зоной для выравнивания температур по сечению. Расстояние от верхней поверхности заготовок до свода печи для каждой зоны:

методической с температурой примерно 750°C , м, -

$$H_{мет} = 0,001 \cdot (0,5 + 0,05 \cdot 2,5) \cdot 750^\circ\text{C} = 0,47 \approx 0,5;$$

сварочной с температурой до 1500°C , м, -

$$H_{св} = 0,001 \cdot (0,6 + 0,05 \cdot 2,5) \cdot 1500^\circ\text{C} = 1,16 \approx 1,2;$$

томильной при температуре нагрева $t_H = 1240^\circ\text{C}$, м, -

$$H_T = 0,001 \cdot (0,6 + 0,05 \cdot 2,5) \cdot 1240^\circ\text{C} = 0,899 \approx 0,9.$$

При ширине печи $B = 2,5$ м принимаем арочный свод со стрелой прогиба, м,

$$h_{CT} = \frac{B}{2} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{4} = \frac{2,5}{2} \operatorname{tg} \frac{120^\circ}{4} = 0,72 \approx 0,7.$$

Радиус арки, м, $R_{св} = B = 2,5$.

Максимальная высота каждой зоны, м:

$$H_{мет}^{\max} = S_B + H_{мет} + H_{CT} = 0,4 + 0,5 + 0,7 = 1,6;$$

$$H_{св}^{\max} = S_B + H_{св} + H_{CT} = 0,4 + 1,2 + 0,7 = 2,3;$$

$$H_T^{\max} = S_B + H_T + H_{CT} = 0,4 + 0,9 + 0,7 = 2,0.$$

Высота зон методической печи от пода до свода, м:

$$H_0^{мет} = H_{мет} + S_B = 0,5 + 0,4 = 0,9;$$

$$H_0^{св} = H_{св} + S_B = 1,2 + 0,4 = 1,6;$$

$$H_0^T = H_T + S_B = 0,9 + 0,4 = 1,3.$$

Средняя высота печи по зонам, м:

$$H_{мет}^{cp} = \frac{S_B + H_{мет} + H_{мет}^{\max}}{2} = \frac{0,4 + 0,5 + 1,6}{2} = 1,25;$$

$$H_{св}^{cp} = \frac{S_B + H_{св} + H_{св}^{\max}}{2} = \frac{0,4 + 1,2 + 2,3}{2} = 2,05;$$

$$H_T^{cp} = \frac{S_B + H_T + H_T^{\max}}{2} = \frac{0,4 + 0,9 + 2}{2} = 1,65.$$

Предварительная схема печи представлена на рис. 2.6, 2.7.

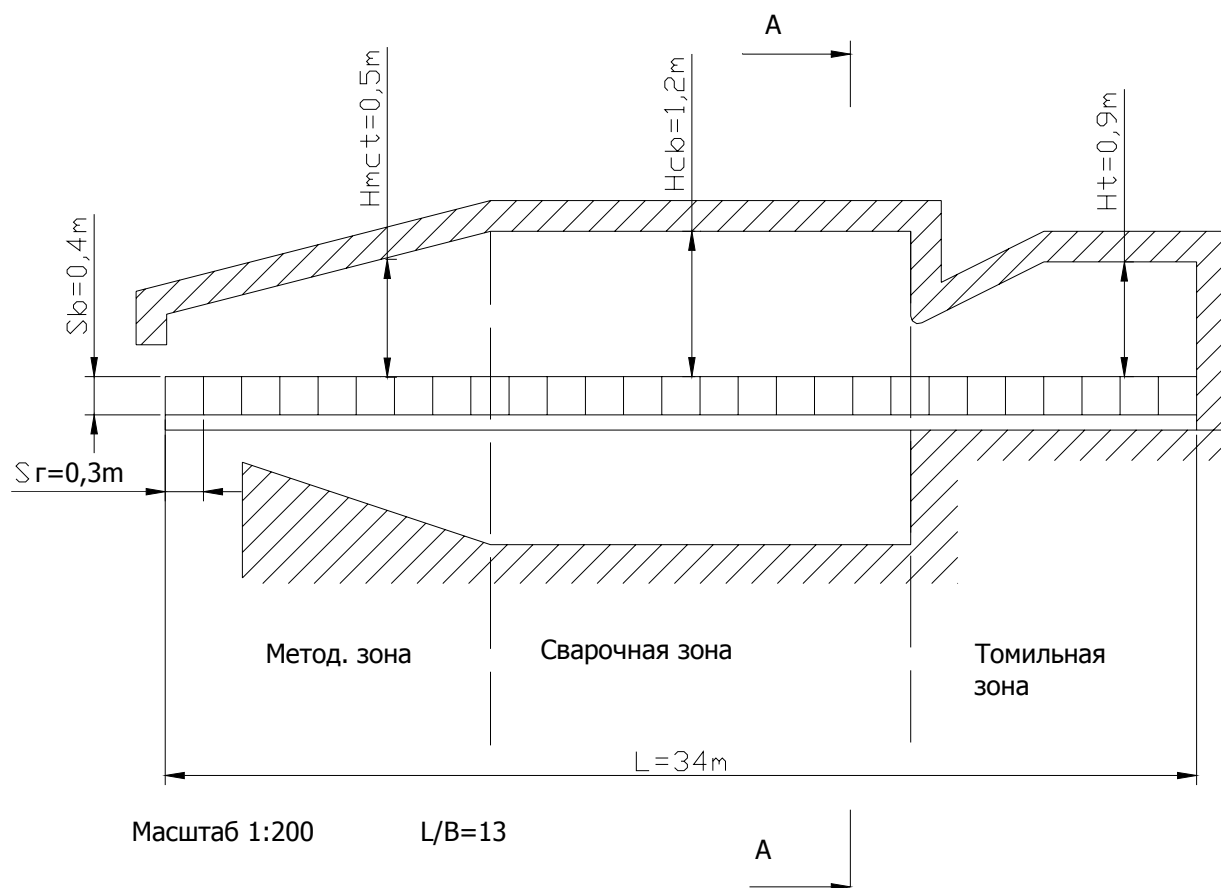


Рисунок 2.6 – Схема продольного разреза методической печи

A-A

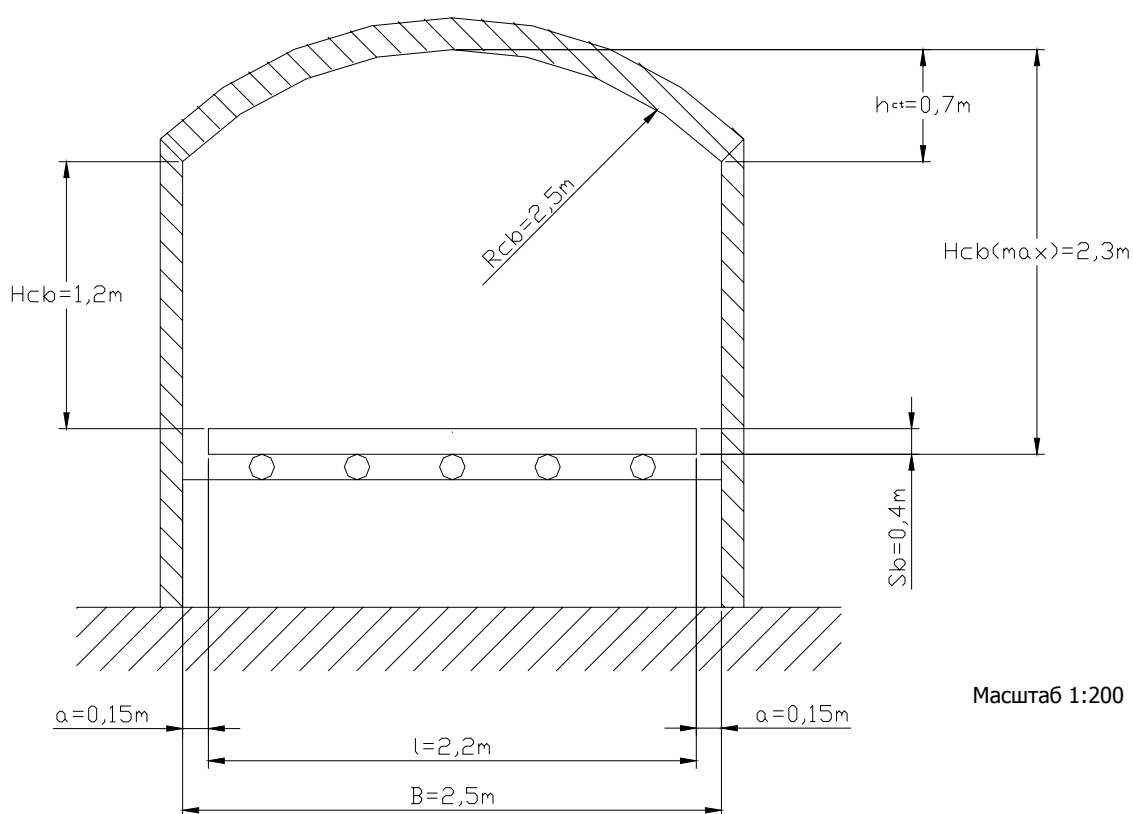


Рисунок 2.7 – Поперечный разрез методической печи в сварочной зоне

3 Расчёт теплообмена в рабочем пространстве печи

Одним из основных способов передачи тепла (85 - 95 %) от печи к нагреваемым заготовкам является теплообмен излучением, остальное - конвекцией. Чем выше температура, тем большее значение имеет излучение [2].

Суть расчёта теплообмена излучением сводится к определению общей степени черноты системы «газ – кладка – металл».

3.1 Теплообмен в камерных печах

Различают камерные печи с постоянной и изменяющейся температурой рабочего пространства. Второй тип печей применяют для нагрева и термической обработки термически толстых заготовок (с сечением $S > 100 \text{ м}$). Они, как правило, работают по многоступенчатому режиму нагрева для исключения возникновения больших термических напряжений, которые могут привести к трещинообразованию.

Режим нагрева заготовок разрабатывается студентом самостоятельно в зависимости от геометрических размеров заготовки и химического состава сплава. График режима нагрева приводится в пояснительной записке.

Применяют два режима (рис. 3.1): нагрев холодных (рис. 3.1,а) и нагрев горячих (рис. 3.1,б) заготовок. Температура заготовок T_3 оговаривается в исходных данных. Холодной считается заготовка с температурой в центре ниже $400...500^\circ\text{C}$.

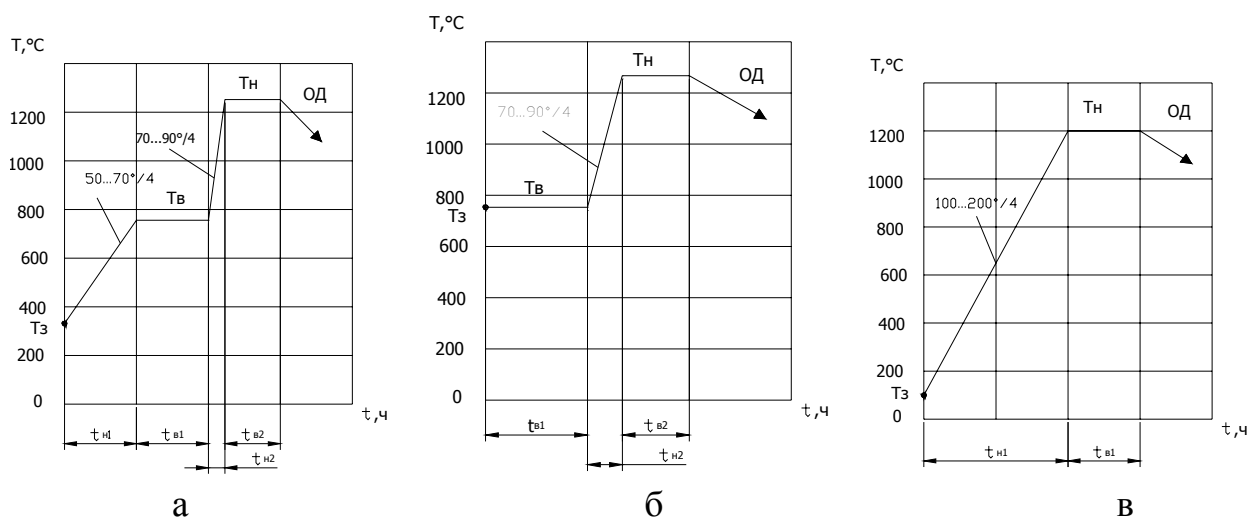


Рисунок 3.1 – Предварительные режимы нагревов холодной (а), горячей (б) заготовки и в печах с постоянной температурой или методических печах (в)

При разработке режима нагрева необходимо учитывать, что холодные заготовки нагреваются до температуры нагрева $T_н$ за два этапа. Температура нагрева $T_н$ определяется по таблице 2.1. Температура выдержки $T_в$ назначается в диапазоне $650...800^\circ\text{C}$, когда сталь приобретает достаточную пластичность. Скорость нагрева до $T_в$ невысока, зависит от сечения и материала заготовки и

принимается в диапазоне $V_{H_1} = 50...70^\circ\text{C}/\text{ч}$. Увеличение пластичности заготовки при температуре T_B позволяет увеличить скорость нагрева до $V_{H_2} = 70...90^\circ\text{C}/\text{ч}$ для уменьшения величины угара и увеличения производительности печи. Время нагревов можно рассчитать по формулам, ч:

$$\tau_{H_1} = \frac{T_B - T_3}{V_{H_1}}, \quad \tau_{H_2} = \frac{T_H - T_B}{V_{H_2}}.$$

Время выдержек τ_{B_1}, τ_{B_2} для выравнивания температур по сечению заготовки можно принимать от 0,5 до 1,5 ч на 100 мм сечения в зависимости от степени легированности. После выдержки при температуре T_H заготовка поступает на обработку давлением (ОД). Расчёт основных параметров нагрева горячих заготовок производится аналогично.

Так как камерная печь с выдвижным подом работает по изменяющемуся температурному режиму от комнатных температур до температуры нагрева заготовок, то наряду с излучением необходимо учитывать и конвекцию, за счёт которой в основном нагревается заготовка до температур $500...800^\circ\text{C}$ (в первый период нагрева).

При нагреве термически тонких заготовок применяют печи с постоянной температурой рабочего пространства. В этом случае нагрев производится от начальной температуры заготовки T_3 до температуры нагрева T_H (см. рис. 3.1, в, табл. 2.1).

Скорость нагрева V_H можно принимать от 100 до $200^\circ\text{C}/\text{ч}$, так как для тонких заготовок уменьшается вероятность трещинообразования. Время нагрева τ_{H_1} определяется аналогично тому, как для нагрева в камерных печах с выкатным подом. Время выдержки τ_{B_1} можно принять $1/3$ времени нагрева τ_{H_1} .

Для методических печей предварительный режим нагрева аналогичен (см. рис. 3.1, в). Время нагрева в методической и сварочных зонах τ_{H_1} определяется по формуле $\tau = (7 + 0,05d)d$. Время выдержки в томильной зоне составит $1/3$ от τ_{H_1} .

Геометрические параметры излучения

Внутренняя поверхность кладки печи, м^2 ,

$$F_{\text{кл}} = F_{\text{т.ст}} + F_{\text{б.ст}} + F_{\text{св}} + F_n = 2BH_{\text{ср}} + 2LH_0 + \frac{\pi R_{\text{св}} \alpha}{180 \sin \frac{\alpha}{2}} L + BL$$

где $F_{\text{т.ст}}, F_{\text{б.ст}}, F_{\text{св}}, F_n$ – площади всех внутренних поверхностей печи (торцовых стен, боковых стен, свода и пода).

Если свод печи плоский $\alpha = 180^\circ$, а $R_{св} = B$.

Поверхность нагрева металла прямоугольного и круглого сечения, м²:

$$F_M^{прям} = N(3Sl + 2S^2),$$

$$F_M^{круг} = N(\pi dl + 2\frac{\pi d^2}{4}),$$

где N – количество заготовок в печи, шт;

S, l, d – геометрические параметры заготовки, м.

Средняя эффективная длина луча, м, $S_{эф} = 0,9 \frac{4V_2}{F_{общ}}$,

где V_2 – объём полости, заполненной излучающим газом, м³;

$F_{общ}$ – площадь всех сторон, ограничивающих этот объём, м²;

0,9 – коэффициент эффективности газового излучения.

Объём рабочего пространства печи, м³, $V_{p.n} = BLH_{ср}$.

Объём занимаемый металлом, м³, $V_M^{прям} = NS^2l$,

или для цилиндрических заготовок - $V_M^{круг} = N\frac{\pi d^2}{4}l$.

Объём рабочего пространства, занимаемого газом, м³, $V_2 = V_{pn} - V_M$.

Общая поверхность теплообмена, м², $F_{общ} = F_{кл} + F_M$.

Коэффициенты излучения

Степень черноты газа определяется в зависимости от силы поглощения тепла дымовыми газами и их температуры.

Сила поглощения газов: $P_{CO_2} S_{эф}$ и $P_{H_2O} S_{эф}$,

где P_{CO_2} и P_{H_2O} – парциальные давления углекислого газа и водяных паров в продуктах горения, кПа: $P_{CO_2} = V_{CO_2} \cdot 0,981$, $P_{H_2O} = V_{H_2O} \cdot 0,981$,

где V_{H_2O} и V_{CO_2} – объёмная доля каждого газа продуктов сгорания, % (см. подразд. 1.3).

По данным $P_{CO_2} S_{эф}$ и $P_{H_2O} S_{эф}$, и температуре t_g^i находим степень черноты углекислого газа ε_{CO_2} (рис. 3.2). Степень черноты водяного пара ε_{H_2O} и поправочный множитель β определяем аналогично по рисунку 3.3.

Степень черноты газа при t_g^i $\varepsilon_g^i = \varepsilon_{CO_2}^i + \beta \varepsilon_{H_2O}^i$.

Температура газа t_g^i принимается: для печей с неподвижным подом - от 800 до 1300°C; для печей с выкатным подом - от 300 до 1300°C, с шагом 100°C. Полученные данные занести в таблицу 3.1.

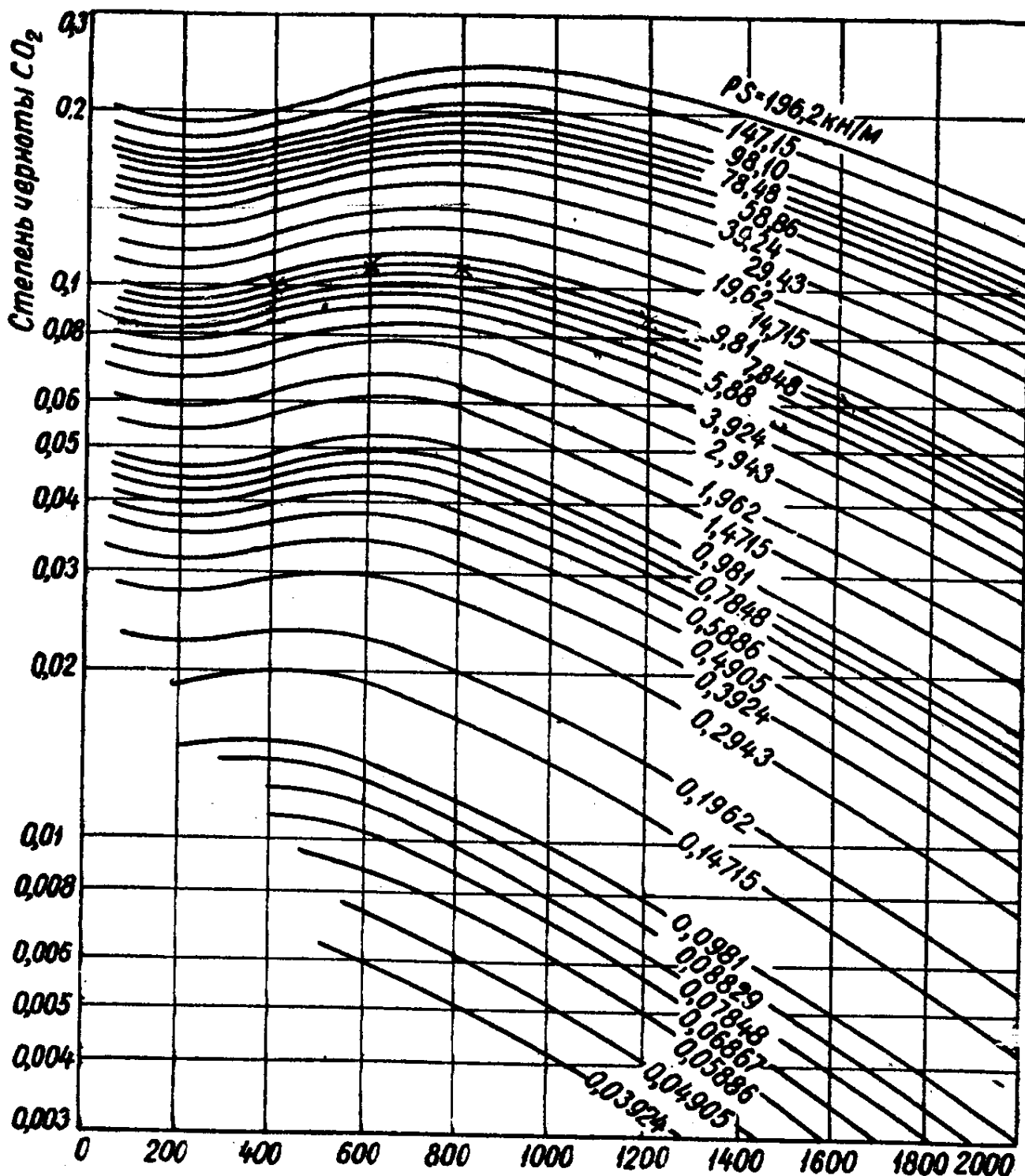


Рисунок 3.2 – Степень черноты углекислого газа при излучении

Для данных же температур определяется приведённый коэффициент излучения системы «газ-кладка-металл», $\frac{B_m}{m^2 \cdot K^4}$, $C_{г.к.м} = \frac{5,77 \varepsilon_m \varepsilon_g}{\varepsilon_g + \varphi_{к.м}(1 - \varepsilon_g)}$,

где ε_m – степень черноты металла, принимается 0,8;

$\varphi_{к.м.}$ – угловой коэффициент излучения кладки на металл, $\varphi_{к.м} = \frac{F_m}{F_{общ}}$.

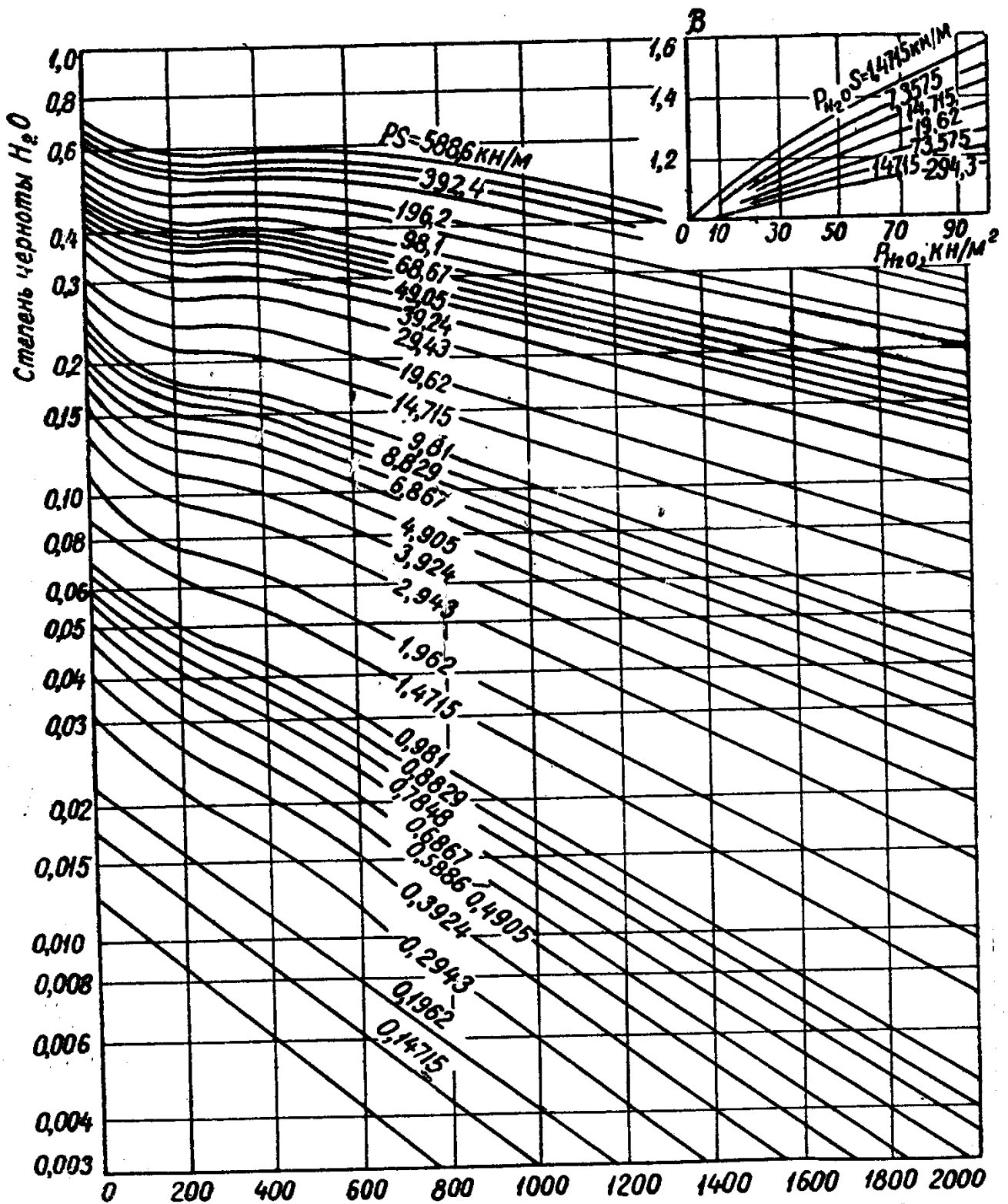


Рисунок 3.3 – Степень черноты водяного пара

Приведённый коэффициент излучения, $\frac{B_m}{m^2 \cdot K^4}$, $C_{n.m} = \frac{5,77 \epsilon_m \varphi_{m.k}}{1 - \varphi_{m.m} (1 - \epsilon_m)}$.

Угловые коэффициенты $\varphi_{m.k}$ и $\varphi_{m.m}$: $\varphi_{m.k} = \frac{F_{kl}}{F_{общ}}$; $\varphi_{m.m} = \frac{F_m}{F_{общ}}$.

Таблица 3.1 - Значения ε_2 и $C_{2.к.м}$

$t_2, ^\circ\text{C}$	ε_2	$C_{2.к.м}, \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	ε_2	$C_{2.к.м}, \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$
300			900		
400			1000		
500			1100		
600			1200		
700			1300		
800			1400		

3.2 Теплообмен в методических печах

Определение коэффициентов излучения от газов и кладки на металлы производится для верхней части рабочего пространства, для нижних зон коэффициент излучения принимается таким же.

Предварительный расчёт геометрических параметров печи позволил определить ширину и общую длину печи. Методические печи могут иметь две или три зоны. Длина отдельной зоны неизвестна, поэтому приведённый коэффициент излучения может быть определён таким способом.

Геометрические параметры излучения

Площадь пода печи $м^2$ в сварочной зоне - $F_n^{CB} = BL_{CB}$,

в методической зоне - $F_n^M = BL_M$,

в томильной зоне - $F_n^T = BL_T$,

где L_{CB} , L_M , L_T , – длины сварочной, методической и томильной зоны соответственно, м.

Внутренняя поверхность стен и свода по зонам печи, $м^2$:

$$F_{кл}^{CB} = 2H_0^{CB} L_{CB} + \frac{\pi R_{CB} \alpha}{180 \sin \frac{\alpha}{2}} L_{CB} = (2H_0^{CB} + \frac{\pi R_{CB} \alpha}{180 \sin \frac{\alpha}{2}}) L_{CB},$$

$$F_{кл}^M = 2H_0^M L_M + \frac{\pi R_{CB} \alpha}{180 \sin \frac{\alpha}{2}} L_M = (2H_0^M + \frac{\pi R_{CB} \alpha}{180 \sin \frac{\alpha}{2}}) L_M,$$

$$F_{кл}^T = 2H_0^T L_T + \frac{\pi R_{CB} \alpha}{180 \sin \frac{\alpha}{2}} L_T = (2H_0^T + \frac{\pi R_{CB} \alpha}{180 \sin \frac{\alpha}{2}}) L_T.$$

Суммарная поверхность кладки и металла, окружающих газовый объём, по зонам методической печи, $м^2$:

$$F_{общ}^{CB} = F_n^{CB} + F_{кл}^{CB} = (2H_0^{CB} + \frac{\pi R_{CB} \alpha}{180 \sin \frac{\alpha}{2}} + B) L_{CB};$$

$$F_{общ}^M = F_n^M + F_{кл}^M = (2H_0^M + \frac{\pi R_{CB} \cdot \alpha}{180 \sin \frac{\alpha}{2}} + B)L_M;$$

$$F_{общ}^T = F_n^T + F_{кл}^T = (2H_0^T + \frac{\pi R_{CB} \alpha}{180 \sin \frac{\alpha}{2}} + B)L_T.$$

При плоском своде $\alpha = 180^\circ$, $R_{CB} = B$.

Объём заполненного газом рабочего пространства по всем зонам печи, м³:

$$V^{CB} = H_{CB}^{cp} F_n^{CB} = H_{CB}^{cp} B L_{CB},$$

$$V^M = H_M^{cp} F_n^M = H_M^{cp} B L_M,$$

$$V^T = H_T^{cp} F_n^T = H_T^{cp} B L_T.$$

Средняя эффективная длина луча в сварочной, методической и томильной зонах, м,

$$S_{эф}^{CB} = 0,9 \frac{4V^{CB}}{F_{общ}^{CB}} = 0,9 \frac{4H_{CB}^{cp} B L_{CB}}{\left(2H_0^{CB} + \frac{\pi R_{CB} \alpha}{180 \sin \frac{\alpha}{2}} + B \right) L_{CB}} = \frac{3,6 H_{CB}^{cp} B}{2H_0^{CB} + \frac{\pi R_{CB} \alpha}{180 \sin \frac{\alpha}{2}} + B}.$$

Повторив аналогичные преобразования, получим:

$$S_{эф}^M = \frac{3,6 H_M^{cp} B}{2H_0^M + \frac{\pi R_{CB} \alpha}{180 \sin \frac{\alpha}{2}} + B}, \quad S_{эф}^T = \frac{3,6 H_T^{cp} B}{2H_0^T + \frac{\pi R_{CB} \alpha}{180 \sin \frac{\alpha}{2}} + B}.$$

Коэффициенты излучения

Произведения парциальных давлений излучающих газов на среднюю эффективную длину луча в каждой зоне:

$$P_{CO_2} S_{эф}^{CB}, P_{H_2O} S_{эф}^{CB}; P_{CO_2} S_{эф}^M, P_{H_2O} S_{эф}^M; P_{CO_2} S_{эф}^T, P_{H_2O} S_{эф}^T,$$

где P_{CO_2} и P_{H_2O} – парциальные давления углекислого газа и водяных паров.

$$P_{CO_2} = V_{CO_2} \cdot 0,981;$$

$$P_{H_2O} = V_{H_2O} \cdot 0,981,$$

где V_{CO_2} и V_{H_2O} – объёмная доля каждого компонента дымового газа, % (см. выше).

В зависимости от произведений парциальных давлений H_2O и CO_2 на эффективную длину луча и температуру t_2^i определяется степень черноты

углекислого газа $\varepsilon_{CO_2}^i$ (см. рис. 3.2) и водяного пара $\varepsilon_{H_2O}^i$ (см. рис. 3.3).

Суммарная степень черноты дымовых газов при t_2^i в основных зонах печи $\varepsilon_{\delta}^i = \varepsilon_{CO_2}^i + \beta^i \varepsilon_{H_2O}^i$,

где β^i – поправочный множитель (см. рис. 3.3).

Температура газов t_2 в сварочной зоне принимается на 50 градусов выше температуры нагрева металла T_H (для температурного напора), $t_{CB} = T_H + 50^\circ C$.

Температура газов по длине каждой зоны принимается постоянной. Температура в методической зоне определяется по заданной температуре уходящих газов t_{yx} . Средняя температура в методической зоне

$$t_{мет} = \frac{t_{CB} + t_{yx}}{2}.$$

Температуру в тоильной зоне можно принять равной температуре нагрева металла: $t_T = T_H$.

Для этих же температур определяется приведённый коэффициент излучения системы «газ-кладка-металл», $\frac{Bm}{m^2 \cdot K^4}$ (для каждой зоны печи),

$$C_{\delta.K.M}^i = \frac{5,77 \varepsilon_{\delta}^i \varepsilon_M [1 + \varphi_{K.M}^i (1 - \varepsilon_{\delta}^i)]}{\varepsilon_{\delta}^i + \varphi_{K.M}^i (1 - \varepsilon_{\delta}^i) [1 - (1 - \varepsilon_{\delta}^i)(1 - \varepsilon_M)]},$$

где ε_M – степень черноты металла, принимается, $\varepsilon_M = 0,8$;

$\varphi_{K.M}^i$ – угловой коэффициент излучения кладки на металл, определяется для каждой зоны печи:

$$\varphi_{K.M}^{CB} = \frac{F_n^{CB}}{F_{кл}^{CB}}; \quad \varphi_{K.M}^M = \frac{F_n^M}{F_{кл}^M}; \quad \varphi_{K.M}^T = \frac{F_n^T}{F_{кл}^T}.$$

Среднее значение приведённого коэффициента излучения, $\frac{Bm}{m^2 \cdot K^4}$,

$$C_{Г.K.M}^{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{Г.K.M}^i}{n},$$

где n – число зон методической печи.

3.3 Пример расчёта теплообмена в камерной печи

Исходные данные [2]:

- размер заготовок: $S = 0,07 \times 0,07$ м, $l = 0,4$ м;
- марка стали - 45Х;
- количество заготовок в печи $N = 20$ шт.;
- начальная температура $T_3 = 20^\circ\text{C}$;
- размеры печи: $B \times L \times H = 1,2 \times 1,8 \times 1,4$ м;
- состав продуктов горения: $V_{CO_2} = 8,14\%$; $V_{H_2O} = 16,22\%$.

Расчёт теплообмена

Определяем геометрические параметры излучения. Поверхность кладки

$$F_{кл} = F_{т.ст} + F_{б.ст} + F_{св} + F_n = 2BH_{cp} + 2LH_0 + \frac{\pi R_{св} \alpha}{180 \sin \frac{\alpha}{2}} L + BL =$$

$$2 \cdot 1,2 \cdot 1,3 + 2 \cdot 1,8 \cdot 1,2 + \frac{3,14 \cdot 1,8 \cdot 60}{180} \cdot 1,8 + 1,8 \cdot 1,2 = 14 \text{ м}^2.$$

Излучающая поверхность металла

$$F_M^{прям.} = N(3Sl + 2S^2) = 20 \cdot (3 \cdot 0,07 \cdot 0,4 + 2 \cdot 0,07^2) = 2 \text{ м}^2,$$

где N – количество заготовок в печи;

S – толщина нагреваемого металла, м;

l – длина нагреваемого металла, м.

Объём рабочего пространства печи $V_{p.n} = BLH_{cp} = 1,2 \cdot 1,8 \cdot 1,3 = 2,81 \text{ м}^3$.

Объём, занимаемый металлом $V_M^{прям} = NS^2l = 20 \cdot 0,07^2 \cdot 0,4 = 0,04 \text{ м}^3$.

Объём рабочего пространства, занимаемого газом,

$$V_2 = V_{pn} - V_M = 2,81 - 0,04 = 2,77 \text{ м}^3.$$

Эффективная толщина газового слоя

$$S_{эф} = \frac{3,5V_2}{F_{кл} - F_M} = \frac{3,5 \cdot 2,77}{14,0 + 2,0} = 0,6 \text{ м}.$$

Степень черноты газа:

$$P_{CO_2} S_{эф} = 0,0814 \cdot 0,6 \cdot 98,1 = 5,05 \text{ кПа} \cdot \text{м};$$

$$P_{H_2O} S_{эф} = 0,1622 \cdot 0,6 \cdot 98,1 = 9,7 \text{ кПа} \cdot \text{м},$$

где P_{CO_2} и P_{H_2O} – парциальные давления углекислого газа и водяных паров в продуктах горения, кПа.

$$\text{Согласно рис. 3.3 } \varepsilon_2^i = \varepsilon_{CO_2}^i + \beta \varepsilon_{H_2O}^i.$$

Значения ε_2^i для различных температур га за сведены в табл. 3.2.

Приведенный коэффициент излучения «газ-кладка-металл»,
 $\frac{Вт}{(м^2 \cdot K^4)}$,

$$C_{\varepsilon_{\text{к.м}}} = \frac{5,77\varepsilon_{\text{м}}\varepsilon_{\text{г}}}{\varepsilon_{\text{г}} + \varphi_{\text{к.м}}(1 - \varepsilon_{\text{г}})}.$$

Принимаем: $\varepsilon_{\text{м}} = 0,8$.

Величину $\varphi_{\text{к.м}}$ определяем по следующей формуле, справедливой для случая расположения металла на поду печи с зазорами,

$$\varphi_{\text{к.м}} = \frac{F_{\text{м}}}{F_{\text{кл}} + F_{\text{м}}} = \frac{2,0}{14,0 + 2,0} = 0,125.$$

Приведенный коэффициент излучения при $t_{\text{г}} = 1000^{\circ}\text{C}$, $\frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)}$,

$$C_{\varepsilon_{\text{к.м}}} = \frac{5,77\varepsilon_{\text{м}}\varepsilon_{\text{г}}}{\varepsilon_{\text{г}} + \varphi_{\text{к.м}}(1 - \varepsilon_{\text{г}})} = \frac{5,77 \cdot 0,8 \cdot 0,19}{0,19 + 0,125(1 - 0,19)} = 3,02.$$

Значения приведенного коэффициента для остальных температур газа приведены в табл. 3.2.

Приведенный коэффициент излучения системы «печь-металл», $\frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)}$,

$$C_{\text{п.м}} = \frac{5,77\varepsilon_{\text{м}}\varphi_{\text{м.к}}}{1 - \varphi_{\text{м.м}}(1 - \varepsilon_{\text{м}})}.$$

Угловые коэффициенты $\varphi_{\text{м.к}}$ и $\varphi_{\text{м.м}}$ определяются по формулам:

$$\varphi_{\text{м.к}} = \frac{F_{\text{кл}}}{F_{\text{кл}} + F_{\text{м}}} = \frac{14,0}{14,0 + 2,0} = 0,875;$$

$$\varphi_{\text{м.м}} = \frac{F_{\text{м}}}{F_{\text{м}} + F_{\text{кл}}} = \frac{2,0}{14,0 + 2,0} = 0,125.$$

Тогда

$$C_{\text{п.м}} = \frac{5,77\varepsilon_{\text{м}}\varphi_{\text{м.к}}}{1 - \varphi_{\text{м.м}}(1 - \varepsilon_{\text{м}})} = \frac{5,77 \cdot 0,8 \cdot 0,875}{1 - 0,125 \cdot (1 - 0,8)} = 4,23 \frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)}.$$

3.4 Пример расчёта теплообмена в методической двухзонной печи

Исходные данные [2]:

- размеры заготовок: $2S = 0,17 \text{ м}$, $l = 5 \text{ м}$;
- размеры печи: $B = 5,6 \text{ м}$; $H_{\text{CB}}^{\text{ср}} = 2 \text{ м}$; $H_{\text{М}}^{\text{ф}} = 1,5 \text{ м}$.
- температура нагрева $T_{\text{H}} = 1250^{\circ}\text{C}$;
- температура уходящих газов $t_{\text{yx}} = 1000^{\circ}\text{C}$;
- состав продуктов горения: $V_{\text{CO}_2} = 11,3\%$; $V_{\text{H}_2\text{O}} = 17,6\%$.

Расчёт теплообмена

Площадь печи:

в сварочной зоне - $F_n^{\text{CB}} = BL_{\text{CB}} = 5,6L_{\text{CB}}\text{м}^2$;

в методической зоне - $F_n^M = BL_M = 5,6L_M \text{ м}^2$,

где L_{CB} и L_M – соответственно длина сварочной и методической зон, м.

Внутренняя поверхность стен и свода:

в сварочной зоне - $F_{кл}^{CB} = (2H_0^{CB} + B)L_{CB} = 9,6L_{CB} \text{ м}^2$;

в методической зоне - $F_{кл}^M = (2H_0^M + B)L_M = 8,6L_M \text{ м}^2$.

Суммарная поверхность кладки и металла, окружающих газовый объём:

в сварочной зоне - $F_{общ}^{CB} = F_{кл}^{CB} + F_{CB} = 9,6L_{CB} + 5,6L_{CB} = 15,2L_{CB} \text{ м}^2$;

в методической зоне - $F_{общ}^M = F_{кл}^M + F_M = 9,6L_M + 5,6L_M = 15,2L_M \text{ м}^2$.

Объём заполненного газом рабочего пространства в сварочной зоне:

$$V^{CB} = H_{CB}^{cp} F_n^{CB} = 2 \cdot 5,6 \cdot L_{CB} = 11,2L_{CB} \text{ м}^3;$$

в методической зоне: $V^M = H_M^{cp} F_n^M = 1,5 \cdot 5,6 \cdot L_M = 8,4L_{CB} \text{ м}^3$.

Средняя эффективная длина луча:

в сварочной зоне - $S_{эф}^{CB} = 0,9 \frac{4V^{CB}}{F_{общ}^{CB}} = 0,9 \frac{4 \cdot 11,2}{15,2} = 2,65 \text{ м}$;

в методической зоне - $S_{эф}^M = 0,9 \frac{4V^M}{F_{общ}^M} = 0,9 \cdot \frac{4 \cdot 8,4}{14,2} = 2,14 \text{ м}$.

Произведение парциальных давлений излучающих газов на среднюю эффективную длину луча в сварочной зоне:

$$P_{CO_2} S_{эф}^{CB} = 0,113 \cdot 2,65 \cdot 98,1 = 29,4 \text{ кПа} \cdot \text{м};$$

$$P_{H_2O} S_{эф}^{CB} = 0,176 \cdot 2,65 \cdot 98,1 = 45,7 \text{ кПа} \cdot \text{м};$$

в методической зоне: $P_{CO_2} S_{эф}^M = 0,113 \cdot 2,14 \cdot 98,1 = 23,7 \text{ кПа} \cdot \text{м}$;

$$P_{H_2O} S_{эф}^M = 0,176 \cdot 2,14 \cdot 98,1 = 36,9 \text{ кПа} \cdot \text{м}.$$

Степень черноты газов в сварочной и методической зонах определяется по графикам на рис. 3.2, 3.3.

Температуру газов в сварочной зоне принимаем на 50°C выше температуры поверхности металла в конце нагрева, т.е.

$$t_{CB} = T_H + 50^\circ\text{C} = 1250 + 50 = 1300^\circ\text{C}.$$

Температуру газов по длине зоны принимаем постоянной.

Температура уходящих газов $t_{yx} = 1000^\circ\text{C}$. Тогда средняя температура газов в методической зоне

$$t_M = \frac{t_{CB} + t_{yx}}{2} = \frac{1300 + 1000}{2} = 1150^\circ C.$$

По рис. 3.2, 3.3 степень черноты H_2O и CO_2 в сварочной зоне: $\varepsilon_{CO_2} = 0,12$; $\varepsilon_{H_2O} = 0,18$. Степень черноты газов в этой зоне,

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O} = 0,12 + 0,18 = 0,3;$$

в методической зоне: $\varepsilon_{CO_2} = 0,13$; $\varepsilon_{H_2O} = 0,18$;
 $\varepsilon_2 = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O} = 0,13 + 0,18 = 0,31$.

Угловой коэффициент кладки на металл: в сварочной зоне -

$$\varphi_{к.м}^{CB} = \frac{F_n^{CB}}{F_{кл}^{CB}} = \frac{5,6L_{CB}}{9,6L_{CB}} = 0,602;$$

в методической зоне - $\varphi_{к.м}^M = \frac{F_n^M}{F_{кл}^M} = \frac{5,6L_M}{8,6L_M} = 0,67$.

Общая степень черноты системы

$$\varepsilon_{2.к.м} = \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_M [1 + \varphi_{к.м} (1 - \varepsilon_2)]}{\varepsilon_2 + \varphi_{к.м} (1 - \varepsilon_2) [1 - (1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_M)]}.$$

Принимаем степень черноты металла: $\varepsilon_M = 0,8$.

В сварочной зоне

$$\varepsilon_{2.к.м} = \frac{0,3 \cdot 0,8 \cdot [1 + 0,602 \cdot (1 - 0,3)]}{0,3 + 0,602 \cdot (1 - 0,3) \cdot [1 - (1 - 0,3) \cdot (1 - 0,8)]} = 0,515;$$

в методической зоне

$$\varepsilon_{2.к.м} = \frac{0,31 \cdot 0,8 \cdot [1 + 0,67 \cdot (1 - 0,31)]}{0,31 + 0,67 \cdot (1 - 0,31) \cdot [1 - (1 - 0,31) \cdot (1 - 0,8)]} = 0,5.$$

Приведенный коэффициент излучения от газа и кладки на металл

$$\sigma = 5,76 \varepsilon_{2.к.м} \frac{Bm}{(m^2 \cdot K^4)};$$

в сварочной зоне $\sigma_{CB} = 5,76 \cdot 0,515 = 2,97 \frac{Bm}{(m^2 \cdot K^4)};$

в методической зоне $\sigma_M = 5,76 \cdot 0,5 = 2,88 \frac{Bm}{(m^2 \cdot K^4)}.$

Для дальнейших расчётов принимаем среднее значение приведённого коэффициента излучения, $\sigma = 2,9 \frac{Bm}{(m^2 \cdot K^4)}.$

4 Расчёт нагрева металла

Основное предназначение нагрева перед обработкой давлением - изменение механических свойств материала (повышение пластичности и снижение прочности). Главные характеристики процесса нагрева: температура нагрева, скорость нагрева, продолжительность и равномерность нагрева.

4.1 Расчёт нагрева металла в камерных печах

Нагрев крупных заготовок производится в печах с изменяющейся температурой по многоступенчатому режиму (см. рис. 3.1,а) [2]. Согласно этому режиму нагрев металла состоит из следующих интервалов:

1 Нагрев от начальной температуры заготовки T_3 до температуры выдержки T_6 , скорость нагрева постоянная: $\vartheta_{H_2} = const$.

2 Выдержка при постоянной температуре поверхности $T_6 = const$.

3 Нагрев от T_6 до необходимой температуры нагрева T_H , скорость нагрева $\vartheta_{H_2} = const$.

4 Выдержка при $T_H = const$ для выравнивания температур по сечению заготовки.

5 Охлаждение в процессе обработки давлением или при термической обработке (охлаждение на воздухе, в печи, в закалочных средах).

Для термически тонких заготовок (углеродистые стали с сечением до 100 мм и легированные - до 60 мм) выдержку для выравнивания температур по пункту 2 не производят с целью интенсификации процесса нагрева. Все остальные расчёты аналогичны расчёту режимов нагрева термически толстых заготовок. Для заданной марки материала определяют его теплофизические коэффициенты: теплопроводность, теплосодержание, модуль упругости Юнга, коэффициент линейного расширения, плотность по таблицам 4.1 – 4.6.

Для соответствующей стали построить графики зависимости теплофизических свойств от температуры ($\lambda = f(T)$, $i = f(T)$, $\rho = f(T)$, $\sigma_B = f(T)$, $E = f(T)$, $\beta = f(T)$).

Первый интервал (от T_3 до T_6)

Для исключения возможности возникновения в заготовке трещин от термических напряжений при нагреве необходимо определить допустимый перепад температур $^{\circ}\text{C}$, который зависит также от формы поперечного сечения заготовки:

$$\text{для прямоугольного сечения - } \Delta t_{\partial} = \frac{1,25\sigma_B(T)}{\beta(T)E(T)};$$

$$\text{для цилиндрической заготовки - } \Delta t_{\partial} = \frac{1,4\sigma_B(T)}{\beta(T)E(T)},$$

Таблица 4.1 - Теплопроводность сталей при различных температурах, $\frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$

№	Марка стали	Температура, °C										
		20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
1	15X	39,0	37,0	36,1	34,9	33,8	33,0	32,5	31,5	30,8	29,8	29,4
2	15XA	39,2	37,3	36,3	35,1	34,1	33,2	32,6	31,6	30,9	30,0	29,5
3	20X	39,3	37,4	36,3	35,0	34,0	33,1	32,4	31,4	30,7	30,2	29,7
4	15XM	44,3	44,2	41,3	40,7	38,9	36,1	33,7	32,4	29,1	28,5	28,8
5	15X	45,2	45,0	44,3	43,5	40,7	37,7	33,7	29,8	29,7	29,5	29,8
6	15X	45,6	45,3	43,6	42,4	40,7	37,2	36,1	32,6	31,4	30,2	30,6
7	12XM3	37,8	37,5	36,3	35,1	34,1	33,2	32,6	31,6	30,9	30,1	29,6
8	12MX	45,0	44,5	43,1	40,9	38,7	36,9	34,7	33,6	32,5	31,8	32,3
9	12XMФ	44,8	44,2	41,3	40,7	38,9	36,2	33,7	31,5	29,1	28,5	28,8
10	30X	47,7	46,5	44,4	42,3	38,5	35,6	31,9	38,8	26,1	26,7	28,0
11	30Г2	46,3	34,9	44,8	43,7	40,2	37,2	34,4	31,4	29,8	25,6	27,2
12	30ХГС	37,6	37,2	40,7	38,4	37,2	36,1	34,9	33,7	32,6	32,8	33,0
13	3572	39,1	38,6	38,2	37,8	37,4	37,1	36,6	35,9	35,6	35,2	35,4
14	30XM	43,6	38,6	38,1	37,9	37,8	37,4	37,0	36,2	35,0	35,3	35,5
15	35XM	44,9	41,8	41,0	40,3	39,3	35,4	32,2	32,0	30,0	26,0	27,1
16	30XM3A	42,1	41,6	40,0	36,9	35,0	34,1	37,2	32,3	32,5	32,7	33,0
17	40XC	47,4	44,1	39,9	36,0	34,4	34,2	34,1	33,9	33,7	34,0	34,2
18	40X3M	37,0	37,2	37,7	36,8	34,7	33,0	30,9	29,3	29,1	29,3	29,5
19	40Г	65,2	57,3	51,4	48,2	48,2	45,8	44,7	44,2	44,5	44,7	45,1
20	50Г2	42,5	39,2	37,0	36,2	35,4	34,5	44,7	33,5	33,4	33,8	34,1
21	50C2Г	26,7	28,5	30,2	31,1	31,1	31,1	30,2	28,0	25,1	25,6	26,4

Таблица 4.2 - Теплосодержание сталей при различных температурах, $\frac{кДж}{кг}$

№	Марка стали	Температура, °C											
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
1	15X	46,4	95,2	147,8	204,8	265,1	338,8	418,7	531,2	629,3	704,2	780,8	850,4
2	15XA	46,5	95,4	148,2	205,1	265,3	339,0	418,9	531,4	629,1	704,1	780,6	850,3
3	20X	46,2	95,5	148,4	205,3	265,6	339,3	419,0	531,7	629,8	702,0	780,5	845,4
4	15XM	42,6	95,1	147,4	204,6	265,0	339,1	419,1	531,9	629,4	704,5	780,7	850,6
5	15XΦ	46,1	95,0	147,1	204,2	264,8	338,9	418,8	531,3	629,5	704,6	781,2	851,2
6	15M	46,3	95,3	147,2	204,4	264,9	339,0	419,2	532,0	629,6	704,7	782,3	852,1
7	12XM2	46,4	95,4	147,7	204,7	265,1	339,4	419,4	533,2	628,9	703,1	781,4	849,2
8	12MX	46,3	95,3	147,4	204,5	265,0	339,3	419,5	534,1	628,3	703,2	780,1	848,6
9	12XMΦ	46,5	95,4	147,5	204,6	265,2	339,5	419,6	534,4	628,0	703,4	780,2	848,8
10	30X	46,8	95,6	148,3	205,5	265,7	339,7	419,6	535,2	630,3	698,8	780,3	850,0
11	30Г2	46,9	95,7	149,1	206,4	266,3	340,2	419,9	536,3	630,5	699,0	773,4	846,2
12	30XГC	46,7	95,5	148,7	206,2	266,1	340,3	420,1	536,8	630,7	698,5	772,5	847,3
13	3572	47,1	95,8	149,3	206,6	266,7	340,4	420,2	536,9	631,2	699,2	770,1	842,1
14	30XM	46,6	95,3	148,1	205,9	266,2	340,1	420,3	537,3	630,2	698,1	770,4	848,2
15	35XM	46,8	95,4	147,9	205,2	265,9	339,8	420,0	537,2	631,3	698,9	771,0	841,0
16	30XM3A	46,9	95,5	148,4	205,8	266,4	340,5	419,9	536,0	632,8	699,3	772,6	847,9
17	40XC	47,1	95,52	148,9	206,3	267,0	341,1	420,4	538,4	628,3	698,4	769,2	840,2
18	40X3M	47,0	95,48	148,5	206,0	266,7	340,8	420,5	538,2	628,5	699,2	768,1	839,3
19	40Г	46,9	95,42	148,0	205,7	266,4	340,5	420,2	537,9	629,0	700,3	767,5	835,6
20	50Г2	47,2	95,8	149,2	205,9	267,1	341,2	419,8	540,2	624,1	701,4	760,3	832,1
21	50C2Г	47,3	95,86	149,3	206,6	267,5	341,4	420,1	542,3	620,0	702,0	762,0	830,4

Таблица 4.3 - Плотность сталей при различных температурах, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

№	Марка стали	Температура, °C												
		0	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
1	15X	7840	7845	7800	7750	7720	7710	7960	7665	7640	7625	7615	7605	7690
2	15XA	7835	7830	7810	7790	7770	7740	7720	7700	7682	7654	7640	7625	7615
3	20X	7845	7840	7830	7805	7780	7755	7730	7720	7705	7690	7665	7550	7535
4	15XM	7850	7850	7790	7758	7725	7690	7656	7622	7615	7605	7594	7590	7585
5	15XФ	7763	7858	7790	7759	7726	7693	7654	7618	7580	7570	7561	7553	7549
6	15M	7850	7850	7789	7758	7725	7690	7654	7615	7607	7601	7591	7585	7770
7	12XM2	7819	7814	7788	7756	7722	7686	7650	7613	7577	7565	7555	7550	7540
8	12MX	7810	7805	7795	7785	7750	7710	7695	7680	7670	7660	7650	7640	7620
9	12XMФ	7800	7800	7790	7790	7770	7755	7745	7735	7720	7710	7700	7690	7680
10	30X	7847	7842	7818	7787	7753	7718	7681	7643	7603	7619	7579	7525	7510
11	30Г2	7854	7849	7826	7794	7760	7723	7685	7646	7705	7626	7590	7532	7515
12	30XГC	7842	7830	7815	7803	7775	7750	7730	7704	7686	7670	7652	7630	7621
13	35Г2	7850	7846	7828	7796	7762	7732	7703	7680	7654	7628	7600	7586	7572
14	30XM	7830	7805	7774	7752	7730	7704	7688	7662	7646	7514	7604	7590	7582
15	35XM	7825	7810	7790	7765	7735	7705	7692	7660	7635	7615	7590	7575	7665
16	30XM3A	7851	7845	7824	7793	7760	7727	7693	7657	7625	7650	7596	7522	7515
17	40XC	7855	7850	7830	7810	7794	7773	7758	7741	7711	7689	7656	7645	7634
18	40X3M	7850	7847	7830	7802	7784	7762	7748	7726	7704	7690	7679	7662	7651
19	40Г	7842	7836	7812	7790	7772	7757	7743	7730	7715	7702	7690	7676	7668
20	50Г2	7785	7780	7752	7726	7702	7691	7670	7652	7626	7601	7590	7572	7561
21	50C2Г	7729	7725	7703	7672	7639	7605	7570	7533	7495	7477	7442	7392	7380

Таблица 4.4 – Предел прочности сталей при различных температурах, МПа

№	Марка стали	Температура, °C								
		700	800	850	900	950	1000	1100	1150	1200
1	15X	56	58	-	45	-	28	24	-	14
2	15XA	56	58	-	45	-	28	24	-	14
3	20X	120	64	-	52	-	34	21	-	14
4	15XM	-	82	-	-	-	42	-	-	14
5	15XФ	131	70	-	48	-	41	24	-	14
6	15M	130	91	-	77	-	48	31	-	20
7	12XM2	-	-	74	52	45	36	23	14	-
8	12MX	-	-	74	52	45	36	23	14	-
9	12XMФ	-	-	74	52	45	36	23	14	-
10	30X	104	70	-	56	-	31	21	-	15
11	30Г2	-	99	-	56	-	36	27	-	17
12	30XГC	178	87	-	54	-	38	21	-	10
13	35Г2	-	-	74	52	45	36	23	14	-
14	30XM	-	82	-	-	-	42	-	-	14
15	35XM	-	84	-	-	-	41	-	-	17
16	30XM3A	-	89	-	-	-	39	-	-	20
17	40XC	145	55	-	42	-	24	11	-	11
18	40X3M	187	91	-	51	-	36	24	-	14
19	40Г	-	-	74	52	45	36	23	14	-
20	50Г2	96	79	-	56	-	39	28	-	23
21	50C2Г	-	85	-	56	-	36	20	-	12

Таблица 4.5 - Модуль упругости при различных температурах, $\times 10^4$ МПа

№	Марка стали	Температура, °C				
		20	200	300	400	450
1	0,8 КП	20,7	18,6	15,6	14,4	14,0
2	08	20,8	18,7	15,8	14,5	14,1
3	20	20,2	17,9	17,0	16,1	16,5
4	25	20,2	19,5	18,9	16,7	15,9
5	40	21,0	19,6	19,1	16,8	16,0
6	У8	20,8	19,6	18,8	16,5	15,6
7	У12	20,9	19,7	18,9	16,6	15,7
8	45	19,4	18,3	15,9	14,5	14,1
9	15Х	20,2	18,7	17,0	16,3	15,7
10	15ХА	30,4	18,9	17,3	16,4	15,9
11	15ХМ	20,3	18,8	17,1	16,2	15,6
12	15ХФ	20,1	18,6	16,8	15,9	14,8
13	15М	20,4	18,9	17,2	16,3	15,7
14	20Х	20,5	18,7	17,4	16,4	15,6
15	20Г	20,8	17,4	17,9	16,4	15,6
16	12ХН2	20,0	18,5	17,1	16,0	15,4
17	12МХ	20,1	18,6	17,2	16,2	15,5
18	12ХМФ	20,2	18,7	17,3	16,3	15,6
19	30Х	19,7	17,8	17,0	16,6	15,4
20	30Г2	19,9	17,6	17,1	16,7	15,6
21	30 ХГС	19,8	17,7	17,2	16,9	15,9
22	30ХМ	21,3	20,8	20,1	19,2	15,8
23	30ХН3А	21,1	20,7	19,6	18,3	15,1
24	35Г2	21,2	20,6	19,5	18,0	15,3
25	35ХМ	21,3	20,8	20,1	19,2	15,7
26	40ХС	20,7	20,0	19,2	18,3	15,2
27	40Х3М	20,5	19,6	18,7	16,8	14,9
28	40Г	21,4	19,8	18,9	17,0	15,8
29	50Г2	21,7	19,7	19,1	17,1	15,9
30	50С2Г	21,8	19,6	19,0	17,2	16,0

Таблица 4.6 - Коэффициент линейного расширения, $\times 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$

№	Марка стали	Температура, °C								
		50	100	200	300	400	500	600	700	800
1	15Х	11,6	11,7	12,2	12,9	13,4	13,7	13,9	14,2	11,9
2	15ХА	11,5	11,6	12,3	12,8	13,5	13,8	14,0	14,3	12,0
3	20Х	11,5	11,8	12,5	13,0	13,6	14,0	14,3	14,4	12,0
4	15ХМ	11,8	11,9	12,4	13,1	13,7	14,2	14,5	14,6	12,2
5	15ХФ	11,7	11,9	12,6	13,2	13,7	14,0	14,3	14,5	12,1
6	15М	11,8	12,0	12,6	13,2	13,7	14,2	14,7	14,8	12,3
7	12ХМ2	12,0	12,2	12,9	13,2	13,6	14,2	14,3	14,5	12,6
8	12МХ	12,3	12,7	13,2	13,6	14,2	14,5	14,9	15,1	12,5
9	12ХМФ	13,1	13,6	13,7	14,0	14,2	14,5	14,7	14,8	12,3
10	30Х	11,8	12,2	12,8	13,3	13,7	13,1	14,5	14,8	12,1
11	30Г2	11,5	11,9	12,7	13,4	13,9	14,3	14,7	15,1	12,1
12	30ХГС	11,9	12,1	12,6	13,2	13,5	13,9	14,2	14,5	11,9
13	35Г2	12,0	12,2	12,4	13,2	13,9	14,2	14,4	14,4	12,2
14	30ХМ	12,0	12,3	12,6	13,0	14,5	14,5	14,6	14,7	12,4
15	35ХМ	12,1	12,3	12,5	13,5	14,2	14,4	14,7	14,5	12,1
16	30ХМ3А	10,9	11,4	12,3	12,8	13,2	13,4	13,7	13,7	10,7
17	40ХС	10,9	11,5	12,1	12,6	13,1	13,6	13,9	14,1	10,9
18	40Х3М	10,7	11,3	12,0	12,5	13,0	13,5	13,7	14,2	10,8
19	40Г	11,1	11,7	12,2	12,7	13,3	13,8	14,1	14,3	11,0
20	50Г2	10,8	11,4	12,3	13,0	13,6	13,9	14,2	14,3	12,8
21	50С2Г	10,6	11,2	12,2	12,9	13,4	13,7	14,1	14,4	13,6

где $\sigma_B(T)$ – предел прочности материала при соответствующей температуре, МПа (см. табл. 4.4);

$\beta(T)$ – коэффициент линейного расширения материала при соответствующей температуре, $1/^\circ\text{C}$ (см. табл. 4.6);

$E(T)$ – модуль упругости Юнга при определённой температуре, МПа (см. табл. 4.5).

С учётом перепада температур средняя температура в конце первого интервала, $^\circ\text{C}$, $t_{cp1} = T_B - \frac{1}{2}\Delta t\vartheta$.

Среднее значение коэффициента теплопроводности материала, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$,

$$\lambda_{cp1} = \frac{\lambda_{T_3}^n + \lambda_{T_3}^y + \lambda_{T_B}^n + \lambda_{T_B}^y}{4},$$

где $\lambda_{T_3}^n, \lambda_{T_3}^y, \lambda_{T_B}^n, \lambda_{T_B}^y$ – коэффициенты теплопроводности материала при соответствующих температурах на поверхности и в центре, определяются по графику $\lambda = f(T)$.

Температура центра заготовки, $^\circ\text{C}$, $t_y = T_B - \Delta t\vartheta$.

Теплоёмкость на первом интервале, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$, $C_{p1} = \frac{i_{t_{cp1}} - i_{T_3}}{t_{cp1} - T_3}$,

где $i_{t_{cp1}}, i_{T_3}$ – теплосодержание материала при средней температуре на первом интервале и начальной температуре заготовки, определяют по графику $i = f(T), \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

Коэффициент температуропроводности, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$, $a = \frac{\lambda_{t_{cp1}}}{C_{p1}\rho_{t_{cp1}}}$,

где $\rho_{t_{cp1}}$ – плотность материала при средней температуре в конце первого интервала $t_{cp1} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, определяется по графику $\rho = f(T)$.

Уточняем температуру центра заготовки, $^\circ\text{C}$, $t_y^{ym} = T_B - \frac{g_{H1}R^2}{4a3600}$,

где R – радиус заготовки, или толщина S прямоугольной заготовки, м;

g_{H1} – скорость нагрева заготовки, $^\circ\text{C}/\text{ч}$.

Перепад температур в конце первого интервала уточненный $\Delta t_{\partial 1}^{ym} = T_B - t_y^{ym}$.

Пересчитываем среднюю температуру, °C, $t_{cp1}^{ym} = T_B - \frac{1}{2} \Delta t \vartheta_1^{ym}$.

Если t_{cp1}^{ym} и t_{cp1} отличаются не более чем на 50°C, то повторного уточнения не производим.

$$\text{Тепловой поток, } \frac{Bm}{m^2}, \quad q_1 = \frac{0,59 H_1 R C_{p1} \rho t_{cp1}}{3600}.$$

$$\text{Уточнённое время нагрева на первом интервале, ч, } \tau_1 = \frac{R \rho_{cp1} \Delta i_1}{2 q_1},$$

$$\Delta i_1 = i_{t_{cp1}}^{ym} - i_{T_3}, \quad \frac{Дж}{кг}.$$

Если заданное время нагрева τ_{H1} (см. рис. 3.1) сильно отличается от расчётного τ_1 , то принимаем уточнённое τ_1 .

Тепловой поток, передаваемый от печи к нагреваемому металлу, складывается из тепловых потоков излучения и конвекций, $\frac{Bm}{m^2}$:

$$q = q_{изл} + q_{конв} = C_{Г.К.М} \left[\left(\frac{T_{Г}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 \right] + \alpha_K (t_{Г} - t_3), \quad (4.1)$$

где $T_{Г}$ и T_3 – температура газа и заготовки соответственно, К;

$t_{Г}$ и t_3 – температура газа и заготовки в °C;

α_K – коэффициент теплопередачи конвекцией при малоподвижном газе,

$$\alpha_K = 6 \frac{Bm}{m^2 \cdot ^\circ C}.$$

Температуру газа из данного равенства можно получить методом подбора.

Температура печи в начале нагрева при условии, что тепло от печи к металлу передаётся только излучением, °C,

$$t_{печи} = 100 \sqrt[4]{\frac{q_1}{C_{н.м}} + \left(\frac{T_3 + 273}{100} \right)^4} - 273 K,$$

где $C_{н.м}$ – приведённый коэффициент излучения, $\frac{Bm}{m^2 \cdot K^4}$ (см. раздел 3).

Действительное значение $t_{печи}$ ниже, так как тепло передаётся не только излучением, но и конвекцией. Далее производится уточнение температуры печи.

Определяем температуру газа в начале нагрева $t_{Г0}$. Принимаем температуру газа равной температуре печи: $t_{Г0} \approx t_{печи}$. Определяем значения

теплового потока по формуле (4.1). Приведённый коэффициент теплообмена $C_{Г.К.М}$ определяется при температуре $t_{Г0}$:

$$q_0^i = C_{Г.К.М} \left[\left(\frac{t_{Г0} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3 + 273}{100} \right)^4 \right] + \alpha_k (t_{Г0} - T_3).$$

Все температуры подставляются в градусах по Цельсию. Если $q_0' > q_1$, то принятая температура газа $t_{Г0}$ больше фактической. Уменьшаем температуру на 30°C ($t_{Гi} = t_{Г0} - 30^\circ\text{C}$), пересчитываем тепловой поток q_0^i . Расчёт повторяем до тех пор, пока q_0^i не будет примерно равно q_1 . Температура газов будет равна $t_{Гi}$.

Общий приведённый коэффициент теплообмена с учётом теплоотдачи конвекцией, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$,

$$C_{Г.К.М}^{общ} = \frac{q_1}{\left[\left(\frac{T_{Гi}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 \right]},$$

где $T_{Гi}$ и T_3 – температура газа окончательная (уточнённая) и температура заготовки, К (градусы Кельвина).

Приведённый коэффициент конвективного теплообмена, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$,

$$C_{Г.К.М}^{конв} = C_{Г.К.М}^{общ} - C_{Г.К.М},$$

где $C_{Г.К.М}$ – приведённый коэффициент излучения (см. раздел 3) при температуре $t_{Гi}$.

Для конвекционной теплоотдачи от теплоотдачи излучением

$$K^{конв} = \frac{C_{Г.К.М}^{конв}}{C_{Г.К.М}}.$$

Уточнение температуры печи в начале нагрева, $^\circ\text{C}$,

$$t_{печи}^{ym} = 100 \cdot 4 \sqrt[4]{\frac{q_1}{(1 + K^{конв})C_{п.м}} + \left(\frac{T_3 + 273}{100} \right)^4} - 273.$$

Температура кладки печи, $^\circ\text{C}$, $t_{кл0} = 2t_{печи} - t_{Гi}$.

Температура печи при условии, что тепло от печи к металлу передаётся только излучением в конце первого интервала нагрева, $^\circ\text{C}$,

$$t_{печи}^{K1} = 100 \cdot 4 \sqrt[4]{\frac{q_1}{(1 + K^{конв})C_{п.м}} + \left(\frac{T_B + 273}{100} \right)^4} - 273.$$

Температура газа в конце первого интервала, $^\circ\text{C}$,

$$t_{Г1} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{q_1}{C_{Г.К.М}} + \left(\frac{T_B + 273}{100}\right)^4} - 273,$$

где $C_{Г.К.М}$ – приведённый коэффициент излучения при температуре T_B (см. таблицу 3.1).

Уточнённая температура кладки к концу первого интервала, °С,

$$t_{кл1} = 2t_{неч1} - t_{Г1}.$$

Коэффициент теплопроводности в начале нагрева, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$, $a_0 = \frac{\lambda_{T_3}}{C_{T_3} \rho_{T_3}}$,

где λ , C , ρ определяются для начальной температуры заготовки T_3 по графикам зависимости $\lambda = f(T)$, $C = f(T)$, $\rho = f(T)$.

Второй интервал (выдержка при температуре T_B)

Определение времени, необходимого для выравнивания температур.

Степень выравнивания температур $\delta = \frac{\Delta t_3}{\Delta t_{\partial 1}^{ym}}$,

где Δt_3 – заданный перепад температур по сечению заготовки (см. исходные данные), °С;

$\Delta t_{\partial 1}^{ym}$ – уточнённый перепад температур в конце первого интервала (см. выше). По рис. 4.1. определяем коэффициент выравнивания температур.

Время выравнивания температур, ч, $\tau_{выр} = \frac{mR^2}{a_2 \cdot 3600}$,

где a_2 – коэффициент температуропроводности, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$, $a_2 = \frac{\lambda_{t_{cp2}}}{C_p \rho_{t_{cp2}}}$,

где $\rho_{t_{cp2}}$ – средняя плотность при температуре выдержки, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

$\lambda_{t_{cp2}}$ – среднее значение коэффициента теплопроводности при выдержке

для поверхности и центра, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°С}}$;

C_p – теплоёмкость в интервале температур T_B и $T_B - \Delta t_{\partial 1}^{ym}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}}$.

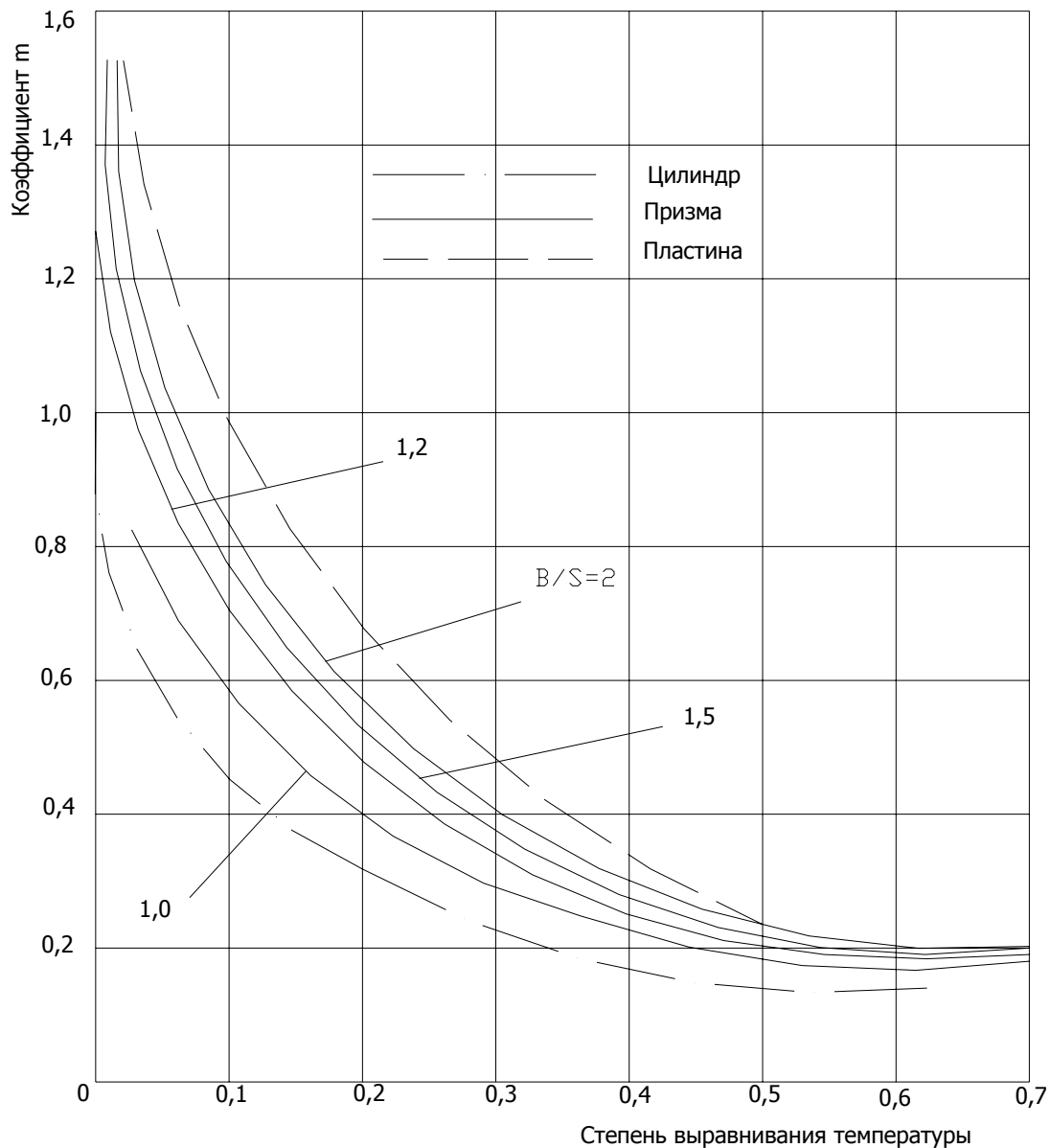


Рисунок 4.1 – График для определения продолжительности выдержки

$$\lambda_{cp1} = \frac{\lambda_{t_{n0}} + \lambda_{t_{y0}} + \lambda_{T_B} + \lambda_{t_{y1}}}{4},$$

где $t_{n0} = T_B$; $t_{y0} = T_B - \Delta t_{з}$; $t_{y1} = T_B - \Delta t_{з1}$, °C (коэффициент теплопроводности определяется в зависимости от этих температур).

$$C_p = \frac{i_{T_B} - i_{t_{y0}}}{T_B - t_{y0}}, \quad \rho_{cp2} = \frac{\rho_{T_B} - \rho_{t_{y0}}}{2},$$

где i_{T_B} , $i_{t_{y0}}$ и ρ_{T_B} , $\rho_{t_{y0}}$ – теплосодержание и плотность при соответствующих температурах.

При термической обработке (обжиге, нормализации и пр.) выдержку делают не только для выравнивания температур, но и завершения структурных

превращений [2]. В этом случае время выравнивания увеличивается вдвое, $\tau_{выд} = 2\tau_{выр}$. (считается в случае, если задан график термической обработки).

Тепловой поток в конце выравнивания температуры, $\frac{Bm}{m^2}$,

$$q_2 = \frac{2\lambda_{cp2}\Delta t_{\partial 1}^{ym}}{R}.$$

Третий интервал – нагрев после выдержки от температуры T_B до температуры нагрева T_H под ОМД. Скорость нагрева g_{H2} .

Тепловой поток на третьем интервале, $\frac{Bm}{m^2}$: $q_3 = \frac{0,5g_{H2}RC_{p3}\rho_{t_{cp3}}}{3600}$;

$$C_{p3} = \frac{iT_H - iT_B}{T_H - T_B}; \quad \rho_{cp2} = \frac{\rho T_H + \rho T_B}{2}.$$

Коэффициент теплопроводности, $\frac{Bm}{m^2 \cdot ^\circ C}$,

$$\lambda_{cp3} = \frac{\lambda_{t_{n0}} + \lambda_{t_{y0}} + \lambda_{t_{n1}} + \lambda_{t_{y1}}}{4},$$

где $t_{n0} = T_B$; $t_{y0} = T_B - \Delta t_3$; $t_{y1} = T_H - \Delta t_3$; $t_{n1} = T_H$, $^\circ C$.

Коэффициент температуропроводности, $\frac{m^2}{c}$, $a = \frac{\lambda_{t_{cp3}}}{C_{p3} \cdot \rho_{t_{cp3}}}$.

Действительная разность температур между поверхностью и центром, $^\circ C$,

$$\Delta t_{\partial 3} = \frac{g_{H2}R^2}{4a_3}.$$

Средняя температура, $^\circ C$, $t_{cp3} = T_H - \frac{1}{2}\Delta t_{\partial 3}$.

Температура центра заготовки к концу третьего нагрева, $^\circ C$,

$$t_{y3} = T_H - \Delta t_{\partial 3}.$$

Пересчитываем теплофизические константы с учётом уточнённой

температуры: $C_{p3}^{ym} = \frac{i t_{cp3} - iT_B}{t_{cp3} - T_B}$; $\lambda_{cp3}^{ym} = \frac{\lambda_{t_{n0}} + \lambda_{t_{y0}} + \lambda_{t_{n1}} + \lambda_{t_{y1}}}{4}$,

где $t_{n0} = T_B$; $t_{y0} = T_B - \Delta t_{\partial 1}^{ym}$; $t_{y1} = t_{y3}$; $t_{n1} = T_H$, $^\circ C$.

$$a_3^{ym} = \frac{\lambda_{cp3}^{ym}}{C_{p3}^{ym} \rho_{t_{cp3}}}.$$

Уточнённый тепловой поток на третьем интервале нагрева, $\frac{Вт}{м^2}$,

$$q_3^{ym} = \frac{0,59 H_2 R C_{p3}^{ym} \rho_{t_{cp3}}}{3600}.$$

Уточнённое время нагрева - инерционное время, в течение которого тепловая волна (энергия), идущая от поверхности, практически достигает середины тела при симметричном нагреве или другой точки тела, где температура минимальная:

$$\text{для пластины} - \tau_{ин} = \frac{1}{6} \frac{S^2}{a_3};$$

$$\text{для цилиндра} - \tau_{ин} = \frac{1}{8} \frac{R^2}{a_3}.$$

$$\text{Время нарастания теплового потока от } q_2 \text{ до } q_3, \text{ ч, } \tau_3^H = 0,5 \frac{R^2}{4a_{cp3}^{ym}}.$$

$$\text{Перепад температур в конце третьего интервала, } \Delta t_{\partial 3}^{ym} = \frac{q_3 R}{2\lambda_{cp3}^{ym}}.$$

$$\text{Температура центра, } ^\circ\text{C, } t_{ц3}^{ym} = T_H - \Delta t_{\partial 3}^{ym}.$$

$$\text{Средняя температура в конце третьего интервала, } ^\circ\text{C, } t_{cp3}^{ym} = T_H - \frac{1}{2} \Delta t_{\partial 3}^{ym}.$$

$$\text{Температура печи, } ^\circ\text{C, } t_{печ.3} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{q_3}{C_{П.М}} + \left(\frac{T_H + 273}{100}\right)^4} - 273.$$

Температура печи должна быть выше температуры нагрева ($t_{печ.3} - T_H \geq 50^\circ\text{C}$).

Температура газа в конце третьего интервала определяется методом интерполяции.

Принимаем температуру газа $t_{Г3}^1$ на $20...50^\circ\text{C}$ больше, чем температура печи, и определяем тепловой поток, $\frac{Вт}{м^2}$:

$$q^1 = C_{Г.К.М} \left[\left(\frac{t_{Г3}^1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_H + 273}{100} \right)^4 \right] + \alpha_{конв} (t_{Г3}^1 - T_H),$$

где $C_{Г.К.М}$ – приведённый коэффициент излучения при температуре $t_{Г3}^1$ (см.

график $C_{Г.К.М} = f(T)$.

Если $q^1 > q_3^{ym}$, то температура газа в печи ниже. Уменьшаем температуру газа $t_{Г3}^1$ на 10°C и повторяем вычисления,

$$q^2 = C_{Г.К.М} \left[\left(\frac{t_{Г3}^2 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_H + 273}{100} \right)^4 \right] + \alpha_{конв} (t_{Г3}^1 - T_H).$$

Путём интерполяции определяем действительную температуру газа, $^\circ\text{C}$,

$$t_{Г3} = t_{Г3}^2 - \frac{q^2 - q_3}{q^2 - q^1} (t_{Г3}^1 - t_{Г3}^2).$$

Температура кладки в конце третьего интервала, $^\circ\text{C}$,
 $t_{кл.3} = 2t_{печи3} - t_{Г3}$.

Четвертый интервал (выдержка при T_H)

Расчёт ведётся, как и для второго интервала.

Степень выравнивания температур $\delta = \frac{\Delta t_3}{\Delta t_{\delta 3}^{ym}}$,

где Δt_3 – заданный перепад температур по сечению заготовки (см. исходные данные), $^\circ\text{C}$;

$\Delta t_{\delta 3}^{ym}$ – уточнённый перепад температур в конце третьего интервала (см. выше).

По рис. 4.1 определяем коэффициент выравнивания температур.

Время выравнивания температур, ч, $\tau_{выр} = \frac{mR^2}{a_{cp4} \cdot 3600}$, где

$$a_{cp4} = \frac{\lambda_{cp4}}{C_{p4} \rho_{T_H}}.$$

$$\lambda_{cp1} = \frac{\lambda_{t_{n0}} + \lambda_{t_{y1}} + \lambda_{t_{n1}} + \lambda_{t_{y0}}}{4},$$

где $t_{n0} = T_H$; $t_{y0} = T_H - \Delta t_{\delta 3}^{ym}$; $t_{n1} = T_H$; $t_{y1} = T_H - \Delta t_3$, $^\circ\text{C}$ (коэффициент теплопроводности определяется в зависимости от этих температур).

$$C_{p4} = \frac{i_{T_H} - i_{t_{y0}}}{T_H - t_{y0}}.$$

Время выдержки для завершения структурных превращений, ч,

$$\tau_4 = 2\tau_{выр}.$$

Тепловой поток в конце выдержки, $\frac{Bm}{m^2}$,

$$q_4 = \frac{2\lambda_{cp}4\Delta t_{\partial 3}}{R}.$$

В случае выдержки при температуре T_H , температуру печи, газа и кладки принимают равной температуре кладки, °C, во избежание перегрева,

$$t_{Г4} = t_{печи} = t_{кл4} = T_H.$$

При проектировании печи под термическую обработку заготовки необходимо рассчитать режим охлаждения заготовки.

Пятый интервал (охлаждение на воздухе от T_H до комнатных температур t_K)

Разобьём интервал охлаждения на два периода:

$$1) \text{ от } T_H \text{ до } \frac{T_H - t_K}{2};$$

$$2) \text{ от } \frac{T_H - t_K}{2} \text{ до } t_K.$$

1) Коэффициент теплоотдачи в начале и конце интервала можно

определить по рисунку 4.2, $\frac{Bm}{m^2 \cdot ^\circ C}$:
$$\alpha_{cp5} = \frac{\alpha_{T_H} - \alpha_{\frac{T_H - t_K}{2}}}{2,31 \lg \frac{\alpha_{T_H}}{\alpha_{\frac{T_H - t_K}{2}}}}.$$

Тепловой поток в начале процесса охлаждения, $\frac{Bm}{m^2}$, $q_5^{H_1} = \alpha_{T_H} (T_H - t_B),$

где t_B – температура воздуха, °C.

Тепловой поток в конце первого периода

$$q_5^{K1} = \alpha_{\frac{T_H - t_K}{2}} \left(\frac{T_H - t_K}{2} - t_B \right).$$

(4.2)

Температурный критерий поверхности $\Phi_5^n = \frac{\frac{T_H - t_K}{2} - t_B}{T_H - t_B}.$

Коэффициент теплопроводности, $\frac{Bm}{m^2 \cdot ^\circ C}$, $\lambda_{cp5} = \frac{\lambda_{T_H} + \lambda_{\frac{T_H - t_K}{2}}}{2}.$

Критерий Био
$$Bi = \frac{\alpha_{cp5} R}{\lambda_{cp5}}.$$

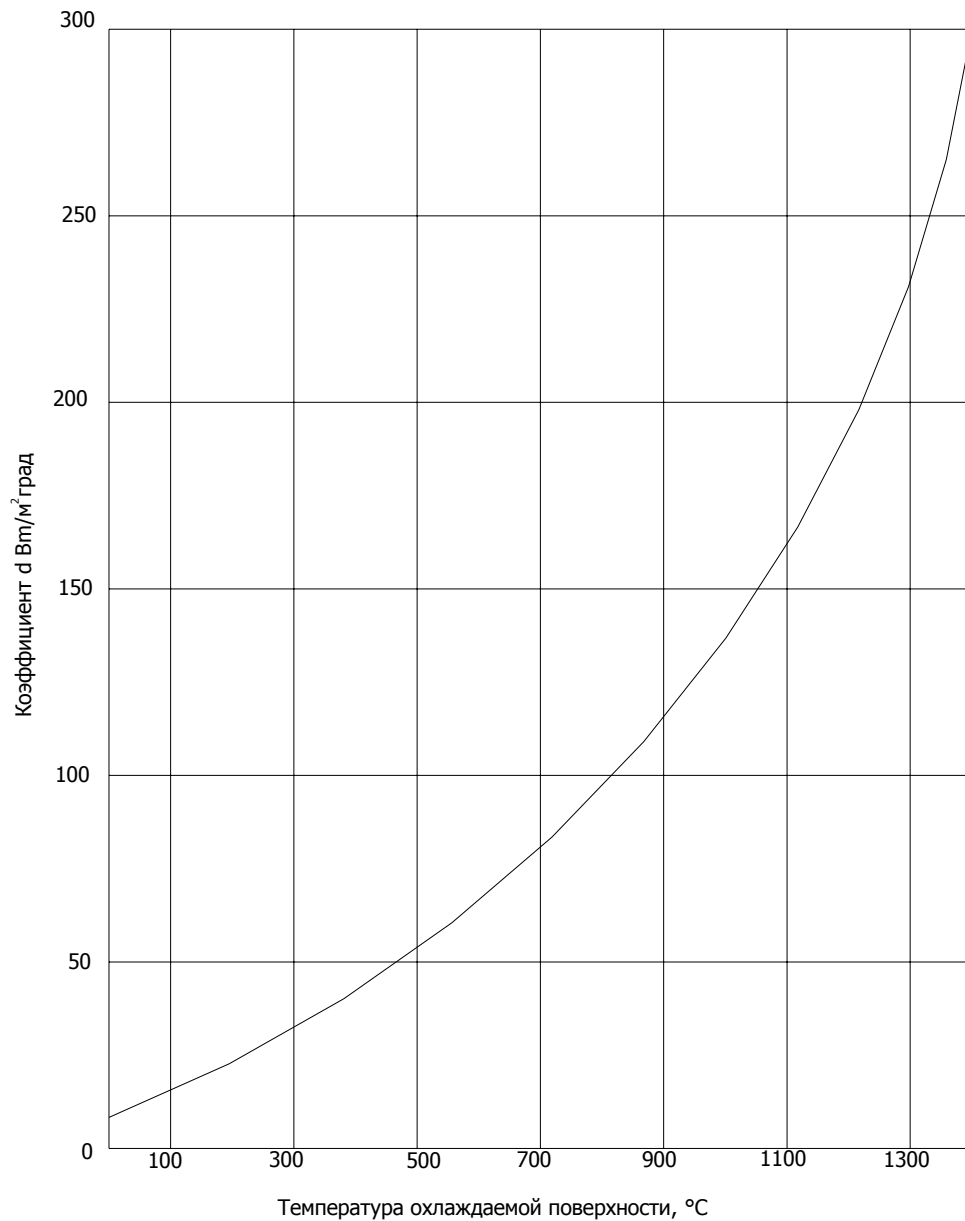


Рисунок 4.2 – Зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры поверхности

По критерию B_i и температурному критерию поверхности Φ^n определяют критерий Фурье (рис. 4.3 или 4.5). По графикам (рис. 4.4 или 4.6), в зависимости от геометрии заготовки (цилиндрическая или пластина), определяют обратным решением температурный критерий центра Φ^u , по известному критерию Био и критерию Фурье для поверхности.

Температура в центре заготовки, °C, $t_u^5 = t_B + \Phi^u(T_H - t_B)$.

Разность температур $\Delta t_{\partial 5} = t_u^5 - \frac{T_H - t_K}{2}$.

Средняя температура, °C, $t_{cp5} = \frac{T_H - t_K}{2} + \frac{1}{2}\Delta t_{\partial 5}$.

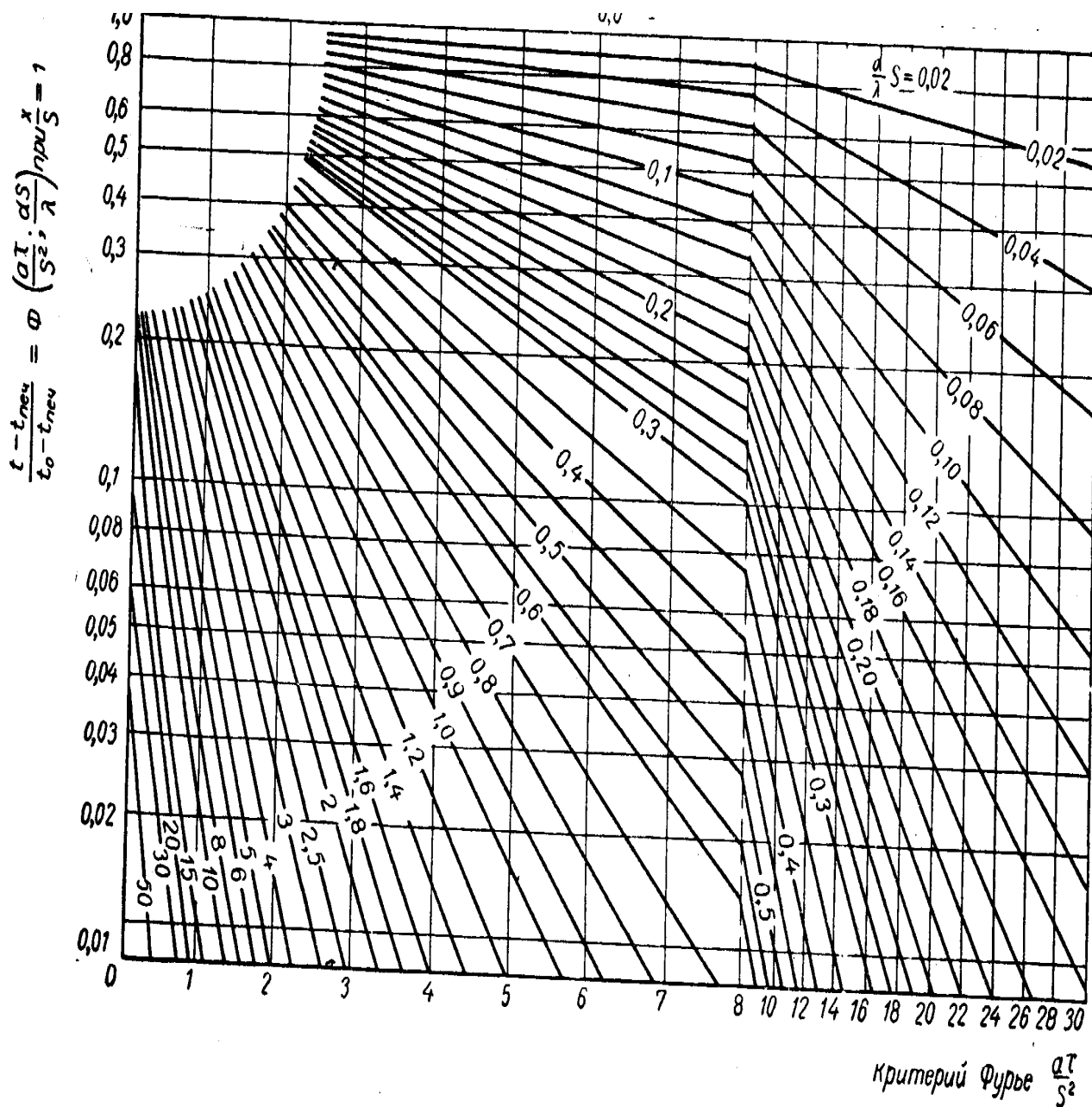


Рисунок 4.3 – Температурный критерий для поверхности пластины

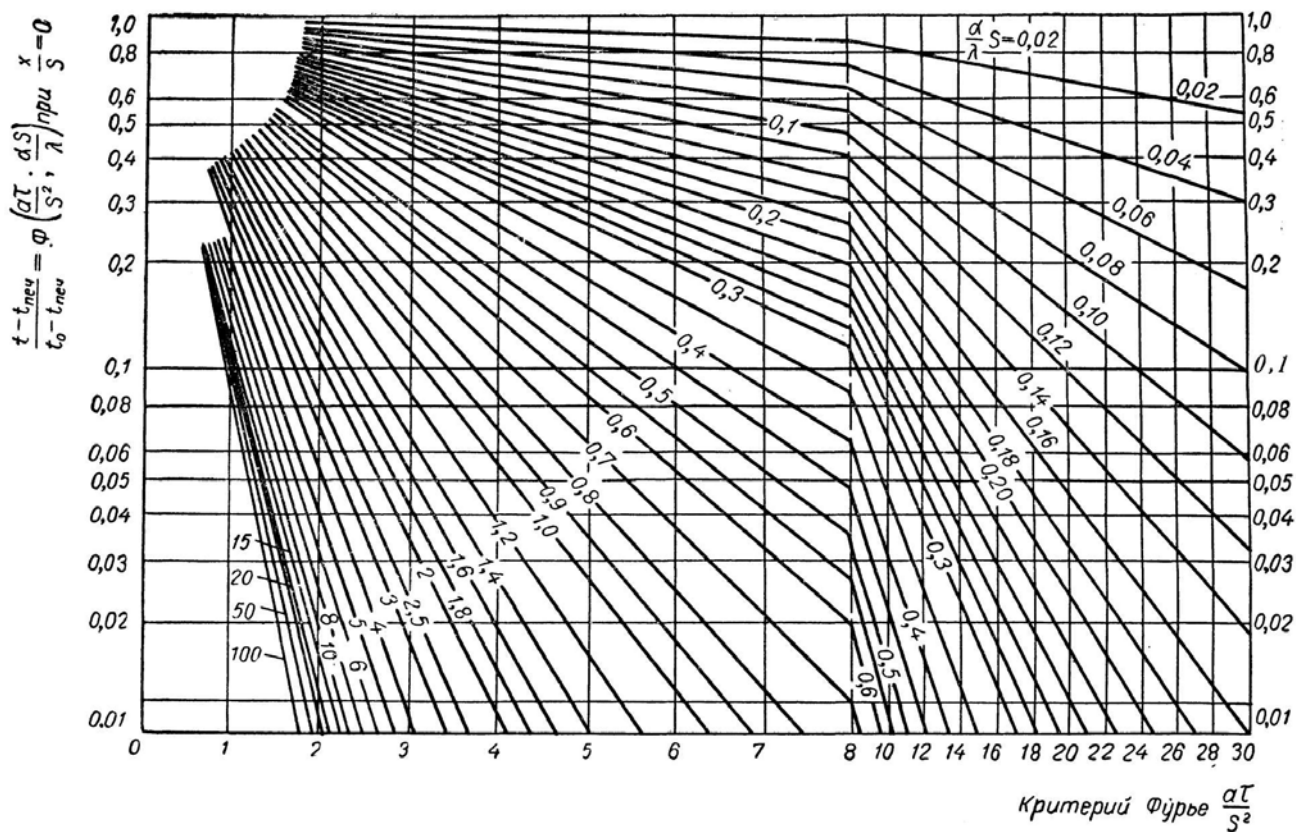


Рисунок 4.4 – Температурный критерий для центра пластины

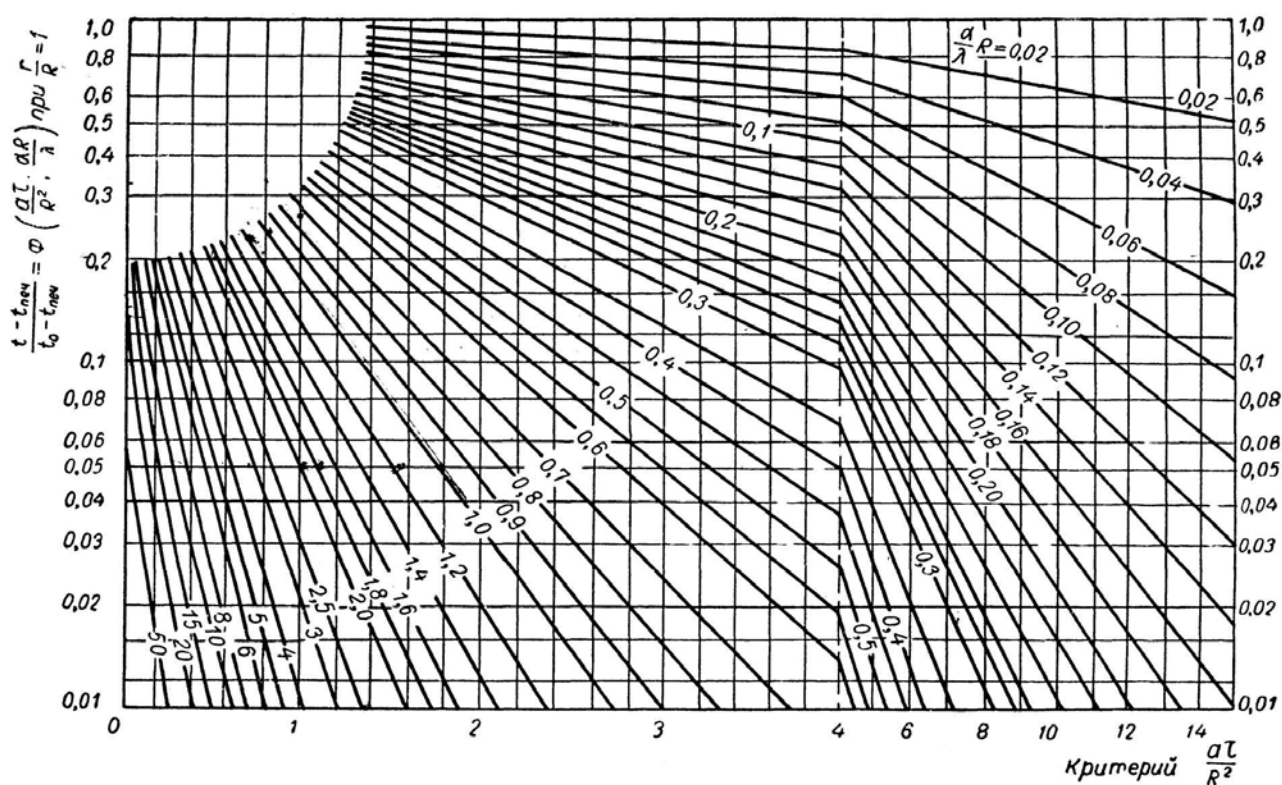


Рисунок 4.5 – Температурный критерий для поверхности цилиндра

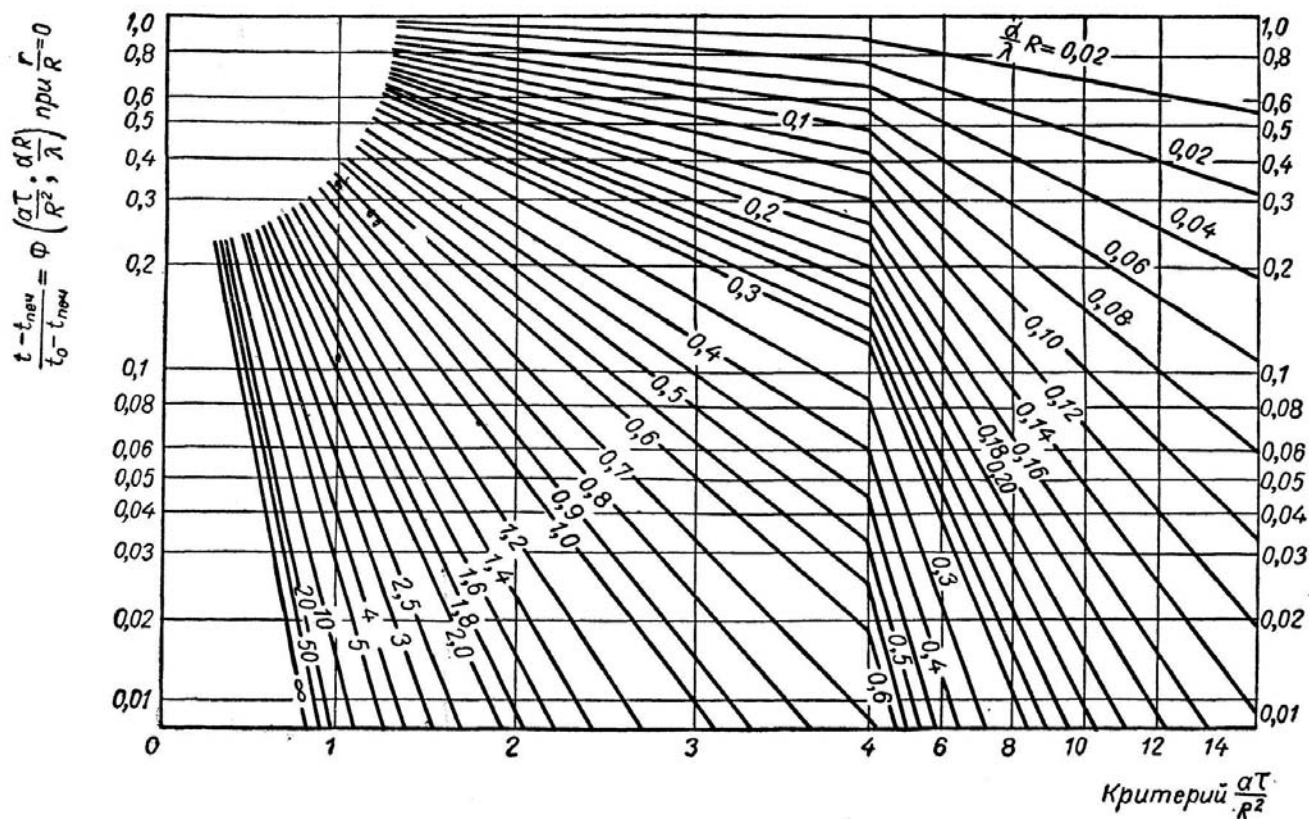


Рисунок 4.6 – Температурный критерий для оси цилиндра

Расчётная теплоёмкость, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$, $C_p^5 = \frac{i_{T_H} - i_{t_{cp5}}}{T_H - t_{cp5}}$.

Коэффициент температуропроводности, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$, $a_5 = \frac{\lambda_{cp5}}{10^3 C_p^5 \rho_{t_{cp5}}}$,

где $\rho_{t_{cp5}}$ – плотность материала при t_{cp5} , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Время охлаждения, ч, $\tau_5 = \frac{F_0 R^2}{a_5 \cdot 3600}$,

где F_0 – критерий Фурье, определяется по рис. 4.3 или 4.5.

2) Расчёт охлаждения во втором периоде ведётся аналогично первому.

Тепловой поток в начале второго периода охлаждения q_5^{H2} равен тепловому потоку в конце первого интервала q_5^{K1} охлаждения, определяемому по формуле (4.2).

Тепловой поток в конце второго интервала охлаждения

$$q_5^{K2} = \alpha_{t_K} (t_K - t_B),$$

где α_{t_K} – коэффициент теплоотдачи при t_K (конечной температуре охлаждения), $\frac{Вт}{кг \cdot ^\circ C}$.

$$\text{Температурный критерий поверхности } \Phi_6^n = \frac{t_K - t_B}{t_{cp5} - t_B}.$$

$$\text{Коэффициент теплопроводности } \lambda_{cp6} = \frac{\frac{\lambda_{T_H - t_K} + \lambda_{t_K}}{2}}{2};$$

$$\alpha_{cp6} = \frac{\frac{\alpha_{T_H - t_K} + \alpha_{t_K}}{2}}{2,31 \lg \frac{2}{\alpha_{t_K}}}.$$

$$\text{Критерий Био } Bi = \frac{\alpha_{cp6} R}{\lambda_{cp6}};$$

$$t_{y6} = t_B + F_0 \left(\frac{T_H - t_K}{2} - 20 \right);$$

$$\Delta t_{\partial 6} = t_{y6} - t_K; \quad t_{cp6} = t_K + \frac{1}{2} \Delta t_{\partial 6};$$

$$C_p^6 = \frac{\frac{i_{T_H - t_K} - i_{t_{cp6}}}{2}}{\frac{T_H - t_K}{2} - t_{cp6}}; \quad a_6 = \frac{\lambda_{cp6}}{10^3 C_p^6 \rho_{t_{cp6}}} \quad \tau_6 = \frac{F_0 R^2}{a_6 \cdot 3600}.$$

Общее время охлаждения, ч, $\tau_{охл} = \tau_5 + \tau_6$.

4.2 Расчёт нагрева металла в методических печах

Расчёт нагрева металла основан на увязке температурного режима отдельных зон печи и условий внешнего и внутреннего теплообмена в этих зонах с их тепловыми балансами. Продолжительность нагрева металла по зонам определяется по приращению теплосодержания металла и среднему тепловому потоку на металл в зонах.

Исходные данные для расчёта:

1) производительность печи, марка материала, размеры заготовки, начальная и конечная температура заготовки, перепад температур по сечению заготовки в конце нагрева, температура подогрева воздуха, газа и уходящих газов.

2) действительный расход воздуха, объём продуктов горения,

объёмное содержание продуктов горения, низшая теплота сгорания газа, плотность продуктов горения, теплосодержание уходящих газов и воздуха, температура газов по зонам, приведённый коэффициент излучения газа по зонам, площадь пода печи.

3) теплопроводность, теплосодержание, плотность заданной марки материала в интервале температур от начальной температуры нагрева до конечной температуры нагрева.

По таблицам 4.1 - 4.6 строятся графики зависимостей $\lambda = f(T)$, $C = f(T)$, $\rho = f(T)$, $i = f(T)$.

$$\text{Средняя температура в конце интервала, } ^\circ\text{C}, t_{cp.K} = T_H - \frac{2}{3} \Delta t_K, \quad (4.3)$$

где T_H – температура нагрева металла $^\circ\text{C}$, зависит от материала (см. табл. 2.1);

Δt_K – конечный перепад температур по сечению заготовки, определяется в задании.

Удельный тепловой поток к поверхности металла в конце нагрева, Вт/м^2 ,

$$q_K = \frac{2\lambda_{t_{cp.K}} \Delta t_K}{2S},$$

где $\lambda_{t_{cp.K}}$ – коэффициент теплопроводности металла при температуре $t_{cp.K}$;

$2S$ – полная толщина заготовки, в случае пластины или d – в случае цилиндрической заготовки.

Расчетная температура газов в сварочной зоне,

$$t_{св.р} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{q_K}{C_{св}^{изл}} + \left(\frac{T_H + 273}{100} \right)^4} - 273,$$

где $C_{св}^{изл}$ – коэффициент излучения в сварочной зоне, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{K}^4)$.

Коэффициент использования химической энергии топлива в сварочной

зоне:

$$\eta_{св} = \frac{Q_H^P + Q_{\phi} - Q_{ух.св}}{Q_H^P} - \left(\frac{Q_{изл}}{M_{общ}} \right),$$

где Q_H^P – теплота сгорания топлива, кДж/м^3 ;

$Q_{\phi} = L_{\partial} i_{\partial}$ – теплота вносимая подогретым воздухом, кДж/м^3 ;

$Q_{ух.св} = V_{\partial} i_{ух}$ – потери тепла с уходящими газами, кДж/м^3 ;

$Q_{изл} = q_{изл} F$ – теплота, излучаемая в сварочной зоне, Вт ;

$L_{\partial}, V_{\partial}$ определяются по расчёту горения топлива (см. раздел 1);

$q_{изл}$ – удельный тепловой поток излучения из сварочной зоны в методическую, принимают $100000-150000 \text{ Вт/м}^2$.

Площадь поперечного сечения рабочего пространства на границе сварочной и методических зон, м^2 , $F = B \cdot 2h_{мет}$.

Общая тепловая мощность печи, Вт, $M_{общ} = \frac{Gb}{3600}$,

где b – удельный расход тепла, принимаем 2,5 МДж/кг.

Коэффициент использования химической энергии топлива в печи

$$\eta_{общ} = \frac{Q_H^P + Q_{\phi} - Q_{ух.св}}{Q_H^P}.$$

Общее приращение теплосодержания металла, кДж/кг, $\Delta i = i_{t_{cp.K}} - i_{t_0}$.

$$\text{В методической зоне } \Delta i_1 = \Delta i' \left(1 - \frac{\eta_{св}}{\eta_{общ}} \right),$$

где $\Delta i'$ – приращение теплосодержания металла, кДж/кг,

$$\Delta i' = [(100 - \delta)\Delta i + \delta C_{OK} (T_H - t_0)m - 5,65\delta]0,01,$$

где δ – угар металла, принимают: $\delta = 3...5\%$;

C_{OK} – теплоёмкость окалины, принимают 1 кДж/(кг · °С);

$m = 1,38$.

Приращение теплосодержания металла в сварочной зоне $\Delta i_2 = i_{t_{cp.K}} - \Delta i_1$.

Тепловой поток в начале методической зоны, Вт/м²,

$$q_0 = C_M \left[\left(\frac{t_{yx} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_0 + 273}{100} \right)^4 \right].$$

$$\text{Тепловой поток в конце зоны } q_1 = C_M \left[\left(\frac{t_{св.p} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{M_1} + 273}{100} \right)^4 \right],$$

где t_{M_1} – средняя температура металла в конце методической зоны, соответствующая его теплосодержанию $i_1 = \Delta i_1$, определяемая по зависимости $i = f(T)$.

Уточнённый удельный тепловой поток, Вт/м²:

$$q_2 = C_M \left[\left(\frac{t_{св.p} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{M_1} + 273 + \frac{q_1 S}{3\lambda_{t_{M_1}}}}{100} \right)^4 \right],$$

$$q_3 = C_M \left[\left(\frac{t_{св.p} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{M_1} + 273 + \frac{q_2 S}{3\lambda_{t_{M_1}}}}{100} \right)^4 \right].$$

Сравниваем q_3 и q_2 . Если $|q_3 - q_2| \leq 1000 \frac{Bm}{m^2}$, то принимаем $q_n = q_3$, иначе считаем q_4 ,

$$q_4 = C_M \left[\left(\frac{t_{св.р} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{M_1} + 273 + \frac{q_3 S}{3\lambda_{t_{M_1}}}}{100} \right)^4 \right].$$

Сравниваем q_4 с q_3 , проверяем условие $|q_4 - q_3| \leq 1000 \frac{Bm}{m^2}$. При несовпадении повторяем расчёт.

Температура поверхности металла в конце зоны $t_{n1} = t_{M1} + \frac{q_i S}{3\lambda_{t_{M1}}}$.

Перепад температуры по сечению заготовки в конце методической зоны

$$\Delta t_1 = \frac{q_1 S}{2\lambda_{t_{M1}}}.$$

Температура оси заготовки в конце зоны $t_{y1} = t_{n1} - \Delta t_1$.

Средний тепловой поток в методической зоне, Вт/м², $q'_{cp} = \sqrt{q_0 q_i}$.

Время нагрева металла в методической зоне, ч, $\tau_1 = \frac{\Delta t_1 S \rho t_{y1} \cdot 10^3}{q'_{cp} \cdot 3600}$.

Время нагрева металла на участке сварочной зоны с монолитным подом, ч, $\tau_3 = \frac{L''_{CB} \cdot 2Sl\rho n}{G}$,

где L''_{CB} – длина монолитного пода, принимаем 0,18...0,22 от длины пода печи.

Теплоёмкость металла при температуре $t_{cp.K}$, $C = \frac{i_K}{t_{cp.K}}$.

Коэффициент температуропроводности, м²/ч, $a = \frac{\lambda_{t_{cp.K}} \cdot 3600}{C\rho \cdot 10^3}$.

Критерий $\frac{a\tau_3}{S^2}$.

Для определения критерия $\frac{\alpha S}{\lambda}$ находим коэффициент теплоотдачи в

конце нагрева, $\frac{Bm}{m^2 \cdot град}$: $\alpha = \frac{q_K}{t_{св.р} - T_H}$.

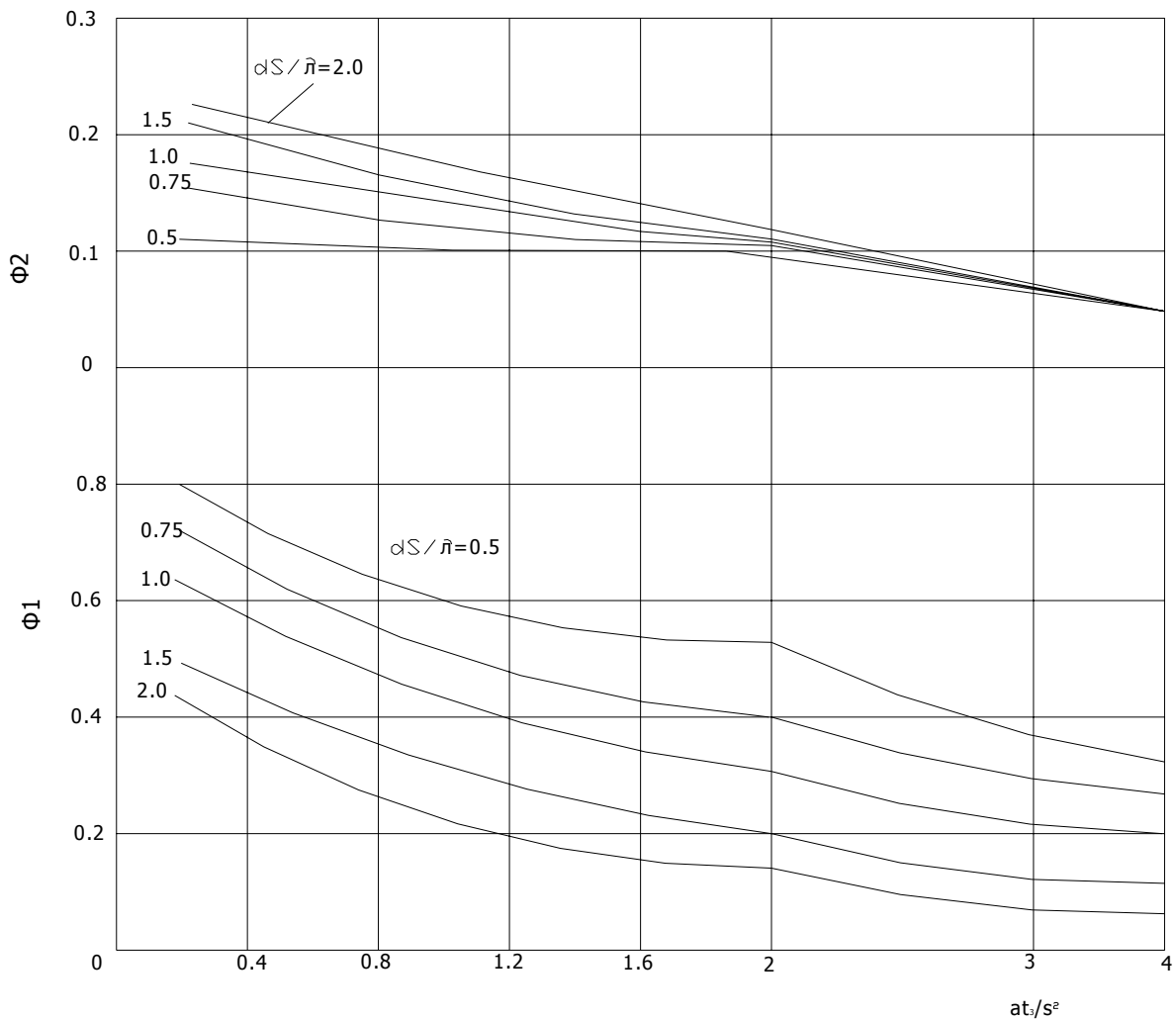


Рисунок 4.7 – Продолжительность выдержки на монолитном поду методической печи

Тогда $\frac{\alpha S}{\lambda_{t_{cp.K}}}$. На рисунке 4.7 по $\frac{\alpha S}{\lambda_{t_{cp.K}}}$ и $\frac{a\tau_3}{S^2}$ находим критерий Φ .

Температура поверхности металла при переходе на монолитный под, °С,

$$t_{n_2} = t_{св.p} - \frac{t_{св.p} - T_H}{\Phi}.$$

Удельный тепловой поток в начале участка, Вт/м²,

$$q_2 = C_{CB} \left[\left(\frac{t_{св.p} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{n_2} + 273}{100} \right)^4 \right].$$

Перепад температур по сечению металла в начале участка $\Delta t_2 = \frac{q_2 S}{2\lambda_{t_{n_2}}}$.

Средняя температура металла в начале участка $t_{cp2} = t_{n2} - \frac{2}{3}\Delta t_2$.

Средний тепловой поток на участке сварочной зоны с двусторонним

нагревом, Вт/м², $q_{cp}'' = \frac{q_i - q_2}{\lg \frac{q_i}{q_2}}$.

Теплосодержание металла в конце участка i_2 , соответствующее его температуре t_{cp2} , определяется по зависимости $i=f(T)$.

Приращение теплосодержания на участке $\Delta i_2' = i_2' - \Delta i_1$.

Время нагрева на участке, ч, $\tau_2 = \frac{\Delta i_2' S \rho_{t_{cp2}} \cdot 10^3}{q_{cp}'' \cdot 3600}$.

Общее время нагрева металла, ч, $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$.

Удельная продолжительность нагрева, мин/см, $z = \frac{60\tau}{2S \cdot 100}$.

Основные размеры печи

Ёмкость печи, кг, $E = G\tau$. (4.4)

Длина активного пода, м, $L_{акт} = \frac{E}{2Sl \cdot n\rho}$.

Длина методической зоны $L_{мет} = L_{акт} \frac{\tau_1}{\tau}$.

Длина сварочной зоны с монолитным подом $L_{CB}'' = 6м$.

Длина сварочной зоны с двухсторонним нагревом

$$L_{CB}' = L_{акт} - (L_{мет} + L_{CB}'')$$

Площадь активного пода, м², $F_{акт} = L_{акт}nl$,

где l – длина заготовки, м;

n – количество рядов, шт.

Площадь полезного пода, м², $F_{пол} = L_{пол}B$.

Напряжённость активного пода, $\frac{кг}{м^2 \cdot ч}$, $H_{акт} = \frac{G}{F_{акт}}$.

Напряжённость полезного пода, $\frac{кг}{м^2 \cdot ч}$, $H_{пол} = \frac{G}{F_{пол}}$.

Результаты расчёта сводятся в таблицу 4.7.

Таблица 4.7 - Результаты расчёта

τ_1 , ч	$\eta_{общ}$	τ_3 , ч	z , $\frac{мин}{см}$	τ_2 , ч	$L_{мет}$, м	L_{CB}' , м	L_{CB}'' , м	$H_{пол}$, $\frac{кг}{м^2 \cdot ч}$

4.3 Пример расчёта нагрева металла в камерных печах

Нагрев металла в печи состоит из трёх периодов, каждый из которых

делится на несколько интервалов. Производим расчёт нагрева в первом периоде. Разбиваем первый период на пять интервалов:

1 Нагрев от начальной температуры заготовки $T_3 = 20^\circ\text{C}$ до температуры выдержки $T_6 = 650^\circ\text{C}$, скорость нагрева постоянная $\vartheta_{H_2} = \text{const} = 40^\circ\text{C}/\text{ч}$.

2 Выдержка при постоянной температуре поверхности $T_6 = \text{const} = 650^\circ\text{C}$.

3 Нагрев от $T_6 = 650^\circ\text{C}$ до необходимой температуры нагрева $T_H = 1050^\circ\text{C}$, скорость нагрева $\vartheta_{H_2} = \text{const} = 60^\circ\text{C}/\text{ч}$.

4 Выдержка при $T_H = \text{const} = 1050^\circ\text{C}$ для выравнивания температур по сечению заготовки.

5 Охлаждение в процессе обработки давлением или при термической обработке (охлаждение на воздухе, в печи, в закалочных средах).

Нагрев и охлаждение – двухсторонние, определяющий размер – радиус бочки вала.

Производим расчёт нагрева в первом периоде по интервалам.

Первый интервал (от $T_3 = 20^\circ\text{C}$ до $T_6 = 650^\circ\text{C}$). Задаёмся перепадом температур между поверхностью и центром вала в конце первого интервала $\Delta t_{\partial 1} = 100^\circ\text{C}$.

Средняя температура в конце первого интервала, $^\circ\text{C}$,

$$t_{cp1} = T_B - \frac{1}{2} \Delta t_{\partial 1} = 650 - \frac{1}{2} \cdot 100 = 600^\circ\text{C}.$$

Среднее значение коэффициента теплопроводности материала, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$,

$$\lambda_{cp1} = \frac{\lambda_{T_3}^n + \lambda_{T_3}^y + \lambda_{T_B}^n + \lambda_{T_B}^y}{4} = \frac{\lambda_{20} + \lambda_{20} + \lambda_{650} + \lambda_{550}}{4} = \frac{35,4 + 35,4 + 27 + 29}{4} = 31 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$$

Температура центра заготовки, $^\circ\text{C}$ $t_{\text{ц}} = T_B - \Delta t_{\partial 1} = 650 - 100 = 550^\circ\text{C}$.

Теплоёмкость на первом интервале, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$,

$$C_{p1} = \frac{it_{cp1} - iT_3}{t_{cp1} - T_3} = \frac{340,3 - 8,3}{600 - 20} = 0,57 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}),$$

где $it_{cp1} = 340,3 \text{ кДж}/\text{кг}$ (определяется по зависимости $i=f(T)$ для стали У12);

$iT_3 = 8,3 \text{ кДж}/\text{кг}$.

Коэффициент температуропроводности, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$,

$$a = \frac{\lambda_{t_{cp1}}}{C_{p1} \rho_{t_{cp1}}} = \frac{31}{0,57 \cdot 10^3 \cdot 7780} = 7 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}.$$

Уточняем температуру центра заготовки, °C,

$$t_{ц}^{ym} = T_B - \frac{9_{H1} R^2}{4a \cdot 3600} = 650 - \frac{40 \cdot 0,415^2}{4 \cdot 0,025} = 580^\circ \text{C}.$$

Перепад температур в конце первого интервала уточненный

$$\Delta t_{\partial 1}^{ym} = T_B - t_y^{ym} = 650 - 580 = 70^\circ \text{C}.$$

Пересчитываем среднюю температуру, °C,

$$t_{cp1}^{ym} = T_B - \frac{1}{2} \Delta t_{\partial 1}^{ym} = 650 - \frac{1}{2} \cdot 70 = 615^\circ \text{C}.$$

Так как $t_{cp1}^{ym} = 615^\circ \text{C}$ незначительно отличается от $t_{cp1} = 600^\circ \text{C}$, то повторного уточнения не производим.

Тепловой поток, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$:

$$q_1 = \frac{0,59_{H1} R C_{p1} \rho_{t_{cp1}}}{3600} = \frac{0,5 \cdot 40 \cdot 0,415 \cdot 570 \cdot 7780}{3600} = 10180 \text{ Вт} / \text{м}^2,$$

Уточнённое время нагрева на первом интервале, ч,

$$\tau_1 = \frac{R \rho_{cp1} \Delta i_1}{2 q_1} = \frac{0,415 \cdot 7780 \cdot 352 \cdot 10^3}{2 \cdot 10180} = 15,6 \text{ ч},$$

где $\Delta i_1 = i_{t_{cp1}}^{ym} - i_{T_{\partial}} = 360,3 - 8,3 = 352, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$

Расчётное время нагрева $\tau_1 = 15,6 \text{ ч}$ близко к заданному по режиму термической обработке, $\tau_1 = \frac{T_H - T_3}{\nu_{H1}} = \frac{650 - 20}{0,0111} = 15,7 \text{ ч}.$

Определение температуры газа в начале нагрева. Отличительной особенностью расчета теплообмена в печах для термической обработки является значительная роль теплоотдачи конвекцией благодаря относительно низким температурам нагрева.

Тепловой поток, передаваемый от печи к нагреваемому металлу, складывается из тепловых потоков излучения и конвекций, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$:

$$q = q_{изл} + q_{конв} = C_{Г.К.М} \left[\left(\frac{T_{Г}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 \right] + \alpha_K (t_{Г} - t_3),$$

Температуру газа из данного равенства можно получить методом подбора.

Температура печи в начале нагрева при условии, что тепло от печи к

металлу передаётся только излучением, °C,

$$t_{печи} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{q_1}{C_{н.м}} + \left(\frac{T_3 + 273}{100}\right)^4} - 273K = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{10180}{3,52} + \left(\frac{293}{100}\right)^4} - 273 = 470.$$

Действительное значение $t_{печи}$ ниже, так как тепло передаётся не только излучением, но и конвекцией. Далее производится уточнение температуры печи.

Определяем температуру газа в начале нагрева $t_{Г0}$. Принимаем температуру газа равной температуре печи: $t_{Г0} \approx t_{печи} = 470^\circ C$. Определяем значения теплового потока, $\frac{Вт}{м^2}$ по формуле (4.1)

$$q'_0 = 3,34 \cdot \left[\left(\frac{470 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] + 6 \cdot (470 - 20) = 12580 \text{ Вт} / \text{м}^2.$$

Так как $q'_0 = 12580 \text{ Вт} / \text{м}^2$, больше $q_0 = 10180 \text{ Вт} / \text{м}^2$, то принятая температура газа $t_{Г0} = 470^\circ C$ больше фактической. Уменьшаем температуру на $30^\circ C$ ($t_{Гi} = t_{Г0} - 30^\circ C = 440^\circ C$). Тогда

$$q''_0 = 3,35 \cdot \left[\left(\frac{440 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] + 6 \cdot (440 - 20) = 10230 \text{ Вт} / \text{м}^2.$$

Так как $q''_0 \approx q_0$, то $t_{Г0} = 440^\circ C$.

Общий приведённый коэффициент теплообмена с учётом теплоотдачи конвекцией, $\frac{Вт}{м^2 \cdot K^4}$,

$$C_{Г.К.М}^{общ} = \frac{q_1}{\left[\left(\frac{T_{Г0}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 \right]} = \frac{10183}{\left[\left(\frac{440 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right]} = 4,08 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot ^\circ K^4).$$

Приведённый коэффициент конвективного теплообмена, $\frac{Вт}{м^2 \cdot K^4}$,

$$C_{Г.К.М}^{конв} = C_{Г.К.М}^{общ} - C_{Г.К.М} = 4,08 - 3,35 = 0,73 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot ^\circ K^4).$$

Доля конвекционной теплоотдачи от отдачи излучением,

$$\frac{C_{ГКМ}^{конв}}{C_{ГКМ}^{изл}} = \frac{0,73}{3,35} = 0,23.$$

Так как теплоотдача конвекцией составляет 23% теплоотдачи излучением, то нельзя пренебречь конвекцией или ограничиться надбавкой

10% на теплоотдачу излучением, как в расчётах высокотемпературных печей (при $t_{\Gamma} = 800^{\circ}\text{C}$ и выше).

Уточнение температуры печи в начале нагрева, $^{\circ}\text{C}$:

$$t_{\text{печи}}^{\text{ym}} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{10180}{1,23 \cdot 3,52} + \left(\frac{20 + 273}{100}\right)^4} - 273 = 420^{\circ}\text{C}.$$

Температура кладки печи, $^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{кл}0} = 2t_{\text{печи}} - t_{\Gamma 0} = 2 \cdot 420 - 440 = 400^{\circ}\text{C}.$

Температура печи при условии, что тепло от печи к металлу передаётся только излучением в конце первого интервала нагрева, $^{\circ}\text{C}$,

$$\begin{aligned} t_{\text{печи}}^{K1} &= 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{q_1}{C_{\text{н.м}}} + \left(\frac{T_B + 273}{100}\right)^4} - 273 = \\ &= 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{10180}{3,52} + \left(\frac{650 + 273}{100}\right)^4} - 273 = 730^{\circ}\text{C}. \end{aligned}$$

Температура газа в конце первого интервала, $^{\circ}\text{C}$,

$$t_{\Gamma 1} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{10180}{3,23} + \left(\frac{650 + 273}{100}\right)^4} - 273 = 740.$$

Определяем температуру печи в конце первого интервала (уточненное значение), принимая теплоотдачу конвекцией 15%:

$$t_{\text{печи}}^{\text{ym}} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{10180}{3,52 \cdot 1,15} + \left(\frac{650 + 273}{100}\right)^4} - 273 = 720^{\circ}\text{C}.$$

Уточнённая температура кладки к концу первого интервала, $^{\circ}\text{C}$,

$$t_{\text{кл}1} = 2t_{\text{печи}1} - t_{\Gamma 1} = 2 \cdot 720 - 740 = 700^{\circ}\text{C}.$$

Коэффициент теплопроводности в начале нагрева, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$,

$$a_0 = \frac{\lambda_{T_3}}{C_{T_3} \rho_{T_3}} = \frac{35,6}{460 \cdot 7780} = 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с}.$$

Второй интервал (выдержка при температуре $T_B = 650^{\circ}\text{C}$). Определяем время, необходимое для выравнивания температур. Задаёмся: $\Delta t_3 = 10^{\circ}\text{C}$.

$$\text{Степень выравнивания температур } \delta = \frac{\Delta t_3}{\Delta t_{\delta 1}^{\text{ym}}} = \frac{10}{70} = 0,145.$$

По рис. 4.1 определяем коэффициент выравнивания температур.

$$\text{Время выравнивания температур, ч, } \tau_{\text{выр}} = \frac{mR^2}{a_2 \cdot 3600}.$$

$$\text{Коэффициент температуропроводности, } \frac{\text{м}^2}{\text{с}}, a = \frac{\lambda_{t_{\text{cp}2}}}{C_p \rho_{t_{\text{cp}2}}}.$$

$$\lambda_{cp1} = \frac{\lambda_{t_{n0}} + \lambda_{t_{y1}} + \lambda_{T_B} + \lambda_{t_{y1}}}{4},$$

$$C_p = \frac{i_{T_B} - i_{t_{y0}}}{T_B - t_{y0}} = \frac{380 - 340}{650 - 580} = 0,57 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{град)};$$

$$a = \frac{\lambda_{cp2}}{C_p \rho_{t_{cp2}}} = \frac{27,7}{570 \cdot 7780} = 62 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}.$$

Определяем время выдержки, $\tau_{выр} = \frac{0,33 \cdot 0,415^2}{62 \cdot 10^{-7}} = 9300 \text{ с} = 2,6 \text{ ч}.$

Выдержка при отжиге необходима для выравнивания температур по сечению, а также для завершения всех структурных превращений металла. Как следует из литературных данных, время выдержки примерно равно двойному времени выравнивания: $\tau_{выд} = 2\tau_{выр} = 2 \cdot 9300 \approx 5,2 \text{ ч}.$

Тепловой поток в конце выравнивания температуры,

$$q_2 = \frac{2 \cdot 27,5 \cdot 10}{0,415} = 1320 \text{ Вт / м}^2.$$

Третий интервал – нагрев после выдержки от температуры T_B до температуры нагрева T_H под ОМД. Скорость нагрева ϑ_{H2} .

Тепловой поток на третьем интервале, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, $q_3 = \frac{0,5 \vartheta_{H2} R C_p \rho_{t_{cp3}}}{3600}.$

Принимаем: $C_{p3} = 0,67$;

$$q_3 = 0,5 \cdot 670 \cdot 0,415 \cdot 0,017 \cdot 7780 = 18300 \text{ Вт / м}^3.$$

Коэффициент теплопроводности

$$\lambda_{cp3} = \frac{\lambda_{650} + \lambda_{650} + \lambda_{1050}}{3} = \frac{27 + 27 + 24,5}{3} = 26 \text{ Вт / (м} \cdot \text{°C)};$$

$$a = \frac{26}{670 \cdot 7780} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}.$$

Действительная разность температур между поверхностью и центром, °C,

$$\Delta t_{\partial 3} = \frac{\vartheta_{H2} R^2}{4a_3} = \frac{60 \cdot 0,415^2}{4 \cdot 0,018} = 140^\circ \text{C}.$$

Средняя температура, °C,

$$t_{cp3} = T_H - \frac{1}{2} \Delta t_{\partial 3} = 1050 - \frac{1}{2} \cdot 140 = 980^\circ \text{C}.$$

Температура центра заготовки к концу третьего нагрева, °C,

$$t_{y3} = T_H - \Delta t_{\partial 3} = 1050 - 140 = 910^\circ \text{C}.$$

Пересчитываем теплофизические константы с учётом уточнённой

температуры: $C_{p3}^{ym} = \frac{i_{980} - i_{650}}{t_{cp3} - T_B} = \frac{655 - 380}{980 - 650} = 0,83 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot ^\circ \text{C});$

$$\lambda_{cp3}^{ym} = \frac{27 + 27 + 24,5 + 23,3}{4} = 25,4 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ \text{C});$$

$$a_3^{ym} = \frac{25,4}{830 \cdot 7780} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с} \approx 0,014 \text{ м}^2 / \text{ч}.$$

Уточнённый тепловой поток на третьем интервале нагрева,

$$q_3^{ym} = 0,5 \cdot 0,017 \cdot 0,415 \cdot 830 \cdot 7780 = 22900 \text{ Вт} / \text{м}^3.$$

Время начального периода $\tau_3' = \frac{0,415^2}{8 \cdot 4 \cdot 10^{-6}} = 5400 \text{ с} = 1,5 \text{ ч}.$

Время нарастания теплового потока от q_2 до q_3 , ($22900 \text{ Вт} / \text{м}^3$)

$$\tau_3^H = 0,5 \frac{0,415^2}{4 \cdot 10^{-6}} = 21600 \text{ с} = 6 \text{ ч}.$$

Перепад температур в конце третьего интервала $\Delta t_{\partial 3}^{ym} = \frac{22900 \cdot 0,415}{2 \cdot 24} = 190^\circ \text{C};$

$$\lambda_3 = \frac{\lambda_{1050} + \lambda_{910}}{2} = \frac{24,5 + 23,5}{2} = 24 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ \text{C}).$$

Температура центра, $^\circ \text{C}$, $t_{ц3}^{ym} = 1050 - 190 = 860^\circ \text{C}.$

Средняя температура в конце третьего интервала, $^\circ \text{C}$,

$$t_{cp3}^{ym} = 1050 - \frac{1}{2} \cdot 190 = 960^\circ \text{C}.$$

Температура печи, $^\circ \text{C}$, $t_{печ.3} = 100 \cdot 4 \sqrt{\frac{22900}{3,52} + \left(\frac{1050 + 273}{100} \right)^4} - 273 = 1120^\circ \text{C}.$

Определяем температуру газа в конце третьего интервала.

Принимаем температуру газа $t_{г3}^1$ приблизительно 1120°C . Тогда

$$q^1 = 2,86 \left[\left(\frac{1120 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{1050 + 273}{100} \right)^4 \right] + 10 \cdot (1120 - 1050) =$$

$$= 20760 \text{ Вт} / \text{м}^2.$$

Так как $q^1 > q_3^{ym}$, принимаем $t_n' = t_n'' = 1150^\circ \text{C}$. Тогда

$$q^2 = 2,77 \left[\left(\frac{1150 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{1050 + 273}{100} \right)^4 \right] + 10 \cdot (1150 - 1050) =$$

$$= 31490 \text{ Вт} / \text{м}^2.$$

Путём интерполяции определяем действительную температуру газа, $^\circ \text{C}$,

$$t_{ГЗ} = 1130^{\circ}\text{C}.$$

Температура кладки в конце третьего интервала, $^{\circ}\text{C}$,

$$t_{кл.3} = 2t_{печи3} - t_{ГЗ} = 2 \cdot 1120 - 1130 = 1110^{\circ}\text{C}.$$

Четвертый интервал (выдержка при $T_H = 1050^{\circ}\text{C}$). Расчёт ведётся, как и для второго интервала.

$$\text{Время выравнивания температур, ч, } \tau_{выр} = \frac{0,73 \cdot 0,415^2}{5 \cdot 10^{-6}} = 25000\text{с} = 7\text{ч}.$$

Время выдержки для завершения структурных превращений, ч, $\tau_4 = 2 \cdot 7 = 14\text{ч}$.

Тепловой поток в конце выравнивания температуры,

$$q_4 = \frac{2 \cdot 26,2 \cdot 5}{0,415} = 635\text{Вт/м}^2.$$

В случае выдержки при температуре T_H , температуру печи, газа и кладки принимают равной температуре кладки, $^{\circ}\text{C}$, во избежание перегрева,

$$t_{ГЗ} = t_{печи} = t_{кл4} = T_H = 1050^{\circ}\text{C}.$$

При проектировании печи под термическую обработку заготовки необходимо рассчитать режим охлаждения заготовки.

Пятый интервал (охлаждение на воздухе от $T_H = 1050^{\circ}\text{C}$ до температуры $t_K = 350^{\circ}\text{C}$).

Разобьём интервал охлаждения на два периода:

$$1) \text{ от } T_H = 1050^{\circ}\text{C} \text{ до } \frac{T_H - t_K}{2} = 500^{\circ}\text{C};$$

$$2) \text{ от } \frac{T_H - t_K}{2} = 500^{\circ}\text{C} \text{ до } t_K = 350^{\circ}\text{C}.$$

1) Коэффициент теплоотдачи в начале и конце интервала можно определить по рисунку 4.2: $\alpha_{cp5} = \frac{157 - 46,5}{2,31 \lg \frac{157}{46,5}} = 93\text{Вт/(м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)}.$

Тепловой поток в начале процесса охлаждения

$$q_5^{H_1} = \alpha_{T_H} (T_H - t_B) = 157 \cdot (1050 - 20) = 162 \cdot 10^3\text{Вт/м}^2.$$

Тепловой поток в конце первого периода $q_5^{K_1} = 46,5 \cdot (500 - 20) = 23300\text{Вт/м}^2.$

$$\text{Температурный критерий поверхности } \Phi_5^n = \frac{\frac{T_H - t_K}{2} - t_B}{T_H - t_B} = \frac{500 - 20}{960 - 20} = 0,51.$$

Коэффициент теплопроводности

$$\lambda_{cp5} = \frac{\lambda_{1050} + \lambda_{1045} + \lambda_{500}}{3} = \frac{24,5 + 24,5 + 29,6}{3} = 26,2\text{Вт/(м}^{\circ}\text{C)}.$$

$$\text{Критерий Био } B_i = \frac{\alpha_{cp5} R}{\lambda_{cp5}} = \frac{93 \cdot 0,4115}{26,2} = 1,45.$$

По критерию B_i и температурному критерию поверхности Φ^n определяют критерий Фурье (рис. 4.3 или 4.5)

По графику (рис. 4.4 или 4.6) в зависимости от геометрии заготовки (цилиндрическая или пластина) определяют обратным решением температурный критерий центра Φ'' по известному критерию Био и критерию Фурье для поверхности.

$$\text{Температура в центре заготовки } t_{ц5}^5 = 20 + 0,75 \cdot (1050 - 20) = 790^\circ\text{C}.$$

$$\text{Разность температур } \Delta t_{\partial 5} = 790 - 500 = 290^\circ\text{C}.$$

$$\text{Средняя температура, } ^\circ\text{C}, t_{cp5} = 500 + \frac{1}{2} \cdot 290 = 645^\circ\text{C}.$$

$$\text{Расчётная теплоёмкость } C_P^5 = \frac{i_{1050} - i_{645}}{1050 - 645} = \frac{705 - 420}{405} = 0,7 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}).$$

$$\text{Коэффициент температуропроводности } a_5 = \frac{25,8}{700 \cdot 7780} = 47 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}.$$

$$\text{Время охлаждения, ч, } \tau_5 = \frac{0,16 \cdot 0,415^2}{0,0470} = 6000 \text{ с} = 1,7 \text{ ч}.$$

2) Расчёт охлаждения во втором периоде ведётся аналогично первому.

Тепловой поток в начале второго периода охлаждения q_5^{H2} равен тепловому потоку в конце первого интервала q_5^{K1} охлаждения согласно формуле (4.2).

Тепловой поток в конце второго интервала охлаждения

$$q_5^{K2} = 28 \cdot (350 - 20) = 9350 \text{ Вт} / \text{м}^2.$$

$$t_{ц6} = 560^\circ\text{C}.$$

$$\Delta t_{\partial 6} = 550 - 350 = 200^\circ\text{C}.$$

$$\tau_6 = \frac{0,5 \cdot 0,415^2}{5 \cdot 10^{-4}} = 17200 \text{ с} = 4,8 \text{ ч}.$$

$$\text{Общее время охлаждения, ч, } \tau_{O.K.M} = 1,7 + 4,8 = 6,5 \text{ ч}.$$

4.4 Пример расчёта нагрева металла в двухзонной методической печи

Исходные данные для расчёта:

производительность печи $G = 1000000 \text{ кг} / \text{ч}$;

марка стали – сталь 20;

толщина заготовки $S = 0,07 \text{ м}$;

длина заготовки $l = 5\text{ м}$;

начальная температура заготовки $t_H = 0^\circ\text{C}$;

конечная температура заготовки $T_H = 1250^\circ\text{C}$;

конечный перепад температур по сечению заготовки $\Delta t_K = 30^\circ\text{C}$;

температура уходящих газов $t_{yx} = 1000^\circ\text{C}$;

теплосодержание уходящих газов $i_{yx} = 2090 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$;

теплота сгорания топлива $Q_H^P = 10000 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$;

плотность металла $\rho = 7800 \text{ кг} / \text{м}^3$;

ширина печи $B = 5,6\text{ м}$;

количество рядов заготовок по ширине печи $n = 1\text{ шт.}$;

действительный расход воздуха $L_D = 2,64 \text{ м}^3 / \text{м}^3$;

теплосодержание воздуха $i_B = 531 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$;

коэффициент излучения в сварочной зоне $C_{св} = 2,9 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$;

коэффициент излучения в методической зоне $C_{мет} = 2,9 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$;

объём продуктов сгорания $V_D = 3,35 \text{ м}^3 / \text{м}^3$.

Расчёт нагрева металла

Средняя температура металла в конце интервала, $^\circ\text{C}$,

$$t_{ср.К} = T_H - \frac{2}{3} \Delta t_K = 1250 - \frac{2}{3} \cdot 30 = 1230^\circ\text{C}.$$

Удельный тепловой поток к поверхности металла в конце нагрева, $\text{Вт}/\text{м}^2$,

$$q_K = \frac{\lambda_{t_{ср.К}} \Delta t_K}{S} = \frac{30,3 \cdot 30}{0,07} = 12985,7 \text{ Вт} / \text{м}^2.$$

Расчетная температура газов в сварочной зоне

$$\begin{aligned} t_{св.р} &= 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{q_K}{C_{св}} + \left(\frac{T_H + 273}{100} \right)^4} - 273 = \\ &= 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{12985,7}{2,9} + \left(\frac{1250 + 273}{100} \right)^4} - 273 = 1280^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Теплота, вносимая подогретым воздухом, $\text{кДж}/\text{м}^3$,

$$Q_{\phi} = L_D i_B = 531 \cdot 2,64 = 1401,84 \text{ кДж} / \text{м}^3.$$

Потери тепла с уходящими газами, кДж/м³,

$$Q_{yx.cв} = V_{\partial} i_{yx} = 2090 \cdot 3,45 = 7210,5 \text{ кДж} / \text{м}^3.$$

Теплота, излучаемая в сварочной зоне, Вт,

$$Q_{изл} = q_{изл} F = 36 \cdot 10^4 \cdot 5,6 = 201,6 \cdot 10^4 \text{ Вт}.$$

Общая тепловая мощность печи, Вт, $M = 700G = 7 \cdot 10^7 \text{ Вт}$.

Коэффициент использования химической энергии топлива в сварочной зоне

$$\eta_{св} = \frac{Q_H^P + Q_{\phi} - Q_{yx.cв}}{Q_H^P} - \left(\frac{Q_{изл}}{M_{общ}} \right) = \frac{10000 + 1401,84 - 7210,5}{10000} - \frac{201,6 \cdot 10^4}{7 \cdot 10^7} = 0,39.$$

Коэффициент использования химической энергии топлива в печи

$$\eta_{общ} = \frac{Q_H^P + Q_{\phi} - Q_{yx.cв}}{Q_H^P} + 0,2 = \frac{10000 + 1401,84 - 7210,5}{10000} + 0,2 = 0,619.$$

Общее приращение теплосодержания металла, кДж/кг,

$$\Delta i = i_{t_{ср.К}} - i_{t_0} = 858,29 - 0 = 858,29 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

Приращение теплосодержания металла, кДж/кг,

$$\begin{aligned} \Delta i' &= [(100 - \delta) \Delta i + \delta C_{ОК} (T_H - t_0) m - 5,65 \delta] 0,01 = \\ &= [98,5 \cdot 858,29 + 2,07 \cdot (1250 - 0) - 7500] \cdot 0,01 = 796,29 \text{ кДж} / \text{кг} \end{aligned}$$

в методической зоне -

$$\Delta i_1 = \Delta i' \left(1 - \frac{\eta_{св}}{\eta_{общ}} \right) = 796,29 \cdot \left(1 - \frac{0,39}{0,619} \right) = 294,62 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

в сварочной зоне - $\Delta i_2 = i_{t_{ср.К}} - \Delta i_1 = 858,29 - 294,62 = 563,67 \text{ кДж} / \text{кг}.$

Тепловой поток в начале методической зоны, Вт/м²,

$$\begin{aligned} q_0 &= C_M \left[\left(\frac{t_{yx} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_0 + 273}{100} \right)^4 \right] = \\ &= 2,9 \cdot \left[\left(\frac{1000 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{0 + 273}{100} \right)^4 \right] = 76320 \text{ Вт} / \text{м}^2. \end{aligned}$$

Тепловой поток в конце зоны

$$\begin{aligned} q_1 &= C_M \left[\left(\frac{t_{св.р} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{M_1} + 273}{100} \right)^4 \right] = \\ &= 2,9 \cdot \left[\left(\frac{1280 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{500 + 273}{100} \right)^4 \right] = 179046 \text{ Вт} / \text{м}^2. \end{aligned}$$

Уточнённый удельный тепловой поток, Вт/м²:

$$q_2 = C_M \left[\left(\frac{t_{св.р} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{M_1} + 273 + \frac{q_1 S}{3\lambda_{t_{M_1}}}}{100} \right)^4 \right] =$$

$$= 2,9 \cdot \left[\left(\frac{1280 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{500 + 273 + \frac{179046 \cdot 0,07}{3 \cdot 39,3}}{100} \right)^4 \right] = 219945 \text{ Вт/м}^2.$$

$$q_3 = C_M \left[\left(\frac{t_{св.р} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{M_1} + 273 + \frac{q_2 S}{3\lambda_{t_{M_1}}}}{100} \right)^4 \right] =$$

$$= 2,9 \cdot \left[\left(\frac{1280 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{500 + 273 + \frac{219945 \cdot 0,07}{3 \cdot 39,3}}{100} \right)^4 \right] = 187975 \text{ Вт/м}^2.$$

Сравниваем q_3 и q_2 . Если $|q_3 - q_2| = |31970| > 1000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, считаем q_4 :

$$q_4 = C_M \left[\left(\frac{t_{св.р} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{M_1} + 273 + \frac{q_3 S}{3\lambda_{t_{M_1}}}}{100} \right)^4 \right] =$$

$$= 2,9 \cdot \left[\left(\frac{1280 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{500 + 273 + \frac{187975 \cdot 0,07}{3 \cdot 39,3}}{100} \right)^4 \right] = 186322 \text{ Вт/м}^2.$$

Сравниваем q_4 с q_3 , проверяем условие $|q_4 - q_3| = |1653| > 1000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

Считаем q_5 :

$$q_5 = C_M \left[\left(\frac{t_{св.р} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{M_1} + 273 + \frac{q_4 S}{3 \lambda_{t_{M_1}}}}{100} \right)^4 \right] =$$

$$= 2,9 \cdot \left[\left(\frac{1280 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{500 + 273 + \frac{186322 \cdot 0,07}{3 \cdot 39,3}}{100} \right)^4 \right] = 186322 \text{ Вт/м}^2.$$

Сравниваем q_5 с q_4 , проверяем условие $|q_5 - q_4| = |0| < 1000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

$$q_n = q_5 = 186322 \text{ Вт/м}^2.$$

Температура поверхности металла в конце зоны

$$t_{n1} = t_{M1} + \frac{q_i S}{3 \cdot \lambda_{t_{M1}}} = 500 + \frac{186322 \cdot 0,07}{3 \cdot 39,3} = 610^\circ\text{C}.$$

Перепад температуры по сечению заготовки в конце методической зоны

$$\Delta t_1 = \frac{q_1 S}{2 \lambda_{t_{M1}}} = \frac{186322 \cdot 0,07}{3 \cdot 39,3} = 166^\circ\text{C}.$$

Температура оси заготовки в конце зоны

$$t_{y1} = t_{n1} - \Delta t_1 = 610 - 166 = 444^\circ\text{C}.$$

Средний тепловой поток в методической зоне, Вт/м²,

$$q'_{cp} = \sqrt{q_0 q_i} = \sqrt{76320 \cdot 186322} = 119246 \text{ Вт/м}^2.$$

Время нагрева металла в методической зоне, ч,

$$\tau_1 = \frac{\Delta i_1 S \rho t_{y1} \cdot 10^3}{q'_{cp} \cdot 3600} = \frac{294,62 \cdot 0,07 \cdot 7800 \cdot 10^3}{119249 \cdot 3600} = 0,374.$$

Время нагрева на участке сварочной зоны с монолитным подом, ч,

$$\tau_3 = \frac{L''_{CB} \cdot 2 S l \rho n}{G} = \frac{12 \cdot 0,07 \cdot 5 \cdot 7800 \cdot 1}{100000} = 0,334.$$

Температура поверхности металла при переходе на монолитный под, °C,

$$t_{n2} = t_{св.р} - \frac{t_{св.р} - T_H}{\Phi} = 1280 - \frac{1280 - 1250}{0,5} = 1220^\circ\text{C}.$$

Удельный тепловой поток в начале участка, Вт/м²,

$$q_2 = C_{CB} \left[\left(\frac{t_{св.р} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{n_2} + 273}{100} \right)^4 \right] =$$

$$= 2,9 \cdot \left[\left(\frac{1280 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{1220 + 273}{100} \right)^4 \right] = 23809 \text{ Вт} / \text{м}^2.$$

Перепад температур по сечению металла в начале участка

$$\Delta t_2 = \frac{q_2 S}{2 \lambda_{t_{n_2}}} = \frac{23809 \cdot 0,07}{2 \cdot 30} = 28^\circ \text{C}.$$

Средняя температура металла в начале участка

$$t_{cp2} = t_{n2} - \frac{2}{3} \Delta t_2 = 1220 - \frac{2}{3} \cdot 28 = 1202^\circ \text{C}.$$

Средний тепловой поток на участке сварочной зоны с двусторонним нагревом, Вт/м²,

$$q''_{cp} = \frac{q_i - q_2}{\lg \frac{q_i}{q_2}} = \frac{183322 - 23809}{\lg \frac{183322}{23809}} = 69353 \text{ Вт} / \text{м}^2.$$

Приращение теплосодержания на участке

$$\Delta i'_2 = i'_2 - \Delta i_1 = 823,96 - 294,62 = 529,34 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

Время нагрева на участке, ч,

$$\tau_2 = \frac{\Delta i'_2 S \rho_{t_{cp2}} \cdot 10^3}{q''_{cp} \cdot 3600} = \frac{529,34 \cdot 0,07 \cdot 7800 \cdot 10^3}{69353 \cdot 3600} = 1,154 \text{ ч}.$$

Общее время нагрева металла, ч,

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = 0,37 + 1,15 + 0,33 = 1,854.$$

Удельная продолжительность нагрева, мин/см,

$$z = \frac{60 \tau}{2S \cdot 100} = 0,3 \cdot \frac{1,85}{0,07} = 7,7 \text{ мин} / \text{см}.$$

Полученные результаты сводим в таблицу 4.8.

Таблица 4.8 – Результаты расчета

τ_1 , ч	$\eta_{общ}$	τ_3 , ч	z , $\frac{\text{мин}}{\text{см}}$	τ_2 , ч
0,37	0,619	0,33	7,7	1,15

5 Тепловой баланс печи и определение расхода топлива

Тепловой баланс печи выражается уравнением, связывающим статьи прихода и расхода тепла. По характеру теплового баланса все печи можно разделить на две группы [2]:

- печи с постоянным во времени тепловым режимом (методические печи);
- печи с переменным во времени тепловым режимом (печи для нагрева термически толстых заготовок).

5.1 Тепловой баланс печей непрерывного действия

Уравнение теплового баланса -

$$Q = Q_X + Q_B + Q_T + Q_{\text{экз}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + \Sigma Q_5 + Q_{OK}, \quad (5.1)$$

- где Q_X – химическое тепло, выделяющееся при сгорании топлива, кВт;
 Q_B – тепло, вносимое подогретым воздухом, кВт;
 Q_T – тепло, вносимое подогретым топливом, кВт;
 $Q_{\text{экз}}$ – тепло, выделяемое при окислении металла, кВт;
 Q_1 – тепло, пошедшее на нагрев металла, кВт;
 Q_2 – потери тепла с продуктами горения, уходящими из рабочего пространства печи, кВт;
 Q_3 – потери тепла от химической неполноты горения топлива, кВт;
 Q_4 – потери тепла от механического недожога топлива, кВт;
 $Q_{5\text{кл}}$ – потери тепла теплопроводностью через кладку, кВт;
 $Q_{5\text{охл}}$ – потери тепла с охлаждающей водой, кВт;
 Q_{5T} – потери тепла на нагрев перемещающихся частей печи и тары, кВт;
 Q_{OK} – потери тепла с окалиной, кВт;
 Q – суммарный расход тепла, кВт.

Статьи приходной части теплового баланса

Химическое тепло топлива $Q_X = BQ_H^P$,

- где Q_H^P – теплотворная способность топлива (см. расчёт горения топлива), кДж/м³;

B – часовой расход топлива, м³/с (искомая величина).

Тепло, вносимое подогретым воздухом: $Q_B = BL_{\partial}i_B$,

- где i_B – теплосодержание воздуха, соответствующее температуре перед входом в печь, кДж/м³ значение температуры подогрева воздуха t_B задаётся в исходных данных согласно формуле (1.2).

Тепло вносимое подогретым воздухом, $Q_T = Bi_G$,

где i_G – теплосодержание подогретого газа (см. формулу (1.2) расчёта горения топлива), кДж/м³.

Процесс окисления металла протекает с положительным тепловым эффектом, средняя величина которого составляет 5650 кДж окисленного железа.

Количество тепла, выделяемого при окислении железа, кВт,

$$Q_{\text{экз}} = \frac{5650G\delta}{100},$$

где G – производительность печи, кг/с;

δ – угар металла в процентах, составляет от 1 до 2% для термически тонких заготовок и от 2 до 5% – для термически толстых заготовок.

Статьи расходной части теплового баланса

Расход тепла на нагрев металла $Q_1 = E(i_K - i_0) \frac{100 - \delta}{100}$,

где i_K и i_0 – теплосодержание металла в конце и начале нагрева, соответственно при температуре T_H и t_0 - по графику зависимости $i=f(T)$ (табл. 4.2);

E – ёмкость печи, кг, по формуле (4.4).

Потери тепла с продуктами горения, уходящими из рабочего пространства печи, $Q_2 = BV_{\text{д.г}} i_{\text{yx}}$,

где i_{yx} – теплосодержание дымовых газов при средней температуре в сварочной зоне $i_{\text{ср.К}}$ формула 4.3;

$V_{\text{д.г}}$ – количество продуктов горения (см. расчёт горения топлива).

Потери тепла от химической неполноты горения топлива рассчитываются при проектировании печей безокислительного нагрева. В этом случае необходимо знать содержание H_2 и CO в продуктах горения, $Q_3 = B(127CO + 108H_2)$. В обычных пламенных печах этот расчёт опускается.

Потери тепла от механического недожога топлива учитываются при использовании твёрдого топлива, для газообразного и жидкого этот расчёт пропускается,

$$Q_4 = 0,01ABQ_H^P,$$

где A – содержание золы в топливе, %.

Потери тепла через кладку при стационарном состоянии (после разогрева и установившегося режима её работы)

$$Q_5 = \frac{t_{\text{кл}}^{\text{ср}} - t_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha}} F_{\text{кл}},$$

где $t_{кл}^{cp}$ – средняя температура кладки по зонам, $t_{кл}^{cp} = T_H$;

t_0 – температура окружающей среды, °C;

δ_1 и δ_2 – соответственно толщина внутреннего и внешнего слоя теплоизоляции, мм определяется по табл. 5.1;

λ_1 и λ_2 – коэффициент теплопроводности внутреннего и внешнего слоёв соответственно, определяемый при средней температуре t_1^{cp} и t_2^{cp} , $\frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$;

α – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности кладки в окружающую среду, принимается: $\alpha = 20 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$;

$F_{кл}$ – площадь поверхности кладки, м²;

$$t_1^{cp} = \frac{t_{кл}^{cp} + t_0}{2}; \quad t_2^{cp} = \frac{t_1^{cp} + t_0}{2}.$$

Значения коэффициентов теплопроводности λ_1 и λ_2 в зависимости от материала и температуры приведены в таблице 5.2.

Потери тепла с охлаждающей водой имеют наибольшее значение в методических печах, обладающих развитой системой водного охлаждения глиссажных труб, поперечных опор, отбойников и пр.: $Q_{5охл} = KF\Delta t_{cp} 10^{-3}$,

где F – поверхность охлаждаемых элементов печи, м²;

Δt_{cp} – средний температурный напор между газами и водой, °C;

K – коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к воде, $\frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$, $K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha'} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha''}}$, если глиссажные трубы теплоизолированы, то соотношением $\frac{1}{\alpha''}$ пренебрегаем;

S – толщина слоя изоляции, м;

λ – коэффициент теплопроводности материала изоляции при рабочей температуре t^P , $\frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$, (по табл. 5.2), $t^P = T_H$.

$$\alpha' = \frac{C_{Г.К.М} \left[\left(\frac{t_{Г} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{СТ} + 273}{100} \right)^4 \right]}{t_{Г} - t_{СТ}},$$

где $C_{Г.К.М}$ – приведенный коэффициент излучения, $\frac{Вт}{м^2 \cdot K^4}$;

$t_{Г}$ – средняя температура газов в рабочем пространстве печи, можно принять $t_{Г} = T_H$, °C;

Таблица 5.1 - Толщина огнеупорной и теплоизоляционной кладки печи

Элементы кладки	Температура, °C	Внутренний слой		Слой теплоизоляции	
		Толщина кладки, мм	Материал	Толщина, мм	Материал
Стены высотой 1м	До 1200	120	Шамот класса В	250	Трепеловый или диато - миовый кирпич
То же, более 1м До 1м Более 1м	1200 Выше 1200 1200	250 230 230-350	То же Класса Б Класса А	250 120-250 120-250	То же То же То же
Своды печей с пролётом до 1м	До 1000	120	Класса Б	120-150	Изоляцион- ная засыпка
То же, до 3,5м Более 3,5м	1000 1000	230 300	То же То же	150-200 150-200	То же То же
Своды печей с пролётом до 1м	1000-2000	120	Класса А	120-150	Изоляцион- ная засыпка
То же, до 3,5м Более 3,5м	1000-1200 1000-1200	230 300	То же То же	150-200 150-200	То же То же
То же, до 1м более 3,5м	Выше 1200 Выше 1200	230 300	То же Динас или шамот класса А	120-150 150-200	То же То же
То же, более 3,5м	Выше 1200	300	То же	150-200	То же

Таблица 5.2 - Коэффициенты теплопроводности огнеупорных и теплоизоляционных материалов

Материал	Коэффициент теплопроводности, $\frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$
Магнезит	$\lambda = 6,15 + 0,00267t$
Динас	$\lambda = 0,81 + 0,000755t$
Шамот	$\lambda = 0,7 + 0,00064t$
Красный кирпич	$\lambda = 0,46 + 0,00051t$
Пористый шамот	$\lambda = 0,12 + 0,00012t$

t_{CT} – температура стенки трубы, $t_{CT} = t'_{охл} + 50^\circ C$, $t'_{охл} = 20...30^\circ C$.

Потери тепла в опорных трубах, $^\circ C$, $\Delta t_{cp} = t_{\Gamma} - \frac{t'_{охл} + t''_{охл}}{2}$,

где $t'_{охл}$ и $t''_{охл}$ – температура воды для охлаждения на входе и выходе, $t''_{охл} = 50...60^{\circ}\text{C}$.

При расчёте потерь в глиссажных трубах

$$\Delta t_{cp} = \frac{(t_{CB.P} - t'_{охл}) - (t_{cp.K} - t''_{охл})}{\lg \frac{t_{CB.P} - t'_{охл}}{t_{cp.K} - t''_{охл}}},$$

где $t_{CB.P}$ – температура газов в сварочной зоне (см. раздел 4), $^{\circ}\text{C}$;

$t_{cp.K}$ – температура уходящих газов, $^{\circ}\text{C}$, формула (4.3).

Потери тепла на нагрев перемещающихся частей печи или тары (конвейеры, вагонетки и т.д.), если они предусматриваются конструкцией печи,

$$Q_{5T} = G_T (i_2 - i_1),$$

где G_T – вес тары или перемещающихся частей в единицу времени, кг/с;

i_2 и i_1 – соответственно теплосодержание этих частей в конце и в начале печи, определяется по их температуре, кДж/кг (см. табл. 4.2).

$$\sum Q_5 = 1,1(Q_{5кл} + Q_{5охл} + Q_{5T}),$$

где 1,1 – коэффициент, характеризующий неучтённые потери.

Потери тепла с окалиной, $Q_{OK} = 0,01\delta G C_{OK} (t_{OK} - t_0)m$,

где δ – угар металла, %;

G – производительность печи, кг/с;

C_{OK} – теплоёмкость окалины, принимаем $1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$;

m – количество окалины Fe_3O_4 , образующейся от окисления 1кг Fe, из стехиометрического соотношения реакции $3\text{Fe} + 2\text{O}_2 = \text{Fe}_3\text{O}_4$

$$m = 1,38;$$

$$t_{OK} = T_H, ^{\circ}\text{C};$$

t_0 – начальная температура заготовок, $^{\circ}\text{C}$.

Подставляя в уравнение (5.1) статьи прихода и расхода тепла, можно вычислить расход топлива B ,

$$B = \frac{Q_1 + \sum Q_5 + Q_{OK} - Q_{экз}}{Q_H^P (1 - 0,01A) + L_{\partial} i_B + i_{\Gamma} - V_{\partial.2} i_{yx} - 127CO + 108H_2 - 0,01AQ_H^P}.$$

Часовой расход условного топлива (с теплотой сгорания $29,4 \cdot 10^3$ кДж/кг), $\text{м}^3/\text{с}$,

$$B_y = \frac{B Q_H^P}{29,4 \cdot 10^3}.$$

К показателям топливоиспользования относится коэффициент полезного

$$\text{действия печи: } \eta = \frac{\frac{100 - \delta}{100} G \Delta i - Q_{экз} + Q_{OK}}{B Q_H^P},$$

где G – производительность печи, кг/с;

Δi – изменение теплосодержания металла в печи от начальной температуры t_0 и температуры нагрева T_H , °C,

$$\Delta i = i_{T_H} - i_{t_0}.$$

5.2 Тепловой баланс печей периодического действия

Тепловой баланс камерной печи составляется на весь период нагрева и выдержки [2]. Уравнение теплового баланса аналогично уравнению (5.1) за исключением потерь тепла с охлаждающей водой $Q_{5охл}$.

Приходные статьи теплового баланса

Химическое тепло, выделяющееся при сгорании топлива, кДж,

$$Q_{хим} = Q_H^P B \tau_{общ},$$

где Q_H^P берётся из расчёта горения топлива;

B – расход газа, м³/с, неизвестная искомая величина;

$\tau_{общ}$ – общее время нагрева, с, $\tau_{общ} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4$.

Физическое тепло воздуха, кДж, $Q_{физ} = L_D i_B B \tau_{общ}$,

где L_D – действительный расход воздуха (см. расчёт горения топлива);

i_B – теплосодержание воздуха при t_B (см. исходные данные).

Тепло, вносимое подогретым топливом, рассчитывается в случае подогрева топлива, кДж, $Q_T = B i_{\Gamma} \tau_{общ}$,

i_{Γ} – теплосодержание подогретого газа при температуре подогрева t_{Γ} , задаётся в исходных данных, кДж/м³.

Количество тепла, выделяющегося при окислении железа, кДж,

$$Q_{экз} = \frac{5650 E \delta}{100},$$

где E – ёмкость печи (садка металла), кг;

5650 – тепловой эффект при окислении железа, кДж;

δ – угар, %, принимается от 3 до 6%.

Расходные статьи теплового баланса

Расход тепла на нагрев металла, $Q_1 = E(i_{T_H} - i_{t_0})$,

где i_{T_H} – теплосодержание металла при T_H , определяется по зависимости

$i = f(T)$ согласно таблице 4.2, кДж/кг;

i_{t_0} – теплосодержание металла при начальной температуре нагрева.

Тепло, аккумулированное кладкой, кДж.

Принимаем футеровку печи двухслойной, состоящей из шамота и динаса,

толщина определяется по таблице 5.1. $Q_{ак} = \sum M_{кл.i} C_{кл.i} (t_{кл.к.i}^{cp} - t_{кл.н.i}^{cp})$,

где $M_{кл.i}$ – масса i-го слоя футеровки, кг, $M_{кл} = F_{кл} \delta_{кл} \rho_{кл}$;

$C_{кл.i}$ – средняя удельная теплоёмкость i-го слоя футеровки, $\frac{Дж}{кг \cdot ^\circ C}$;

$t_{кл.к.i}^{cp}$ и $t_{кл.н.i}^{cp}$ – средние по толщине конечная и начальная температуры i-го слоя футеровки в конце и начале цикла соответственно.

Футеровка внутренней стены печи из огнеупорного материала, кг,

$$M_{вн.ст} = (F_{б.с} + F_{Т.С}) \delta_{вн} \rho_{вн},$$

где $\delta_{вн}$ – толщина внутреннего слоя футеровки (см. табл. 5.1), м;

$\rho_{вн}$ – плотность огнеупорного материала (табл. 5.3), кг/м³;

$F_{б.с}$ и $F_{Т.С}$ – площади поверхности боковой и торцевой стены, м².

Футеровка свода из огнеупора, кг, $M_{вн.св} = F_{СВ} \delta_{вн} \rho_{вн}$;

Футеровка пода из огнеупора, кг, $M_{вн.п} = F_{п} \delta_{вн} \rho_{вн}$;

Общая масса огнеупорной кладки, кг, $M_{вн} = M_{вн.ст} + M_{вн.св} + M_{вн.п}$.

Футеровка стен теплоизоляционного слоя, кг,

$$M_{т.ст} = (F_{б.с} + F_{Т.С}) \delta_{т} \rho_{т},$$

где $\delta_{т}$ – толщина теплоизоляционного слоя (см. табл. 5.1), м;

$\rho_{т}$ – плотность теплоизоляционного слоя (см. табл. 5.3), кг/м³.

Футеровка свода из теплоизоляционного слоя, кг,

$$M_{т.св} = F_{СВ} \delta_{т} \rho_{т}.$$

Общая масса кладки из теплоизоляционного слоя, кг,

$$M_{т} = M_{т.ст} + M_{т.св}.$$

Максимальная температура огнеупорной кладки равна температуре нагрева T_H . Температура наружной поверхности теплоизоляционной кладки равна t_0 . Температура на границе огнеупорного и теплоизоляционного слоя,

$$^\circ C, \quad t_{сл} = \frac{T_H + t_0}{2}.$$

Средняя по толщине огнеупорного слоя температура в конце цикла нагрева, $^\circ C$, $t_{ОГ.кон}^{cp} = \frac{T_H + t_{сл}}{2}$.

Температура слоя в начале нагрева $t_{ОГ.н}^{cp} = t_0 = t_{Т.н}^{cp}$.

Средняя теплоёмкость материалов футеровки определяется по таблице 5.3

Средняя температура теплоизоляционного слоя $t_{Т.к}^{cp} = \frac{t_0 + t_{сл}}{2}$.

Тепло, аккумулированное кладкой, кДж,

$$Q_{ak} = M_{вн} C_{вн} (t_{ОГ.кон}^{cp} - t_{ОГ.н}^{cp}) + M_{Т} C_{Т} (t_{Т.к}^{cp} - t_{Т.н}^{cp}),$$

где $C_{вн}$ и $C_{Т}$ – теплоёмкость внутреннего (огнеупорного) и теплоизоляционного материалов слоя футеровки, по таблице 5.3.

Таблица 5.3 - Теплофизические свойства теплоизоляционных материалов

Материал	Плотность, кг/м ³	Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)	Истинная теплоёмкость $C_{ист}$, кДж/(кг·°С)	Средняя теплоёмкость C_0 , кДж/(кг·°С)
Динас	1980	$1,046 + 0,93 \frac{t}{1000}$	$0,699 + 1,67 \frac{t}{1000} - 1,54 \left(\frac{t}{1000} \right)^2 + 0,473 \left(\frac{t}{1000} \right)^3$	$0,699 + 0,837 \frac{t}{1000} - 0,54 \left(\frac{t}{1000} \right)^2 + 0,1181 \left(\frac{t}{1000} \right)^3$
Шамот	1860	$0,7 + 0,64 \frac{t}{1000}$	$0,808 + 0,628 \frac{t}{1000}$	$0,808 + 0,314 \frac{t}{1000}$
Магнетит	2700	$4,31 - 0,512 \frac{t}{1000}$	$1,017 + 0,335 \frac{t}{1000}$	$\frac{19,26}{t} + 1,006 + 0,167 \frac{t}{1000}$
Хромомагнетит	2870	1,98	$0,712 + 0,774 \frac{t}{1000}$	$0,712 + 0,389 \frac{t}{1000}$
Высокоглинозем	-	-	$0,964 + 0,18 \frac{t}{1000}$	$\frac{7,12}{t} + 0,964 + 0,1947 \frac{t}{1000}$
Красный кирпич	1600	$0,466 + 0,512 \frac{t}{1000}$	По формуле для шамота	По формуле для шамота
Шамотный легковес	1250	$0,312 + 0,477 \frac{t}{1000}$	То же	То же
Пенношамотный кирпич	800	$0,312 + 0,195 \frac{t}{1000}$	» »	» »

$$\text{Потери теплоты кладкой печи, кДж, } Q_{кл} = \frac{F_{кл}(t_{кл} - t_0)\tau_j}{\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha}}, \quad (5.2)$$

где $F_{кл}$ – площадь кладки, м²;

$t_{кл}$ – температура кладки в определённый период работы печи, °С;

t_0 – температура окружающей среды, °С;

λ_i – средняя теплопроводность кладки, $\frac{Вт}{м \cdot К}$;

α – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности кладки к окружающей среде, принимается $16 \dots 20 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$;

τ_j – время нагрева в каждом периоде, с.

Расчёт потерь теплоты кладкой печи ведётся в соответствии с графиком нагрева и выдержки металла в печи для первых четырёх периодов, когда работали газовые горелки.

Первый период

Средняя температура внутренней кладки

$$t_{кл.вн}^{cp} = \frac{t_{кл0} + t_{кл1}}{2},$$

где $t_{кл0}$ – начальная температура кладки (см. расчёт нагрева металла);

$t_{кл1}$ – температура кладки в конце периода.

Температура на границе огнеупорного и теплоизоляционного слоёв

$$t_{сл} = \frac{t_{кл.вн}^{cp} + t_0}{2}.$$

Средняя температура огнеупорного слоя $t_{кл.ОГ} = \frac{t_{кл.вн}^{cp} + t_{сл}}{2}$.

Средняя теплопроводность огнеупорного материала $\lambda_{ОГ}$, $\frac{Вт}{м \cdot К}$ определяется по таблице 5.3 при $t_{кл.ОГ}$.

Средняя температура теплоизоляционного слоя $t_{кл.Т} = \frac{t_0 + t_{сл}}{2}$.

По таблице 5.3 определяем среднюю теплопроводность теплоизоляционного слоя λ_T при $t_{кл.Т}$.

Подставляя полученные значения в формулу (5.2), определяем потери тепла кладкой.

Второй период

Температура кладки принимается равной температуре кладки в конце первого периода: $t_{кл.вн} = t_{кл1}$ (по расчёту нагрева металла). Температура на

границе огнеупорного и теплоизоляционного слоя $t_{сл} = \frac{t_{кл.вн} + t_0}{2}$.

Средняя температура огнеупорного слоя $t_{кл.ОГ} = \frac{t_{кл.вн} + t_{сл}}{2}$.

Средняя теплопроводность огнеупорного материала $\lambda_{ОГ}$, $\frac{Вт}{м \cdot К}$, определяется по таблице 5.3 при $t_{кл.ОГ}$.

Средняя температура теплоизоляционного слоя $t_{кл.T} = \frac{t_0 + t_{сл}}{2}$.

По таблице 5.3 определяем среднюю теплопроводность теплоизоляционного слоя λ_T при $t_{кл.T}$.

Подставляя полученные значения в формулу 5.2 определяем потери тепла кладкой.

Третий период

Средняя температура внутренней кладки определяется аналогично

первым двум периодам $t_{кл.вн}^{cp} = \frac{t_{кл.вн} + t_{кл3}}{2}$,

где $t_{кл.вн} = t_{кл2}$ – температура кладки в начале периода;

$t_{кл3}$ – температура кладки в конце периода.

Температура на границе огнеупорного и теплоизоляционного слоёв

$$t_{сл} = \frac{t_{кл.вн}^{cp} + t_0}{2}.$$

Средняя температура огнеупорного слоя $t_{кл.ОГ} = \frac{t_{кл.вн}^{cp} + t_{сл}}{2}$.

Средняя теплопроводность огнеупорного материала $\lambda_{ОГ}$, $\frac{Вт}{м \cdot К}$, определяется по таблице 5.3 при $t_{кл.ОГ}$.

Средняя температура теплоизоляционного слоя $t_{кл.T} = \frac{t_0 + t_{сл}}{2}$.

По таблице 5.3 определяем среднюю теплопроводность теплоизоляционного слоя λ_T при $t_{кл.T}$. После чего, зная время нагрева на третьем периоде и переменные, определённые выше, определяем потери теплоты на третьем периоде через кладку.

Четвёртый период

Повторяя расчеты, приведенные в 1, 2 и 3-м периодах определяем потери теплоты на четвёртом периоде через кладку, причём $t_{кл.вн}^{cp} = T_H$.

Общие потери тепла кладкой $Q_{кл} = Q_{кл1} + Q_{кл2} + Q_{кл3} + Q_{кл4}$.

Неучтённые потери можно принять равными 5% от потерь теплоты кладкой в окружающее пространство, кДж: $Q_{неучт} = 0,05Q_{кл}$.

Потери тепла с уходящими дымовыми газами, кДж, $Q_{ух} = V_{д.г} i_{д} B \tau_{общ}$,

где $V_{д.г}$ – объём продуктов сгорания (определяется по расчёту горения топлива);

$i_{д}$ – теплосодержание дыма при средней температуре уходящих газов

$t_{ср.ух}$;

$\tau_{общ}$ – общее время нагрева, с.

Средняя температура уходящих газов

$$t_{cp.ух} = \frac{t_{Г1}\tau_1 + t_{Г2}\tau_2 + t_{Г3}\tau_3 + t_{Г4}\tau_4}{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4}.$$

Уравнения теплового баланса: $Q_{прих} = Q_{расх}$,

$$Q_{хим} + Q_{физ.в} = Q_M + Q_{ак} + Q_{кл} + Q_{неучт} + Q_{ух}.$$

Из уравнения теплового баланса определяем необходимый расход топлива B .

Выполняется проверка правильности расчета теплового баланса на основании равенства левой и правой частей уравнения теплового баланса. Проверка производится подстановкой в уравнение теплового баланса вместо B его числового значения. Погрешность расчета не должна превышать 1%.

Термический коэффициент полезного действия печи, %,

$$\eta_t = \frac{Q_M}{Q_{хим}} \cdot 100\%.$$

$$\text{Расход тепла на 1кг металла, кДж/кг, } b = \frac{Q_{прих}}{E},$$

где E – ёмкость печи, кг.

Примечания: 1 Термический КПД камерной печи не должен быть меньше 15...20%. При получении меньшего КПД необходимо проверить правильность всех статей прихода и расхода теплового баланса печи.

2 Расход тепла на 1кг металла не должен превышать 4000 кДж/кг, иначе необходимо провести расчётов нагрева металла и теплового баланса печи.

5.3 Пример расчёта теплового баланса методической печи

Потери тепла теплопроводностью через кладку.

Температура внутренней поверхности кладки определяется по формуле [2]:
для сварочной зоны -

$$t_M = \frac{t_{n1} + t_{n.к}}{2} = \frac{618 + 1250}{2} = 934^\circ\text{C};$$

$$t_{Г} = 1310^\circ\text{C}; \quad \varphi_{K.M} = 0,602; \quad \varepsilon_{Г} = 0,3;$$

$$\Phi = \frac{1}{1 + \frac{0,602 \cdot 0,8 \cdot (1 - 0,3)}{0,3 \cdot [1 + 0,602 \cdot (1 - 0,3) \cdot (1 - 0,8)]}} = 0,794;$$

$$Q_1 = \sqrt[4]{0,494 \cdot (1 - 0,762^4) + 0,762^4} = 0,91; \quad Q_2 = \frac{934 + 273}{1310 + 273} = 0,762;$$

$$T_{кл} = 0,91(1310 + 273) = 1442\text{K}; \quad t_{кл} = 1169^\circ\text{C}.$$

для методической зоны -

$$t_H = \frac{t_H + t_{n1}}{2} = \frac{0 + 618}{2} = 309^\circ\text{C};$$

$$t_\Gamma = \frac{t_{yx} + t_{cu.p}}{2} = \frac{1000 + 1310}{2} = 1155^\circ\text{C};$$

$$\varphi_{K.M} = 0,67; \quad \varepsilon_\Gamma = 0,31;$$

$$\Phi = \frac{1}{1 + \frac{0,67 \cdot 0,8 \cdot (1 - 0,31)}{0,31 \cdot [1 + 0,67 \cdot (1 - 0,31) \cdot (1 - 0,8)]}} = 0,48;$$

$$Q_2 = \frac{309 + 273}{1155 + 273} = 0,407; \quad Q = \sqrt[4]{0,48 \cdot (1 - 0,407^4) + 0,407^4} = 0,841;$$

$$T_{кл} = 0,841(1155 + 273) = 1200\text{K}; \quad t_{кл} = 927^\circ\text{C}.$$

Тепловые потери в сварочной зоне рассчитываются в следующем порядке. Поверхность свода

$$F_{CB} = B(L'_{CB} + L''_{CB} + 1,5) = 5,6 \cdot (15,9 + 6 + 1,5) = 132\text{м}^2.$$

Определяем в первом приближении средние температуры слоёв кладки.

$$\text{температура на границе слоёв } t' = \frac{t_{кл} + t_B}{2} = \frac{1169 + 20}{2} = 594^\circ\text{C};$$

$$\text{средняя температура слоя динаса } t_\partial = \frac{t_{кл} + t'}{2} = \frac{1169 + 594}{2} = 881^\circ\text{C};$$

$$\text{средняя температура слоя изоляции } t_{из} = \frac{t' + t_B}{2} = \frac{594 + 20}{2} = 307^\circ\text{C};$$

коэффициент теплопроводности динаса

$$\lambda_\partial = 0,81 + 0,00075t_\partial = 0,81 + 0,00075 \cdot 881 = 1,47 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}};$$

коэффициент теплопроводности изоляции

$$\lambda_{из} = 0,23 + 0,00023t_{из} = 0,23 + 0,00023 \cdot 307 = 0,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

$$\text{Определяем потери тепла, } Q_5 = \frac{(1169 - 20) \cdot 132}{\frac{0,3}{1,47} + \frac{0,15}{0,3} + 0,05} = 195000 \text{Вт}.$$

Проверяем правильность принятых средних температур слоёв кладки:

$$t_\partial = t_{кл} - \frac{Q_5}{2F_{CB}} \frac{S_\partial}{\lambda_\partial} = 1169 - \frac{195000}{2 \cdot 132} \cdot \frac{0,3}{1,47} = 1012^\circ\text{C};$$

$$t_{из} = t_{кл} - \frac{Q_5}{2F_{CB}} \left(\frac{2S_\partial}{\lambda_\partial} + \frac{S_{из}}{\lambda_{из}} \right) = 1169 - \frac{195000}{2 \cdot 132} \cdot \left(\frac{2 \cdot 0,3}{1,47} + \frac{0,15}{0,3} \right) = 487^\circ\text{C}.$$

Так как проверка показывает расхождение с принятыми температурами, производим перерасчёт. Принимаем $t_\partial = 1010^\circ\text{C}$ и $t_{из} = 490^\circ\text{C}$. Тогда

$$\lambda_{\partial} = 0,81 + 0,00075t_{\partial} = 0,81 + 0,00075 \cdot 1010 = 1,57 \frac{Bm}{m \cdot ^{\circ}C};$$

$$\lambda_{uz} = 0,23 + 0,00023t_{uz} = 0,23 + 0,00023 \cdot 490 = 0,340 \frac{Bm}{m \cdot ^{\circ}C};$$

$$Q_5 = \frac{(1169 - 20) \cdot 132}{\frac{0,3}{1,57} + \frac{0,15}{0,340} + 0,05} = 220000 Bm.$$

Поверхность стен (без окон)

$$F_{CT} = [4L'_{CB} + 2(L''_{CB} + 1,5)]h_{CB} - F_{OK} = [4 \cdot 15,9 + 2 \cdot (6 + 1,5)] \cdot 2 - 7,37 = 162,2 m^2.$$

Принимаем те же средние температуры кладки: $t_{и} = 1010^{\circ}C$ и

$$t_{из} = 490^{\circ}C. \text{ Тогда } \lambda_{и} = 0,7 + 0,00075 \cdot 1010 = 1,47 \frac{Bm}{m \cdot ^{\circ}C};$$

$$\lambda_{из} = 0,340 \frac{Bm}{m \cdot ^{\circ}C};$$

$$Q_5 = \frac{(1169 - 20) \cdot 162,2}{\frac{0,35}{1,47} + \frac{0,12}{0,340} + 0,05} = 290000 Bm.$$

$$\text{Проверяем: } t_{и} = 1169 - \frac{290000}{2 \cdot 162,2} \cdot \frac{0,35}{1,47} = 956^{\circ}C;$$

$$t_{из} = 1169 - \frac{290000}{2 \cdot 162,2} \cdot \left(\frac{2 \cdot 0,35}{1,47} + \frac{0,12}{0,340} \right) = 429^{\circ}C.$$

Так как полученные результаты близки к принятым, пересчёт можно не производить.

Суммарные потери тепла через кладку в сварочной зоне

$$Q_{5кл}^{CB} = 1,2 \cdot (220000 + 290000) = 613000 Bm.$$

Коэффициент 1,2 принимается для покрытия неучтённых потерь через под и металлическую гарнитуру печи.

Расчёт тепловых потерь в методической зоне производится аналогично. В результате расчёта получаем: потери тепла через свод – 43200 Вт, через стены – 48000 Вт.

Общие потери тепла через кладку в методической зоне

$$Q_{5кл}^{MET} = 1,2 \cdot (43200 + 48000) = 110000 Bm.$$

Общие потери тепла через кладку печи

$$Q_{5кл} = Q_{5кл}^{CB} + Q_{5кл}^{MET} = 613000 + 110000 = 723000 Bm.$$

Потери тепла через окна печи. Определяем потери теплопроводностью в сварочной зоне через закрытые окна.

Принимаем, что все боковые окна сварочной зоны закрыты кладкой из

шамота в один кирпич (230мм). Тогда

$$Q_5 = \frac{t_{кл} - t_в}{\frac{S}{\lambda} + 0,05} F;$$

$$F = 28 \cdot 0,35 \cdot 0,465 = 4,55 \text{ м}^2;$$

$$t_{ш} = \frac{t_{кл} + t_в}{2} = \frac{1169 + 20}{2} = 594^\circ \text{C};$$

$$\lambda_{ш} = 0,7 + 0,00075 \cdot 594 = 1,15 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ \text{C}};$$

$$Q_5 = \frac{(1169 - 20)}{\frac{0,23}{1,15} + 0,05} \cdot 4,55 = 20800 \text{ Вт}.$$

В методической зоне:

$$F = 6 \cdot 0,35 \cdot 0,465 = 0,98 \text{ м}^2;$$

$$t_{ш} = \frac{927 + 20}{2} = 473^\circ \text{C};$$

$$\lambda_{ш} = 0,7 + 0,00075 \cdot 473 = 1,05 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ \text{C}};$$

$$Q_5 = \frac{(927 - 20)}{\frac{0,23}{1,05} + 0,05} \cdot 0,98 = 3300 \text{ Вт}.$$

Потери излучением в сварочной зоне через открытые окна определяем по формуле, приведенной ниже. Потери излучением происходят через окно выдачи. Площадь окна $F = 5,6 \cdot 0,5 = 2,8 \text{ м}^2$. Толщина лобовой стенки 690мм. Коэффициент диафрагмирования $\Phi = 0,62$. Тогда

$$Q_{5изл} = 5,75 \cdot \left(\frac{1310 + 273}{100} \right)^4 \cdot 2,8 \cdot 0,62 = 610000 \text{ Вт}.$$

В методической зоне потери происходят через окна посадки. При

$$F = 2,8 \text{ м}^2, \Phi = 0,62, t_{\Gamma} = 1155^\circ \text{C}$$

$$Q_{5изл} = 5,75 \cdot \left(\frac{1155 + 273}{100} \right)^4 \cdot 2,8 \cdot 0,62 = 408000 \text{ Вт}.$$

Общие потери тепла через окна:

$$Q_5 = 20800 + 3300 + 610000 + 408000 = 1042000 \text{ Вт}.$$

Потери тепла с охлаждающей водой. Основным источником потерь тепла с охлаждающей водой в методической печи являются продольные и поперечные подовые трубы.

Устанавливаем в печи четыре продольных трубы диаметром 76мм и 20 сдвоенных опорных труб такого же диаметра на расстоянии 1200мм друг от друга.

Потери тепла рассчитываем на неизолированные трубы

$$Q_{5охл} = q_{охл} F_{TP}.$$

В сварочной зоне: $q_{охл}^{CB} = 176000 \frac{Bm}{m^2}$;

$$F_{TP}^{CB} = \pi d (Bz_1 + 4L'_{CB}); \quad d=0,076m,$$

где $B=5,6m$ – ширина печи; $z_1=28$ – число опорных труб в сварочной зоне; $L'_{CB} = 15,9m$.

После подстановки: $F_{TP}^{CB} = 3,14 \cdot 0,076 \cdot (5,6 \cdot 28 + 4 \cdot 15,9) = 53,7m^2$;

$$Q_{5охл} = 176000 \cdot 53,7 = 9,46 \cdot 10^6 Bm.$$

В методической зоне: $q_{охл}^{MET} = 162000 \frac{Bm}{m^2}$;

$$F_{TP}^{MET} = \pi d (Bz_2 + 4L_{MET}); \quad z_1 = 12, \quad L_{MET} = 7,3m;$$

$$F_{TP}^{MET} = 3,14 \cdot 0,076 \cdot (5,6 \cdot 12 + 4 \cdot 7,3) = 22m^2;$$

$$Q_{5охл} = 162000 \cdot 22 = 3,57 \cdot 10^6 Bm.$$

Общие потери тепла с охлаждающей водой

$$Q_{5охл} = 1,1 \cdot (9,46 \cdot 10^6 + 3,57 \cdot 10^6) = 14,3 \cdot 10^6 Bm.$$

Коэффициент 1,1 учитывает потери тепла в остальных водоохлаждаемых элементах печи (отбойниках, крышках и др.).

Общие потери тепла в рабочем пространстве печи

$$\sum Q_5 = 1,1(Q_{5кл} + Q_{5охл} + Q_{5T}) = 1,1 \cdot (0,723 + 1,042 + 14,3) \cdot 10^6 = 17,6 \cdot 10^6 Bm.$$

Коэффициент 1,1 принимается в связи с неполным учётом всех потерь тепла (выбывание, фильтрация и пр.).

Расход тепла на нагрев металла. Общее количество тепла, усвоенное

металлом, $Q_1 = \frac{100 - \delta}{100} G \Delta i \frac{10^6}{3600} Bm.$

Угар металла принимаем равным 1,5%. Тогда после подстановки

$$Q_1 = \frac{100 - 1,5}{100} \cdot 100000 \cdot 0,86 \cdot \frac{10^6}{3600} = 23,5 \cdot 10^6 Bm.$$

Тепло, выделенное от окисления железа,

$$Q_1 = \frac{5,65 G \delta}{100} \frac{10^6}{3600} = \frac{5,65 \cdot 100000 \cdot 1,5}{100} = 2,35 \cdot 10^6 Bm.$$

Потери тепла с окалиной

$$Q_{OK} = 0,01 \delta G C_{OK} (t_{OK} - t_0) m = 0,01 \cdot 100000 \cdot 0,001 \cdot (1250 - 0) \cdot 1,38 = 0,52 \cdot 10^6 Bm.$$

Тепло, усвоенное металлом от окисления железа,

$$Q_{усвFe} = Q_{экз} - Q = 2,35 \cdot 10^6 - 0,52 \cdot 10^6 = 1,83 \cdot 10^6 \text{ Вт.}$$

Тепло, усвоенное металлом от горения топлива,

$$Q_{усв.топл} = Q_1 - Q_{усвFe} = 23,5 \cdot 10^6 - 1,83 \cdot 10^6 = 21,67 \cdot 10^6 \text{ Вт.}$$

Тепловые мощности и расход топлива

Полезная тепловая мощность

$$M_{пол} = \frac{Q_{усв.топл}}{\eta_{общ}} = \frac{21,67 \cdot 10^6}{0,590} = 36,7 \cdot 10^6 \text{ Вт.}$$

Мощность холостого хода

$$M_{х.х} = \frac{\sum Q_5}{\eta_{общ}} = \frac{17,6 \cdot 10^6}{0,590} = 29,8 \cdot 10^6 \text{ Вт.}$$

Общая тепловая мощность

$$M_{общ} = M_{пол} + M_{х.х} = 36,7 \cdot 10^6 + 29,8 \cdot 10^6 = 66,5 \cdot 10^6 \text{ Вт.}$$

Часовой расход топлива

$$B = \frac{M_{общ} \cdot 3600}{Q_H^P \cdot 10^6} = \frac{66,5 \cdot 10^6 \cdot 3600}{10 \cdot 10^6} = 24000 \text{ м}^3 / \text{ч.}$$

Удельный расход тепла

$$b = \frac{M_{общ} \cdot 3600}{G \cdot 10^6} = \frac{66,5 \cdot 10^6 \cdot 3600}{100000 \cdot 10^6} = 2,4 \text{ МДж / кг.}$$

Удельный расход условного топлива $b_{усл} = \frac{b \cdot 100}{29,4} = \frac{2,4 \cdot 100}{29,4} = 8,15\%$.

Коэффициент полезного действия печи

$$\eta = \frac{Q_{усв.топл} \cdot 100}{M_{общ}} = \frac{21,67 \cdot 10^6 \cdot 100}{66,5 \cdot 10^6} = 32,6\%.$$

5.4 Пример расчёта теплового баланса камерной печи с выкатным подом

Приходные статьи теплового баланса

Химическое тепло топлива, КДж, $Q_{хим} = Q_H^P B \tau_{общ}$,

где Q_H^P берётся из расчёта горения топлива;

B – расход газа, м³/с, неизвестная искомая величина;

$\tau_{общ}$ – общее время нагрева, с.

$$\tau_{общ} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 = 54898 + 3130 + 11988 + 4522 = 74538.$$

$$Q_{хим} = 8894,3 \text{ В} \cdot 74538 = 662963333 \text{ В}.$$

Физическое тепло воздуха, кДж,

$$Q_{\text{физ}} = L_{\text{д}} i_B V \tau_{\text{общ}} = 1,5 \cdot 328,8 \text{В} \cdot 74538 = 36762141 \text{В},$$

где $L_{\text{д}} = 1,5 \text{м}^3 / \text{м}^3$ – действительный расход воздуха (см. расчёт горения топлива);

$i_B = 328,8 \text{кДж} / \text{м}^3$ – теплосодержание воздуха при t_B (см. исходные данные).

Расходные статьи теплового баланса

Расход тепла на нагрев металла

$$Q_1 = E(i_{T_H} - i_{t_0}) = 68632,16 \cdot (588,3 - 20) = 39003656,$$

где i_{T_H} – теплосодержание металла при $T_H = 850^\circ\text{C}$, определяется по зависимости $i=f(T)$ согласно таблице 4.2, $i_{T_H} = 588,3 \text{кДж} / \text{кг}$;

i_{t_0} – теплосодержание металла при 15°C , $i_{t_0} = 20 \text{кДж} / \text{кг}$;

$E = 68632,16$ – масса металла в печи, кг.

Тепло аккумулированное кладкой

Принимаем футеровку печи двухслойной, состоящей из шамота толщиной 230мм и диатомитового кирпича толщиной 230мм.

$$Q_{\text{ак}} = \sum M_{\text{кл.}i} C_{\text{кл.}i} (t_{\text{кл.к.}i}^{\text{ср}} - t_{\text{кл.н.}i}^{\text{ср}}),$$

где $M_{\text{кл.}i}$ – масса i -го слоя футеровки, кг,

$$M_{\text{кл}} = F_{\text{кл}} \delta_{\text{кл}} \rho_{\text{кл}};$$

$C_{\text{кл.}i}$ – средняя удельная теплоёмкость i -го слоя футеровки, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$;

$t_{\text{кл.к.}i}^{\text{ср}}$ и $t_{\text{кл.н.}i}^{\text{ср}}$ – средние по толщине конечная и начальная температуры i -го слоя футеровки в конце и начале цикла соответственно.

Массы слоёв футеровки

Футеровка внутренней стены печи из огнеупорного материала, кг,

$$M_{\text{вн.ст}} = (F_{\text{б.с}} + F_{\text{Т.С}}) \delta_{\text{вн}} \rho_{\text{вн}} = (28 + 17,64) \cdot 0,23 \cdot 1900 = 19945.$$

Футеровка свода из огнеупора, кг,

$$M_{\text{вн.св}} = F_{\text{СВ}} \delta_{\text{вн}} \rho_{\text{вн}} = 63 \cdot 0,23 \cdot 1900 = 27531.$$

Футеровка пода из огнеупора, кг,

$$M_{\text{вн.п}} = F_{\text{п}} \delta_{\text{вн}} \rho_{\text{вн}} = 63 \cdot 0,58 \cdot 1900 = 69426.$$

Общая масса огнеупорной кладки, кг,

$$M_{\text{вн}} = M_{\text{вн.ст}} + M_{\text{вн.св}} + M_{\text{вн.п}} = 19945 + 27531 + 69426 = 116902.$$

Футеровка стен теплоизоляционного слоя, кг,

$$M_{\text{т.ст}} = (F_{\text{б.с}} + F_{\text{Т.С}}) \delta_{\text{т}} \rho_{\text{т}} = (28 + 17,64) \cdot 0,23 \cdot 600 = 4918,$$

где $\delta_{\text{т}}$ – толщина теплоизоляционного слоя (табл. 5.1), м;

$\rho_{\text{т}} = 600$ – плотность теплоизоляционного слоя (табл. 5.3), $\text{кг} / \text{м}^3$.

Футеровка свода из теплоизоляционного слоя, кг,

$$M_{\text{т.св}} = F_{\text{СВ}} \delta_{\text{т}} \rho_{\text{т}} = 63 \cdot 0,23 \cdot 600 = 8694.$$

Общая масса кладки из теплоизоляционного слоя, кг,

$$M_m = M_{m.cm} + M_{m.cv} = 4918 + 8694 = 13612.$$

Максимальная температура огнеупорной кладки равна температуре нагрева $T_H = 850^\circ\text{C}$. Температура наружной поверхности теплоизоляционной кладки равна: $t_0 = 25^\circ\text{C}$. Температура на границе огнеупорного и теплоизоляционного слоя, $^\circ\text{C}$,

$$t_{cl} = \frac{850 + 25}{2} = 437,5.$$

Средняя по толщине огнеупорного слоя температура в конце цикла нагрева, $^\circ\text{C}$,

$$t_{OG.кон}^{cp} = \frac{850 + 437,5}{2} = 644.$$

Температура слоя в начале нагрева $t_{OG.H}^{cp} = 20^\circ\text{C}$.

Средняя теплоёмкость материалов футеровки определяется по таблице 5.3:

$$C_{вн} = 0,8 + 0,000315 \cdot 644 = 1002.$$

Средняя температура теплоизоляционного слоя

$$t_{T.K}^{cp} = \frac{t_0 + t_{cl}}{2} = \frac{20 + 437,5}{2} = 229.$$
$$C_T = 600.$$

Тепло, аккумулированное кладкой, кДж,

$$Q_{ak} = M_{вн} C_{вн} (t_{OG.кон}^{cp} - t_{OG.H}^{cp}) + M_T C_T (t_{T.K}^{cp} - t_{T.H}^{cp}) =$$
$$= 116902 \cdot 1002 \cdot (644 - 20) + 13612 \cdot 600 \cdot (229 - 20) = 74799686.$$

Потери теплоты кладкой печи, кДж, $Q_{кл} = \frac{F_{кл}(t_{кл} - t_0)\tau_i}{\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha}}$,

где $F_{кл}$ – площадь кладки, м^2 ;

$t_{кл}$ – температура кладки в определённый период работы печи, $^\circ\text{C}$;

t_0 – температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$;

λ_i – средняя теплопроводность кладки, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$;

α – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности кладки к окружающей среде, принимается $16 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$;

τ_i – время нагрева на каждом периоде, с.

Расчёт потерь теплоты кладкой печи производится в соответствии с графиком нагрева и выдержки металла в печи для первых четырёх периодов, когда работают газовые горелки.

Первый период

Средняя температура внутренней кладки

$$t_{кл.вн}^{cp} = \frac{t_{кл0} + t_{кл1}}{2} = \frac{249 + 663}{2} = 456,$$

где $t_{кл0} = 249^{\circ}C$ – начальная температура кладки (см. расчёт нагрева металла);

$t_{кл1} = 663^{\circ}C$ – температура кладки в конце периода.

Температура на границе огнеупорного и теплоизоляционного слоёв

$$t_{сл} = \frac{t_{кл.вн}^{cp} + t_0}{2} = \frac{456 + 25}{2} = 240.$$

Средняя температура огнеупорного слоя

$$t_{кл.ОГ} = \frac{t_{кл.вн}^{cp} + t_{сл}}{2} = \frac{456 + 240}{2} = 348.$$

Средняя теплопроводность огнеупорного материала, $\frac{Вт}{м \cdot K}$

$$\lambda_{ОГ} = 1,04 + 0,000151 t_{кл.ОГ} = 1,04 + 0,000151 \cdot 348 = 1,09.$$

Средняя температура теплоизоляционного слоя

$$t_{кл.Т} = \frac{t_0 + t_{сл}}{2} = \frac{25 + 240}{2} = 132.$$

Средняя теплопроводность теплоизоляционного слоя

$$\lambda_T = 0,16 + 0,000315 t_{кл.Т} = 0,16 + 0,000315 \cdot 132 = 0,2.$$

Подставляя полученные значения в формулу (5.2) определяем потери тепла кладкой,

$$Q_{кл1} = \frac{171,64 \cdot (456 - 25) \cdot 54898}{\frac{0,23}{1,09} + \frac{0,23}{0,2} + \frac{1}{16}} = 3226528 r_{ДД}.$$

Второй период

Температура кладки принимается равной температуре кладки в конце первого периода $t_{кл.вн} = t_{кл1} = 663^{\circ}C$ (по расчёту нагрева металла).

Температура на границе огнеупорного и теплоизоляционного слоя

$$t_{сл} = \frac{t_{кл.вн} + t_0}{2} = \frac{663 + 25}{2} = 344.$$

Средняя температура огнеупорного слоя

$$t_{кл.ОГ} = \frac{t_{кл.вн} + t_{сл}}{2} = \frac{663 + 344}{2} = 504.$$

Средняя теплопроводность огнеупорного материала, $\frac{Вт}{м \cdot K}$,

$$\lambda_{ОГ} = 1,04 + 0,000151 \cdot 504 = 1,116.$$

Средняя температура теплоизоляционного слоя

$$t_{кл.Т} = \frac{t_0 + t_{сл}}{2} = \frac{25 + 344}{2} = 185.$$

Средняя теплопроводность теплоизоляционного слоя, $\frac{Вт}{м \cdot К}$,

$$\lambda_T = 0,16 + 0,000315 \cdot 185 = 0,218.$$

Подставляя полученные значения в формулу (5.2) определяем потери тепла кладкой,

$$Q_{кл2} = \frac{171.64 \cdot (663 - 25) \cdot 54898}{\frac{0,23}{1,116} + \frac{0,23}{0,218} + \frac{1}{16}} = 256260 \text{ кДж}.$$

Третий период

Средняя температура внутренней кладки определяется аналогично

первым двум периодам, $t_{сл} = \frac{t_{кл.вн}^{cp} + t_{кл3}}{2} = \frac{663 + 905}{2} = 784,$

где $t_{кл.вн} = t_{кл2} = 663^{\circ}C$ – температура кладки в начале периода;

$t_{кл3} = 905^{\circ}C$ – температура кладки в конце периода.

Температура на границе огнеупорного и теплоизоляционного слоёв

$$t_{сл} = \frac{t_{кл.вн}^{cp} + t_0}{2} = \frac{784 + 25}{2} = 400.$$

Средняя температура огнеупорного слоя

$$t_{кл.ОГ} = \frac{t_{кл.вн}^{cp} + t_{сл}}{2} = \frac{784 + 400}{2} = 592.$$

Средняя теплопроводность огнеупорного материала, $\frac{Вт}{м \cdot К}$,

$$\lambda_{ОГ} = 1,4 + 0,000151 \cdot 592 = 1,129.$$

Средняя температура теплоизоляционного слоя

$$t_{кл.T} = \frac{t_0 + t_{сл}}{2} = \frac{25 + 400}{2} = 213.$$

Средняя теплопроводность теплоизоляционного слоя, $\frac{Вт}{м \cdot К}$,

$$\lambda_T = 0,16 + 0,000315 \cdot 213 = 0,227.$$

Зная время нагрева на третьем периоде $\tau = 11988 \text{ с}$ и переменные, определённые выше, определяем потери теплоты на третьем периоде через

кладку, $Q_{кл3} = \frac{171.64 \cdot (784 - 25) \cdot 11988}{\frac{0,23}{1,129} + \frac{0,23}{0,227} + \frac{1}{16}} = 1220105 \text{ кДж}.$

Четвёртый период

Повторяя расчеты, приведенные в 1, 2 и 3-м периодах определяем потери

теплоты на четвёртом периоде через кладку, причём $t_{кл.вн}^{cp} = T_H = 850^{\circ}C$.

Температура на границе огнеупорного и теплоизоляционного слоя

$$t_{cl} = \frac{850 + 25}{2} = 438.$$

Средняя температура огнеупорного слоя $t_{кл.ОГ} = \frac{850 + 438}{2} = 644.$

Средняя теплопроводность огнеупорного материала, $\frac{Вт}{м \cdot К},$

$$\lambda_{ог} = 1,04 + 0,000151 \cdot 644 = 1,137.$$

Средняя температура теплоизоляционного слоя $t_{кл.Т} = \frac{438 + 25}{2} = 232.$

Средняя теплопроводность теплоизоляционного слоя, $\frac{Вт}{м \cdot К},$

$$\lambda_T = 0,16 + 0,000315 \cdot 232 = 0,233.$$

Подставляя полученные значения в формулу (5.2), определяем потери тепла кладкой ($\tau = 4522с$),

$$Q_{кл4} = \frac{171,64 \cdot (850 - 25) \cdot 4522}{\frac{0,23}{1,137} + \frac{0,23}{0,233} + \frac{1}{16}} = 511444 \text{ кДж}.$$

Общие потери тепла кладкой, кДж,

$$Q_{кл} = Q_{кл1} + Q_{кл2} + Q_{кл3} + Q_{кл4} = 3226528 + 256260 + 1220105 + 511444 = 5214337.$$

Неучтённые потери можно принять равными 5% от потерь теплоты кладкой в окружающее пространство, кДж. $Q_{неучт} = 0,05 \cdot 5214337 = 260717.$

Потери тепла с уходящими дымовыми газами, кДж, $Q_{yx} = V_{д.г} i_{д} B \tau_{общ},$

где $V_{д.г}$ – объём продуктов сгорания (определяется по расчёту горения топлива);

$i_{д}$ – теплосодержание дыма при средней температуре уходящих газов $t_{сп.ух};$

$\tau_{общ}$ – общее время нагрева, с.

Средняя температура уходящих газов

$$t_{сп.ух} = \frac{t_{Г1}\tau_1 + t_{Г2}\tau_2 + t_{Г3}\tau_3 + t_{Г4}\tau_4}{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4} =$$

$$\frac{335 \cdot 54898 + 700 \cdot 3130 + 935 \cdot 11988 + 850 \cdot 4522}{74538} = 475^{\circ}C.$$

$$Q_{yx} = 2,867 \cdot 727B \cdot 74538 = 159045282B,$$

$$i_{д} = 727 \text{ кДж} / \text{м}^3 \text{ при температуре } 475^{\circ}C.$$

Уравнение теплового баланса: $Q_{прих} = Q_{расх},$

$$Q_{хим} + Q_{физ.в} = Q_M + Q_{ак} + Q_{кл} + Q_{неучт} + Q_{ух} =$$

$$= 662963333B + 36762141B = 39003656 + 5214337 +$$

$$+ 260717 + 159045282B.$$

Из уравнения теплового баланса определяем необходимый расход топлива В, м³/с: $B = \frac{119378396}{540680192} = 0,22 = 792 \text{ м}^3 / \text{ч}.$

Проверка правильности расчета производится подстановкой вместо В числового значения $B=0,22 \text{ м}^3/\text{с}:$

$$662963333 \cdot 0,22 + 36762141 \cdot 0,22 =$$

$$39003656 + 74799686 + 5214337 + 260717 + 159045282 \cdot 0,22$$

$$153939604 = 154368457$$

Погрешность расчета, %,

$$\Delta = \frac{154368457 - 153939604}{154368457} \cdot 100\% = 0,3\% \leq 1\%.$$

Термический коэффициент полезного действия печи, %,

$$\eta_t = \frac{Q_M}{Q_{хим}} \cdot 100\% = \frac{39003656 \cdot 100}{662963333} = 26,7\%.$$

Расход тепла на 1 кг металла, кДж/кг,

$$b = \frac{Q_{прих}}{E} = \frac{153939604}{68632,16} = 2240,$$

где E – ёмкость печи, кг.

6 Выбор устройств для сжигания топлива

В металлургических печах для сжигания газообразного топлива используют горелки, а для сжигания жидкого топлива – форсунки. Конструкции горелок и форсунок нормированы [4].

Тип топливосжигающих устройств зависит от вида топлива, типа печи и давления топлива. При небольших размерах рабочего пространства печи (камерные печи с выкатным подом и неподвижным подом) используют короткопламенные горелки и форсунки. В методических печах применяют длиннопламенные горелки.

Для газа с высоким давлением используют инжекционные горелки (рис.6.1) высокого давления В, низкого давления Н и для сжигания подогретых газов П (могут работать и для сжигания на подогретом воздухе). Для любой горелки её номер численно равен диаметру носика, выраженному в миллиметрах (таблицы 6.1 – 6.2).

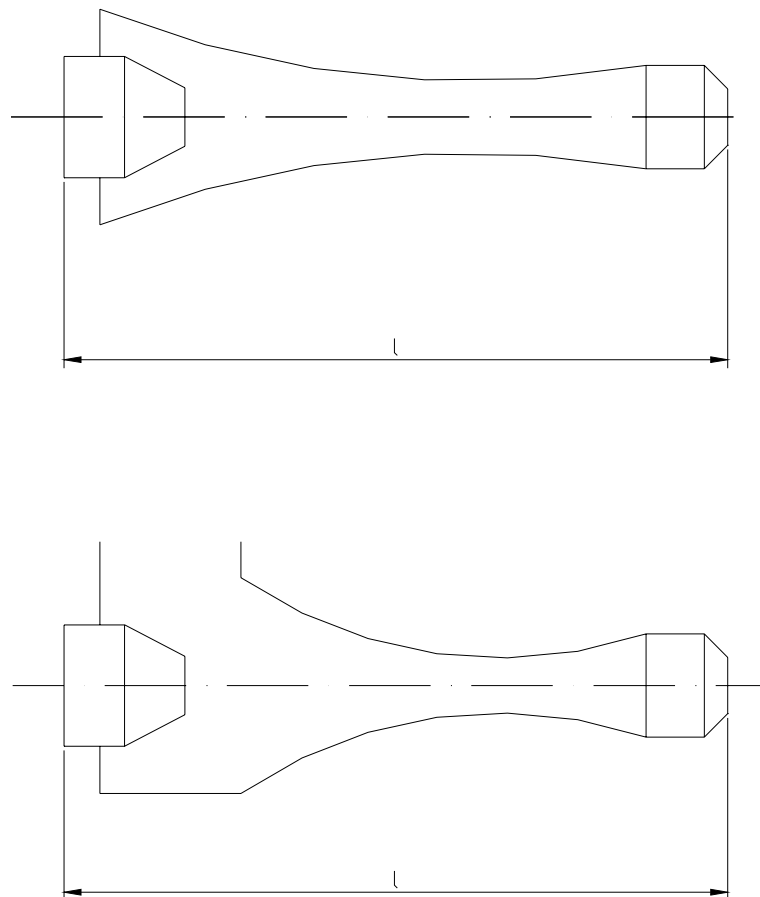


Рисунок 6.1 – Инжекционные горелки

Таблица 6.1 - Производительность горелок В и Н, м³/ч

Тип и номер горелки	Теплота сгорания газа, МДж/м³				Тип и номер горелки	Теплота сгорания газа, МДж/м³				
	35	30	27	17		3,8	5	6,3	7,3	8,8
B15	0,5	0,6	0,7	2	H15	14	10	7	5	4
B18	0,7	0,9	1,1	3	H18	19	13	10	8	6
B21	0,9	1,2	1,3	4	H21	27	19	14	11	7
B24	1,2	1,6	2	5	H24	32	22	18	14	11
B28	1,7	2	3	6	H28	45	33	24	18	15
B32	2	3	4	8	H32	64	41	31	24	18
B37	3	4	5	11	H37	81	57	42	31	25
B42	4	5	6	13	H42	105	75	55	40	33
B48	5	6	7	17	H48	136	98	68	52	40
B56	7	9	10	24	H56	185	130	95	70	56
B65	9	12	14	32	H65	245	174	130	95	75
B75	12	15	18	44	H75	335	225	180	125	100
B86	18	20	25	56	H86	445	300	220	175	130
B100	22	28	34	76	H100	580	430	300	225	180
B116	29	38	44	103	H116	750	575	415	320	235
B134	38	49	60	134	H134	1070	750	530	400	310
B154	50	65	78	178	H154	1430	1000	750	530	420
B178	65	85	104	240	H178	1900	1300	950	750	580
B205	90	116	128	320	H205	2500	1715	1270	1000	770
B235	118	146	180	590	H235	3400	2300	1700	1300	1000

Таблица 6.2 - Производительность горелок В и Н, м³/ч

Тип и номер горелки	Теплота сгорания газа, кДж/м³									
	5850	6690	7520	8360	3760	4180	5430	5850	6270	6690
П65	113	92	73	66	277	230	169	145	134	112
П75	166	128	105	85	362	307	226	197	171	147
П85	212	184	130	108	480	414	288	257	245	215
П100	302	250	187	161	659	562	399	344	328	294
П116	408	326	254	208	896	782	550	486	425	368
П134	555	437	353	280	1200	1010	755	653	583	516
П154	725	564	445	363	1590	1330	960	845	757	664
П178	952	762	630	506	2030	1820	1250	1125	1000	885
П205	1245	1005	805	645	2650	2130	1660	1440	1260	1130
П235	1580	1270	1010	830	3480	2930	2090	1880	1680	1450
П270	2110	1700	1320	1080	4542	3860	2780	2480	2210	1900

6.1 Пример расчёта короткопламенной горелки

Исходные данные для расчёта:

тип топлива – коксо доменный газ;

теплота сгорания газа $Q_H^P = 12500$ кДж/м³;

расход топлива $B = 360$ м³/ч;

температура подогрева воздуха $t_B = 300^\circ\text{C}$;

температура подогретого газа $t_r = 200^\circ\text{C}$;

тип печи – камерная с неподвижным подом;

длина печи $L = 3150$ мм.

В камерных печах чаще всего используют короткопламенные горелки с предварительным перемешиванием газа с воздухом или с частичным предварительным перемешиванием газа с воздухом (тип ГНП). Так как горелки ГНП предназначены для сжигания природного газа, то выбираем инжекционную горелку. В зависимости от теплоты сгорания газа выбираем горелку типа В высокого давления ($P = 20$ кПа).

Размещаем горелки на двух боковых сторонах печи с расстоянием между осями горелок $l = 1,0 \dots 1,3$ м. Тогда число горелок на одной стороне

$$n_1 = \frac{L - 2\delta}{l} + 1 = \frac{3150 - 2 \cdot 600}{1200} + 1 = 2,6 = 3,$$

где δ – расстояние от торца печи до горелки, $\delta = 500 \dots 600$ мм.

Общее число горелок в печи $n = 2n_1 = 2 \cdot 3 = 6$.

Производительность горелки по газу, м³/ч, $B_r = \frac{B}{n} = \frac{360}{6} = 60$.

Этой производительности и теплоте сгорания газа $Q_H^P = 12500$ кДж/м³ соответствует горелка типа В 100 (табл. 6.1), производительность которой равна 76 м³/ч. Диаметр носика горелки $d_{HT} = 100$ мм.

6.2 Пример расчёта длиннопламенной горелки

Исходные данные для расчёта

тип топлива – природный газ;

теплота сгорания газа $Q_H^P = 3537,7 \text{ КДж/м}^3$;

расход топлива $B = 700 \text{ м}^3/\text{ч}$;

температура подогрева воздуха $t_B = 350^\circ\text{C}$;

тип печи – методическая толкательная с тремя зонами отопления;

ширина печи $B_n = 4 \text{ м}$;

расход воздуха $L_\partial = 9,8 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

В методических печах для равномерного нагрева заготовок используют длиннопламенные горелки типа «труба в трубе». Выбираем этот тип горелок. Конструктивно определим число горелок в печи.

Количество горелок по ширине печи в одной зоне

$$n_1 = \frac{B_n - 2\delta}{l} + 1 = \frac{4600 - 2 \cdot 600}{1200} + 1 = 3.$$

Общее число горелок в печи $n = Z n_1 = 3 \cdot 3 = 9$,

где Z – число зон в печи.

Производительность горелок типа «труба в трубе» задаётся по воздуху, поэтому определяется производительность одной горелки по воздуху, $\text{м}^3/\text{ч}$,

$$B_{\Gamma_B} = \frac{B L_\partial}{n} = \frac{700 \cdot 9,8}{9} = 751,5.$$

Так как воздух подогретый, то производительность горелки, $\text{м}^3/\text{ч}$,

$$B_{\Gamma_{B_t}} = B_{\Gamma_B} \sqrt{\frac{253 + t_B}{293}} = 751,5 \cdot \sqrt{\frac{253 + 350}{293}} = 1125.$$

Этому расходу и теплоте сгорания $Q_H^P = 3537,7 \text{ КДж/м}^3$ соответствует горелка П134, имеющая производительность $1200 \text{ м}^3/\text{ч}$. Давление воздуха, подаваемого в горелку, 10 кПа .

Диаметр носика горелки $d_{\text{НГ}} = 134 \text{ мм}$.

7 Расчёт рекуператора

Для кузнечных печей характерен низкий термический КПД ($20 \dots 40\%$) из-за слишком больших потерь теплоты с отработанными продуктами горения (дымовыми газами) [1].

Использование этой теплоты для предварительного подогрева воздуха, топлива или их смеси – эффективный способ экономии топлива. Для утилизации теплоты используют специальные теплообменные аппараты – регенераторы и рекуператоры, которые устанавливаются на пути движения продуктов сгорания. В нагревательных печах кузнечного производства

распространение получили теплообменные аппараты рекуперативного типа.

Рекуператоры – это аппараты непрерывного действия, в которых теплота от подвижного теплоносителя (печных газов) до нагреваемых компонентов смеси воздуха и топлива передаётся через стенку.

Тип рекуператора определяется в зависимости от объёма подогреваемого воздуха, его температуры, температуры уходящих газов.

Основная задача расчёта рекуператора – определение величины поверхности теплообмена и геометрических размеров рекуператора.

7.1 Расчёт трубчатого рекуператора

Эти рекуператоры изготавливают из цельнотянутых труб углеродистых и жаростойких сталей. Для размещения рекуператора под печью в дымоходах-боровах чаще используют рекуператоры из труб в виде петли (рис. 7.1).

Из уравнения теплопередачи $Q = K_{cp} F \Delta t_{cp}$

определяем общую поверхность нагрева, m^2 , $F = \frac{Q}{K_{cp} \Delta t_{cp}}$, (7.1)

где Q – количество тепла, передаваемое от дыма к воздуху, Вт;

Δt_{cp} – средний температурный напор, $^{\circ}C$;

K_{cp} – средний коэффициент теплопередачи в рекуператоре, $\frac{Вт}{м^2 \cdot ^{\circ}C}$.

Количество тепла, передаваемое от дымовых газов к воздуху, Вт,

$$Q = V_B (i_B'' - i_B'),$$

где V_B – расход воздуха, m^3/c ;

i_B'' – теплосодержание воздуха при температуре подогрева воздуха t_B'' (задаётся в исходных данных), определяется по таблице 1.4, $Дж/м^3$;

i_B' – теплосодержание воздуха при температуре подогрева воздуха t_B (задаётся в исходных данных), определяется по таблице 1.4, $Дж/м^3$.

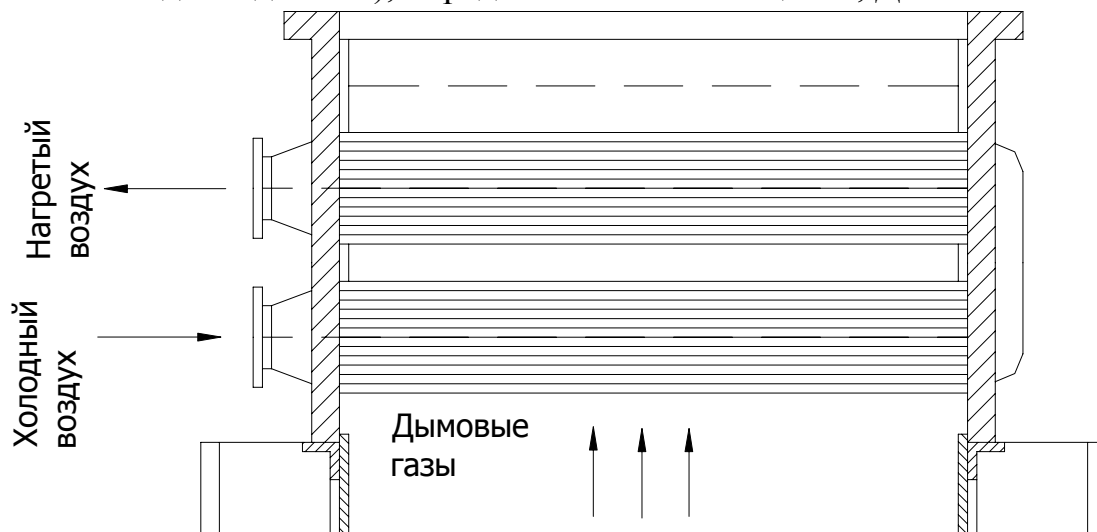


Рисунок 7.1 – Рекуператор из U-образных труб

При размещении над печью используют рекуператор, представленный на рисунке 7.2.

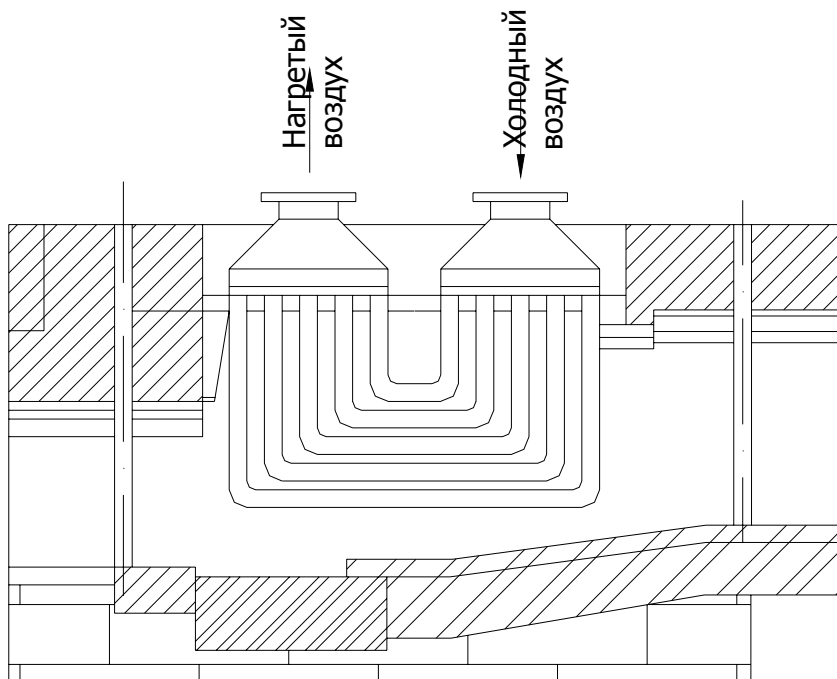


Рисунок 7.2 – Двухходовый трубчатый рекуператор

$$V_B = BL_\partial,$$

где B – расход топлива, м³/с (расчёт теплового баланса);
 L_∂ – расход воздуха, м³/м³ (расчёт горения топлива).

$$\text{Средний температурный напор } \Delta t_{cp} = \frac{(t'_\partial - t''_B) - (t''_\partial - t'_B)}{\ln \frac{t'_\partial - t''_B}{t''_\partial - t'_B}},$$

где t'_∂ – температура дымовых газов перед рекуператором (см. расчёт нагрева металла);

t''_∂ – температура дымовых газов после рекуператора, определяется по теплосодержанию дыма (см. табл. 1.4).

$$\text{Теплосодержание дыма, Дж/м}^3, i''_\partial = i'_\partial - \frac{Q}{V'_\partial},$$

где V'_∂ – количество дыма проходящего через рекуператор за 1сек, с учётом потерь дыма на выбивание и подсос воздуха, м³/с;

i'_∂ – теплосодержание дыма на входе в рекуператор, Дж/м³,

$$i'_\partial = \frac{i_\partial}{1 + \rho},$$

где i_∂ – теплосодержание дыма при $t_{cp.ух}$ (см. расчёт нагрева металла), определяется по таблице 1.4;

ρ – коэффициент, учитывающий подсос воздуха в боровых ($\rho = 0,1 \dots 0,15$).

$$V'_\partial = mBV_{\partial.2}(1 + \rho),$$

где m – коэффициент, учитывающий потери дыма, для трубчатых металлических рекуператоров $m=0,65 \dots 0,85$ [2];

$V_{\partial,г}$ – объём продуктов сгорания (дымовых газов) $\text{м}^3/\text{м}^3$, см. расчёт горения топлива.

Средний коэффициент теплопередачи в рекуператоре, $\frac{Bm}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$,

$$K_{cp} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\partial}} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_B}},$$

где α_{∂} – коэффициент теплоотдачи от дыма к стенке, $\frac{Bm}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$;

α_B – коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху или газу, $\frac{Bm}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$;

S – толщина стенки, м;

λ – коэффициент теплопроводности стенки, $\frac{Bm}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$.

$$\alpha_{\partial} = \alpha_{\partial}^{изл} + \alpha_{\partial}^{конв}; \quad \alpha_{\partial}^{изл} = \frac{q_{рек}}{t_{\Gamma} - t_{CT}},$$

где $q_{рек}$ – плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$,

$$q_{рек} = \frac{1}{2}(\varepsilon_{CT} + 1)C_0 \left[\varepsilon_{\Gamma}^{cp} \left(\frac{t_{\Gamma} + 273}{100} \right)^4 - \varepsilon_{\Gamma}^{CT} \left(\frac{t_{CT} + 273}{100} \right)^4 \right],$$

где ε_{CT} – степень черноты стенки, для стальных труб 0,8;

C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела,

$$C_0 = 5,77 \frac{Bm}{\text{м}^2 \cdot \text{K}^4};$$

$\varepsilon_{\Gamma}^{cp}$ – степень черноты газа при средней температуре дыма в дымоходе (t_{Γ});

$\varepsilon_{\Gamma}^{CT}$ – степень черноты газов при температуре стенки (t_{cm}).

$$t_{\Gamma} = \frac{t'_{\partial} + t''_{\partial}}{2},$$

$$t_{CT} = 0,5 \left(\frac{t'_{\partial} + t''_{\partial}}{2} + \frac{t'_B + t''_B}{2} \right).$$

По температурам t_{Γ} и t_{CT} определяем $\varepsilon_{\Gamma}^{cp}$ и $\varepsilon_{\Gamma}^{CT}$ (см. 3-й раздел).

$$\alpha_{\partial}^{конв} = (7,4 + 0,00924 t_{\Gamma}) \frac{\omega_{\partial}^{0,65}}{d_H^{0,35}},$$

где $\omega_0^{0,65}$ – скорость дыма в рекуператоре (1,5...5м/с);

d_H – наружный диаметр труб рекуператора, м.

Рекомендуемые диаметры:

1) $d_H = 60$ мм - толщина стенки $S=3,5$ мм;

2) $d_H = 76$ мм - толщина стенки $S=4,5$ мм.

Коэффициент теплоотдачи на воздушной стороне, $\frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$,

$$\alpha_B = (3,57 + 0,00174 t_B) \frac{\omega_B^{0,8}}{d_{BH}^{0,2}},$$

где t_B – средняя температура воздуха в трубе, $^\circ C$.;

ω_B – скорость движения воздуха в трубе (5...10м/с);

d_{BH} – внутренний диаметр труб, при толщине S , м.

$$t_B = \frac{t'_B + t''_B}{2},$$

$$d_{BH} = d_H - 2S.$$

Коэффициент теплопроводности стенки трубы λ определяется по таблице 4.1 (коэффициенты теплопроводности сталей) при температуре t_{CT} , в зависимости от марки материала труб.

После определения требуемой поверхности нагрева F устанавливают размеры рекуператора. Длина трубок l_{TP} равна высоте (ширине) дымохода. Количество трубок определяется в зависимости от общей поверхности нагрева F и площади поверхности одной трубы f , шт.:

$$n = \frac{F}{f}, \quad f = \pi d_H l_{TP}.$$

7.2 Расчёт игольчатого рекуператора

Последовательность расчёта игольчатого рекуператора идентична расчёту трубчатого рекуператора (расчёт сводится к определению потребной поверхности нагрева F). Исключение составляет определение среднего коэффициента теплопередачи K_{cp} . Схема игольчатого рекуператора представлена на рисунке 7.3.

Коэффициент теплопередачи для игольчатых рекуператоров подсчитывается по формуле (7.2). Тепловым сопротивлением $\frac{S}{\lambda}$ в этой формуле можно пренебречь.

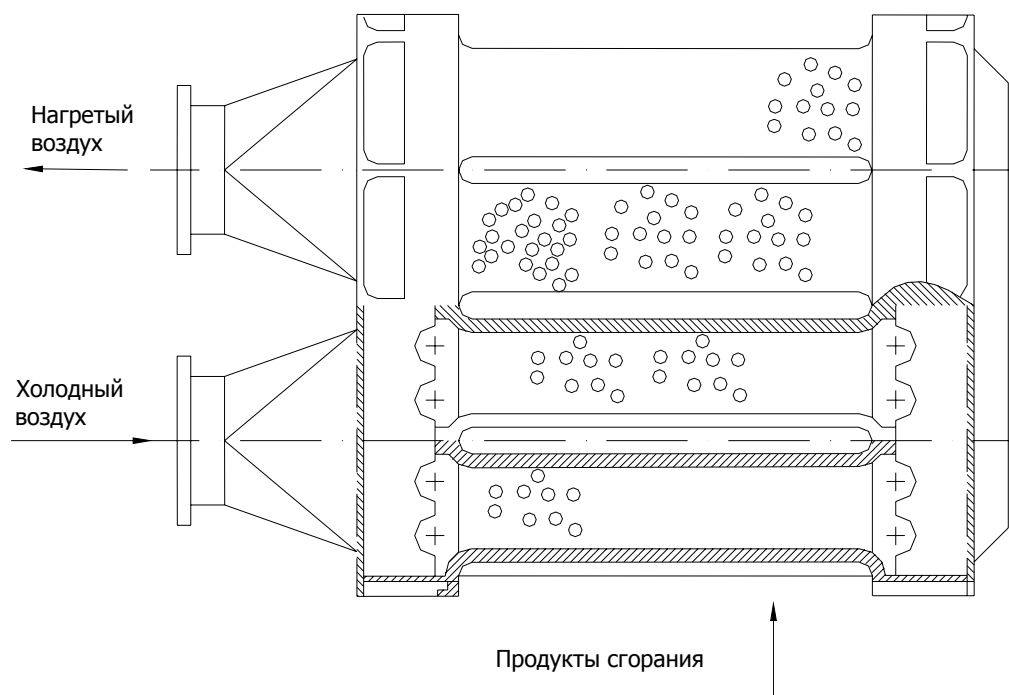


Рисунок 7.3 – Двухходовый игольчатый рекуператор

Коэффициенты теплоотдачи подсчитываются по следующим формулам,

$$\frac{Bm}{m^2 \cdot ^\circ C}:$$

$$\text{от дыма к стенке} - \alpha_{\partial} = BW_{\partial\partial}^n,$$

$$\text{от стенки к воздуху} - \alpha_B = B_1 W_{OB}^{n_1},$$

где B , B_1 , n , n_1 – коэффициенты, определяемые по таблице 7.1.

Таблица 7.1 - Значение коэффициентов B , B_1 , n , n_1

Тип рекуператора	Коэффициент			
	B	B_1	n	n_1
17,5	47,9	138	1,2	0,875
28	47,9	80	1,2	0,86
Без наружных игл	47,9	19,7	1,2	0,835

После определения требуемой поверхности нагрева F по формуле (7.1) выбирается по таблице 7.2 игольчатый рекуператор. Длина трубы рекуператора должна быть соизмерима с размерами дымохода. В таблице 7.2 указана условная поверхность одной трубы – при большей поверхности нагрева допускается применение нескольких труб.

Таблица 7.2 - Характеристика игольчатых труб

Длина трубы, мм	Условная поверхность для расчёта теплопередачи без учёта игл, м ²	Свободное сечение, м ²				Масса одной трубы, кг		
		Для прохода воздуха	Для прохода дыма			Тип 17,5	Тип 28	Односто- ронний иголь- чатый
			Тип 17,5	Тип 28	Односто- ронний иголь- чатый			
880	0,25	0,008	0,06	0,07	0,042	46	41	31
1135	0,33	0,008	0,08	0,092	0,055	57	52	39
1385	0,425	0,008	0,1	0,114	0,067	68	63	47
1640	0,5	0,008	0,12	0,136	0,08	80	76	55

7.3 Пример расчёта трубчатого рекуператора

Прежде всего рекомендуется выбрать тип рекуператора исходя из объёма подогреваемого воздуха, температур подогрева воздуха и дыма, удельной массы рекуператора.

В данном примере температура подогрева воздуха $t''_B = 250^\circ\text{C}$, температура воздуха на входе в рекуператор $t'_B = 20^\circ\text{C}$, температура дыма на входе в рекуператор $t'_d = t_{cp,yx} = 435^\circ\text{C}$, расход газа $V = 0,22 \text{ м}^3/\text{с}$, расход воздуха $L_d = 1,5 \text{ м}^3/\text{м}^3$, объём продуктов сгорания $V_d = 2,867 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

При температуре уходящих из печи газов меньше 300°C наиболее целесообразно использовать металлические рекуператоры. Наибольший срок службы имеют термоблочные рекуператоры, но они используются в малых печах, когда расход воздуха для подогрева меньше $0,08 \text{ м}^3/\text{с}$. Так как в рассматриваемом примере расход воздуха во много раз больше, то уместно использовать металлический трубчатый рекуператор. Наиболее простым является металлический прямотрубный рекуператор.

Основная цель расчёта рекуператора – определение величины поверхности теплообмена F и геометрических размеров рекуператора.

Общую поверхность м^2 , можно определить по формуле,

$$F = \frac{Q}{K_{cp} \Delta t_{cp}},$$

где Q – количество тепла, передаваемое от дыма воздуху, Вт;

Количество тепла, передаваемое от дымовых газов воздуху, Вт,

$$Q = V_B (i''_B - i'_B),$$

где V_B – расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$,

$$V_B = BL_d = 0,22 \cdot 1,5 = 0,33.$$

i''_B – теплосодержание воздуха при температуре подогрева воздуха $t''_B = 250^\circ\text{C}$, определяется по таблице 1.4, $i''_B = 328800 \text{ Дж}/\text{м}^3$;

i'_B – теплосодержание воздуха при температуре подогрева воздуха $t_B = 20^\circ\text{C}$, определяется по таблице 1.4, $i'_B = 26460 \text{ Дж}/\text{м}^3$;

$$Q = 0,33 \cdot (328800 - 26460) = 99772.$$

$$\text{Средний температурный напор } \Delta t_{cp} = \frac{(t'_d - t''_B) - (t''_d - t'_B)}{\ln \frac{t'_d - t''_B}{t''_d - t'_B}},$$

где t'_d – температура дымовых газов перед рекуператором (см. расчёт нагрева металла);

t''_d – температура дымовых газов после рекуператора, определяется по теплосодержанию дыма (см. табл. 1.4).

$$\text{Теплосодержание дыма, Дж/м}^3, i''_d = i'_d - \frac{Q}{V'_d},$$

где V'_d – количество дыма, проходящего через рекуператор за 1с, с учётом потерь дыма на выбивание из зазоров и подсос воздуха, м³/с;

i'_d – теплосодержание дыма на входе в рекуператор, Дж/м³,

$$i'_d = \frac{i_d}{1 + \rho},$$

где i_d – теплосодержание дыма при $t_{cp, yx}$ (см. расчёт нагрева металла), определяется по таблице 1.4;

ρ – коэффициент, учитывающий подсос воздуха в боровых ($\rho = 0,1 \dots 0,15$).

$$V'_d = mBV_{d,2}(1 + \rho) = 0,7 \cdot 0,22 \cdot 2,867 \cdot (1 + 0,1) = 0,485,$$

где m – коэффициент, учитывающий потери дыма, для трубчатых металлических рекуператоров $m = 0,65 \dots 0,85$ [2];

$V_{d,2}$ – объём продуктов сгорания (дымовых газов), см. расчёт горения топлива, м³/м³.

$$i'_d = \frac{i_d}{1 + \rho} = \frac{727000}{1 + 0,1} = 660999,$$

$$i''_d = 660999 - \frac{99772}{0,485} = 455288.$$

Этому теплосодержанию соответствует $t''_d = 310^\circ\text{C}$.

$$\text{Тогда } \Delta t_{cp} = \frac{(435 - 250) - (310 - 20)}{\ln \frac{435 - 250}{310 - 20}} = 234^\circ\text{C}.$$

Средний коэффициент теплопередачи в рекуператоре, $\frac{Bm}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$,

$$K_{cp} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_d} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_B}}, \quad (7.2)$$

где α_d – коэффициент теплоотдачи от дыма к стенке, $\frac{Bm}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$;

α_B – коэффициент теплоотдачи от стенки в воздуху или газу, $\frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$;

S – толщина стенки, м;

λ – коэффициент теплопроводности стенки, $\frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$;

$$\alpha_{\partial} = \alpha_{\partial}^{изл} + \alpha_{\partial}^{конв}; \quad \alpha_{\partial}^{изл} = \frac{q_{рек}}{t_{\Gamma} - t_{CT}},$$

где $q_{рек}$ – плотность теплового потока, Вт/м²,

$$q_{рек} = \frac{1}{2}(\varepsilon_{CT} + 1)C_0 \left[\varepsilon_{\Gamma}^{cp} \left(\frac{t_{\Gamma} + 273}{100} \right)^4 - \varepsilon_{\Gamma}^{CT} \left(\frac{t_{CT} + 273}{100} \right)^4 \right],$$

где ε_{CT} – степень черноты стенки, для стальных труб 0,8;

C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела,

$$C_0 = 5,77 \frac{Вт}{м^2 \cdot K^4};$$

$\varepsilon_{\Gamma}^{cp}$ – степень черноты газа при средней температуре дыма в дымоходе;

$\varepsilon_{\Gamma}^{CT}$ – степень черноты газов при температуре стенки.

$$\begin{aligned} t_{\Gamma} &= \frac{t'_{\partial} + t''_{\partial}}{2} + 273 = \frac{435 + 310}{2} + 273 = 646, \\ t_{CT} &= 0,5 \left(\frac{t'_{\partial} + t''_{\partial}}{2} + \frac{t'_B + t''_B}{2} \right) = \\ &= \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{435 + 310}{2} + \frac{20 + 250}{2} \right) + 273 = 532. \end{aligned}$$

По температурам t_{Γ} и t_{CT} определяем $\varepsilon_{\Gamma}^{cp}$ и $\varepsilon_{\Gamma}^{CT}$ (см. 3-й раздел).

$$\varepsilon_{\Gamma}^{cp} = 0,412.$$

$$q_{рек} = \frac{1}{2} \cdot (0,8 + 1) \cdot 5,77 \cdot \left[0,403 \cdot \left(\frac{646}{100} \right)^4 - 0,412 \cdot \left(\frac{532}{100} \right)^4 \right] = 787 \frac{Вт}{м^2};$$

$$\alpha_{\partial}^{изл} = \frac{787}{646 - 532} = 6,9 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}.$$

$$\alpha_{\partial}^{конв} = (7,4 + 0,00924 t_{\Gamma}) \frac{\omega_{\partial}^{0,65}}{d_H^{0,35}} =$$

$$= (7,4 + 0,00924 \cdot 373) \cdot \frac{4^{0,65}}{0,076^{0,35}} = 66,8.$$

где ω_{∂} – скорость дыма в рекуператоре (1,5...5м/с);

d_H – наружный диаметр труб рекуператора, м.

Рекомендуемые диаметры:

1) $d_H = 60$ мм - толщина стенки $S=3,5$ мм;

2) $d_H = 76$ мм - толщина стенки $S=4,5$ мм.

Выбираем $d_H = 76$ мм.

$$\alpha_{\partial} = 6,9 + 66,8 = 73,7.$$

Коэффициент теплоотдачи на воздушной стороне, $\frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$,

$$\alpha_B = (3,57 + 0,00174 t_B) \frac{\omega_B^{0,8}}{d_{вн}^{0,2}} = (3,57 + 0,00174 \cdot 135) \cdot \frac{10^{0,8}}{0,067^{0,2}} = 41,32,$$

где t_B – средняя температура воздуха в трубе, град.;

ω_B – скорость движения воздуха в трубе (5...10м/с);

$d_{вн}$ – внутренний диаметр труб, при толщине S , м.

$$t_{\partial} = \frac{t'_B + t''_B}{2} = \frac{20 + 250}{2} = 135.$$

$$d_{вн} = d_H - 2S = 76 - 2 \cdot 4,5 = 67 \text{ мм.}$$

$$K_{cp} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\partial}} + \frac{1}{\alpha_B}} = \frac{1}{\frac{1}{73,7} + \frac{1}{41,32}} = 26,45.$$

Коэффициент теплопроводности стенки трубы λ определяется по таблице 4.1 (коэффициенты теплопроводности сталей) при температуре t_{CT} , в зависимости от марки труб.

$$\text{Требуемая поверхность нагрева, м}^2 F = \frac{Q}{K_{cp} \Delta t_{cp}} = \frac{99772}{26,45 \cdot 234} = 16,12.$$

8 Расчёт дымового тракта

При работе печь заполнена продуктами горения. Движение газов в печах может быть естественное и принудительное. Первое обусловлено действием сил тяжести, возникающих с появлением разности температур в различных сферах печного агрегата; второе диктуется внешними причинами (воздействием факела, тяги дымовой трубы, дымососа и т.д.). Поэтому при проектировании металлургических печей необходимо выполнять расчёт дымового тракта и определять высоту дымовой трубы. Расчёт сводится к определению потерь давления газа на трение, местное сопротивление, преодоление геометрического напора.

8.1 Определение общих потерь давления

Суммарное проходное сечение вертикальных клапанов, м^2 ,

$$F_{\partial} = \frac{V_{\partial.г} m B}{\omega_{\partial.г}},$$

где m – коэффициент потерь дыма, $m=0,65 \dots 0,8$;

$\omega_{\partial.г}$ – средняя скорость дыма в канале ($1,5 \dots 3 \text{ м/с}$);

B – расход топлива, $\text{м}^3/\text{с}$ (см. тепловой баланс);

$V_{\partial.г}$ – объём дымовых газов, $\text{м}^3/\text{м}^3$ (см. расчёт горения топлива).

Наименьшее значение проходного сечения вертикального канала $f_{в.к}$ для кирпичной кладки $0,3 \text{ м}^2$.

Перед расчётом этого пункта необходимо заэскизировать схему дымового тракта с определёнными размерами участков (рисунок 8.1).

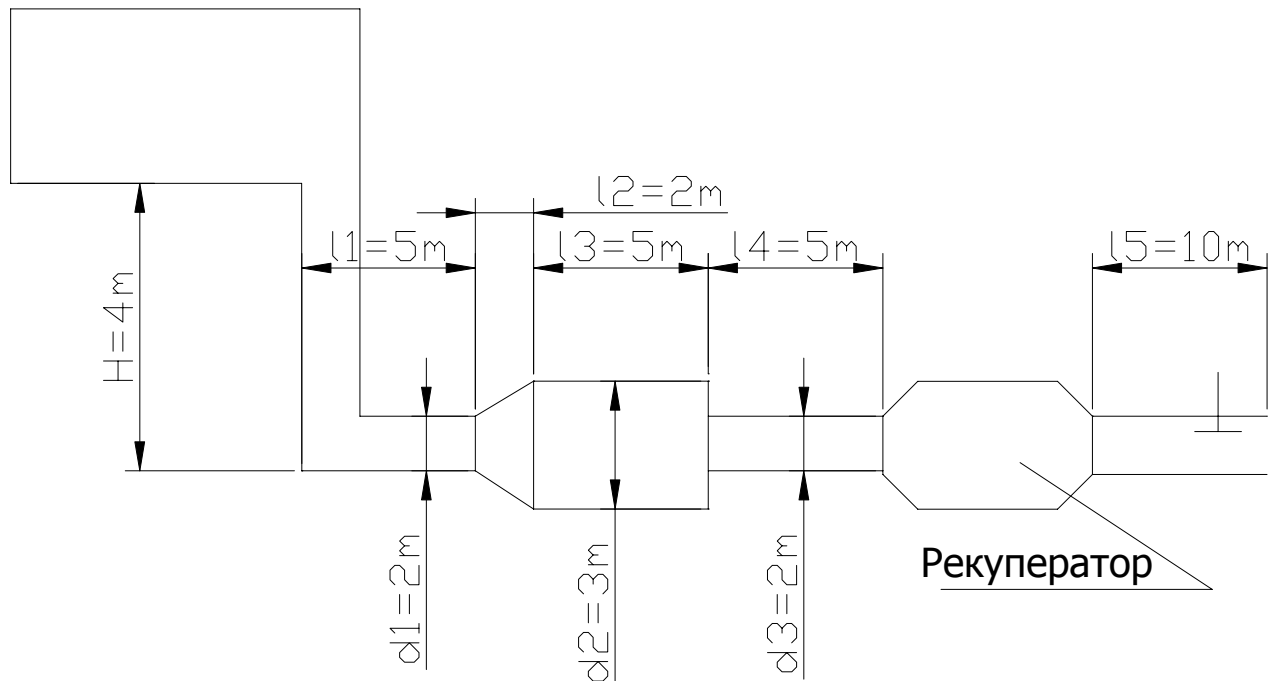


Рисунок 8.1 – Схема дымового тракта

Количество вертикальных каналов $n_{в.к} = \frac{F_{\partial}}{f_{в.к}}$.

Если $n_{в.к} > \frac{2 \cdot (L - 2a)}{p}$, тогда необходимо увеличить площадь одного

канала $f_{в.к}$,

где L – длина камерных печей и ширина для методических печей, м;

a – зазор между краем печи и дымовым каналом (0,5...1м);

p – расстояние между каналами (0,8...1,5м).

Эквивалентный диаметр одного канала, м, $d_{\text{э}} = \frac{4f_{в.к}}{\Pi}$,

где Π – периметр канала, м.

Скорость дыма в тех местах, где меняется его сечение, м/с:

– в вертикальном канале и перед расширением - $\omega_1 = \omega_2 = \omega_{\partial.2}$;

– после расширения - $\omega_3 = \frac{\omega_2 F_2}{F_3} = \frac{\omega_2 d_{\text{э}2}}{d_{\text{э}3}}$;

– средняя скорость на участке расширения - $\omega_{3cp} = 0,5(\omega_2 + \omega_3)$;

– после сужения - $\omega_4 = \frac{\omega_3 F_3}{F_4} = \frac{\omega_3 d_{\text{э}3}}{d_{\text{э}4}}$.

При движении дыма по дымоходу его температура снижается на 1...3°C на 1м погонный.

Температура дыма в характерных точках, °C:

– на повороте вертикального канала - $t_1 = t_{yx} - (1...3)H$;

– средняя температура дыма в вертикальном канале - $t_{cp1} = 0,5(t_{yx} + t_1)$;

– температура дыма перед расширением канала - $t_2 = t_1 - (1...3)l_1$;

– средняя температура дыма на горизонтальном втором участке -

$$t_{cp2} = 0,5(t_1 + t_2);$$

– температура дыма в конце расширения - $t_3 = t_2 - (1...3)l_2$;

– средняя температура на участке расширения - $t_{cp3} = 0,5(t_2 + t_3)$;

– температура дыма в конце четвёртого участка - $t_4 = t_3 - (1...3)l_3$;

– средняя температура дыма на четвёртом участке - $t_{cp4} = 0,5(t_3 + t_4)$;

– температура дыма на входе в рекуператор - $t_5 = t_4 - (1...3)l_4$;

– средняя температура дыма на пятом участке - $t_{cp5} = 0,5(t_4 + t_5)$;

– температура дыма перед задвижкой - $t_7 = t''_{\partial} - (1...3)l_5$,

где t''_{∂} берётся из расчёта рекуператора;

– средняя температура дыма на шестом участке - $t_{cp6} = 0,5(t''_{\partial} + t_7)$;

– температура дыма у основания трубы - $t_8 = t_7 - (1...3)l_6$.

$$\text{Потери давления на трение, Па, } \Delta P_{Tr i} = \mu_{Tr} \frac{l_i}{d_{\Sigma i}} \frac{\omega_{cpi}^2}{2} \rho_{\partial.2} (1 + \beta \cdot t_{cpi}),$$

где μ_{Tr} – коэффициент трения, зависит от материала дымохода:

- для кирпича - $\mu = 0,05$;
- для шероховатых металлических труб - $\mu = 0,04$;
- для гладких металлических труб - $\mu = 0,025$;

l_i – длина каждого участка дымохода, м;

ω_{cpi} – средняя скорость дыма на каждом участке, м/с;

t_{cpi} – средняя температура дыма каждого участка, °С;

$d_{\Sigma i}$ – эквивалентный диаметр дымохода на каждом участке, м;

$\rho_{\partial.2}$ – плотность дыма (см. расчёт горения топлива) кг/м³;

β – коэффициент объёмного расширения газа, 1/°С $\beta = \frac{1}{273}$.

Потери на трение рассчитываются отдельно для всех участков, а затем суммируются.

Потери давления дыма на местные сопротивления, Па,

$$\Delta P_{Mi} = K_i \frac{\omega_i^2}{2} \rho_{\partial.2} (1 + \beta \cdot t_i),$$

где K_i – коэффициент местного сопротивления, определяется по табл. 8.1-8.6;

ω_i – скорость дыма в рассматриваемом сечении, м/с;

t_i – температура дыма в рассматриваемом сечении, °С.

Таблица 8.1 - Значение коэффициента сопротивления К при внезапном сужении и расширении для любых форм сечения

$\frac{F_0}{F_1}$	$K_{суж}$	$K_{расш}$	$\frac{F_0}{F_1}$	$K_{суж}$	$K_{расш}$
0,1	0,47	0,81	0,6	0,25	0,16
0,2	0,42	0,64	0,7	0,20	0,09
0,3	0,38	0,49	0,8	0,15	0,04
0,4	0,34	0,36	0,9	0,09	0,01
0,5	0,30	0,25	1,0	0	0

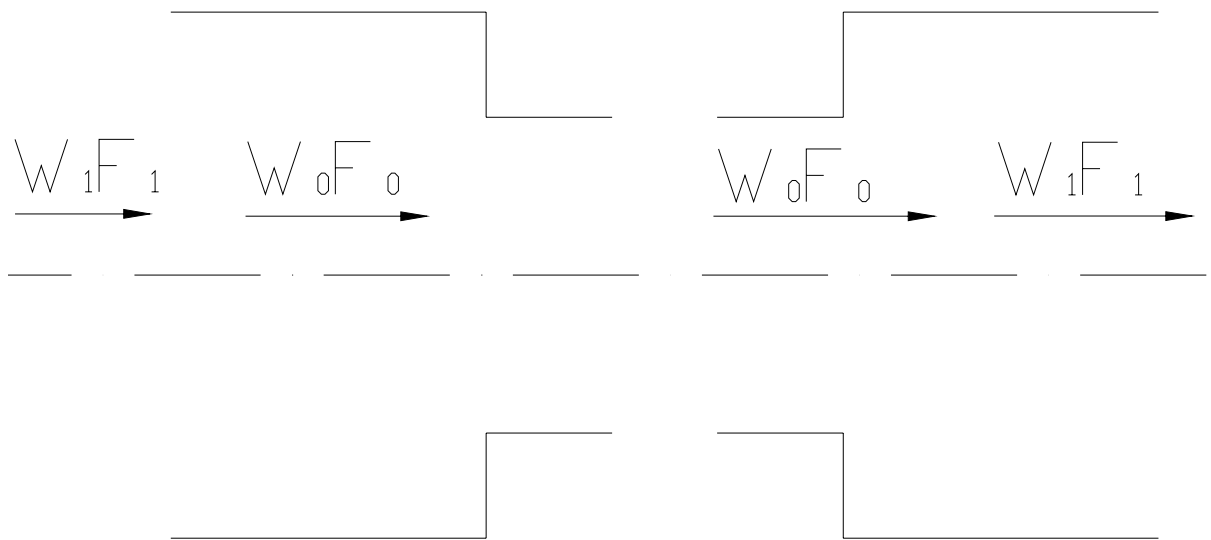


Рисунок 8.2 – Канал с внезапным сужением и расширением сечения

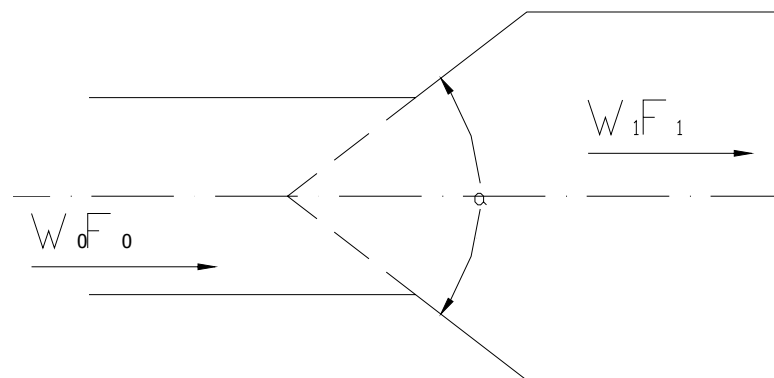


Рисунок 8.3 – Канал с постепенным расширением сечения

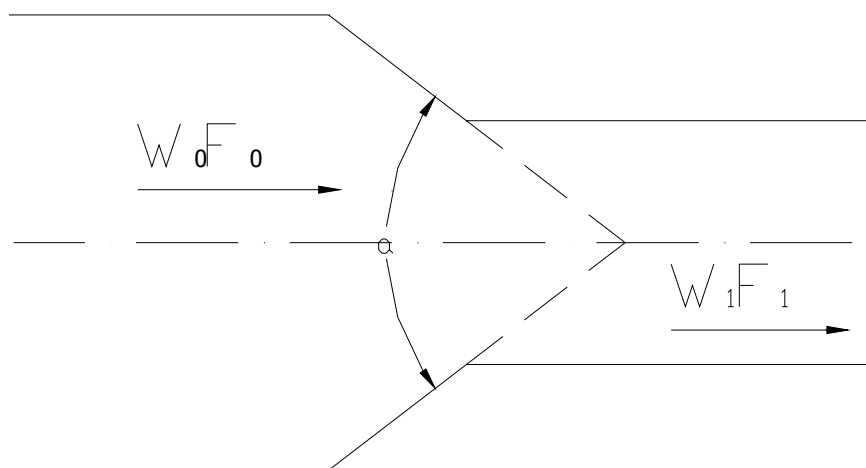


Рисунок 8.4 – Канал с постепенным сужением сечения

Таблица 8.2 - Коэффициент сопротивления при постепенном расширении

Таблица 6.2 Коэффициент сопротивления при поступательном разрыве							
$\frac{F_0}{F_1}$	Угол $\alpha,^\circ$						
	5	10	15	20	25	30	45
	Коэффициент К						
<i>Круглое сечение</i>							
1,25	-	0,1	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
1,50	-	0,02	0,03	0,05	0,08	0,11	0,13
1,75	-	0,03	0,05	0,07	0,11	0,15	0,20
2,0	-	0,04	0,06	0,10	0,15	0,21	0,27
2,25	-	0,05	0,08	0,13	0,19	0,27	0,34
2,5	-	0,06	0,10	0,15	0,23	0,32	0,40
<i>Квадратное сечение</i>							
1,25	-	0,02	0,03	0,05	0,06	0,07	-
1,50	-	0,03	0,06	0,10	0,12	0,13	-
1,75	-	0,5	0,05	0,14	0,17	0,19	-
2,0	-	0,06	0,13	0,20	0,23	1,26	-
2,25	-	0,08	0,16	0,26	0,30	0,33	-
2,5	-	0,09	0,19	0,30	0,36	0,39	-
<i>Прямоугольное сечение</i>							
1,25	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	-
1,50	0,06	0,03	0,03	0,05	0,07	0,08	-
1,75	0,08	0,05	0,05	0,06	0,09	0,11	-
2,0	0,11	0,07	0,07	0,09	0,13	0,15	-
2,25	0,14	0,09	0,08	0,12	0,17	0,19	-
2,5	0,17	0,10	0,10	0,14	0,20	0,23	-

Таблица 8.3 - Коэффициент сопротивления при постепенном сужении

$\frac{F_0}{F_1}$	Угол $\alpha, ^\circ$						
	5	10	15	20	25	30	45
	Коэффициент К						
1,25	0,15	0,22	0,27	0,31	0,33	0,38	0,47
1,50	0,22	0,31	0,38	0,44	0,48	0,55	0,68
1,75	0,30	0,43	0,52	0,61	0,65	0,75	0,93
2,0	0,39	0,56	0,68	0,79	0,85	0,98	1,21
2,25	0,50	0,70	0,86	1,0	1,08	1,23	1,53
2,5	0,62	0,87	1,07	1,24	1,33	1,52	1,89

Таблица 8.4 - Коэффициент сопротивления для колена прямоугольного сечения с острыми кромками на повороте при α от 0 до 90° и $Re \geq 0,2 \cdot 10^6$

$\frac{h}{b_0}$	Угол $\alpha, ^\circ$								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	Коэффициент К								
0,5	0,06	0,16	0,31	0,52	0,78	1,03	1,33	1,65	2,02
1,0	0,04	0,10	0,20	0,33	0,50	0,66	0,85	1,06	1,3
2,0	0,02	0,05	0,09	0,16	0,24	0,32	0,41	0,51	0,62
4,0	0,01	0,04	0,07	0,12	0,18	0,24	0,31	0,38	0,47
5,0	0,01	0,03	0,06	0,11	0,17	0,22	0,29	0,35	0,44
8,0	0,01	0,03	0,06	0,11	0,17	0,22	0,28	0,35	0,43

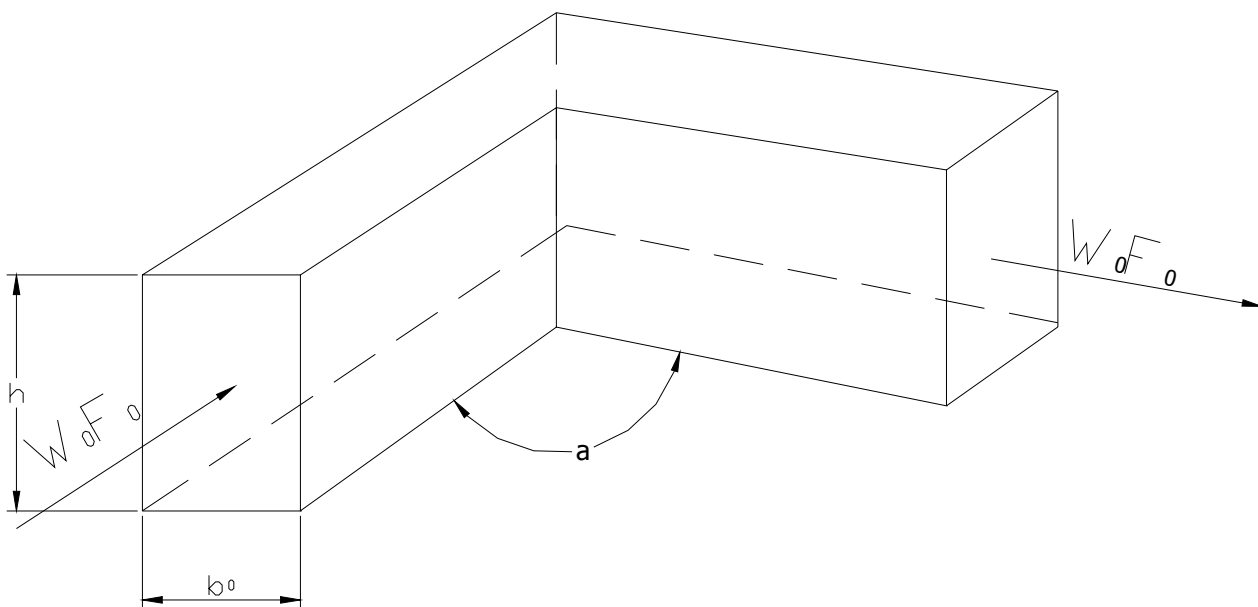


Рисунок 8.5 – Схема канала с острым углом поворота

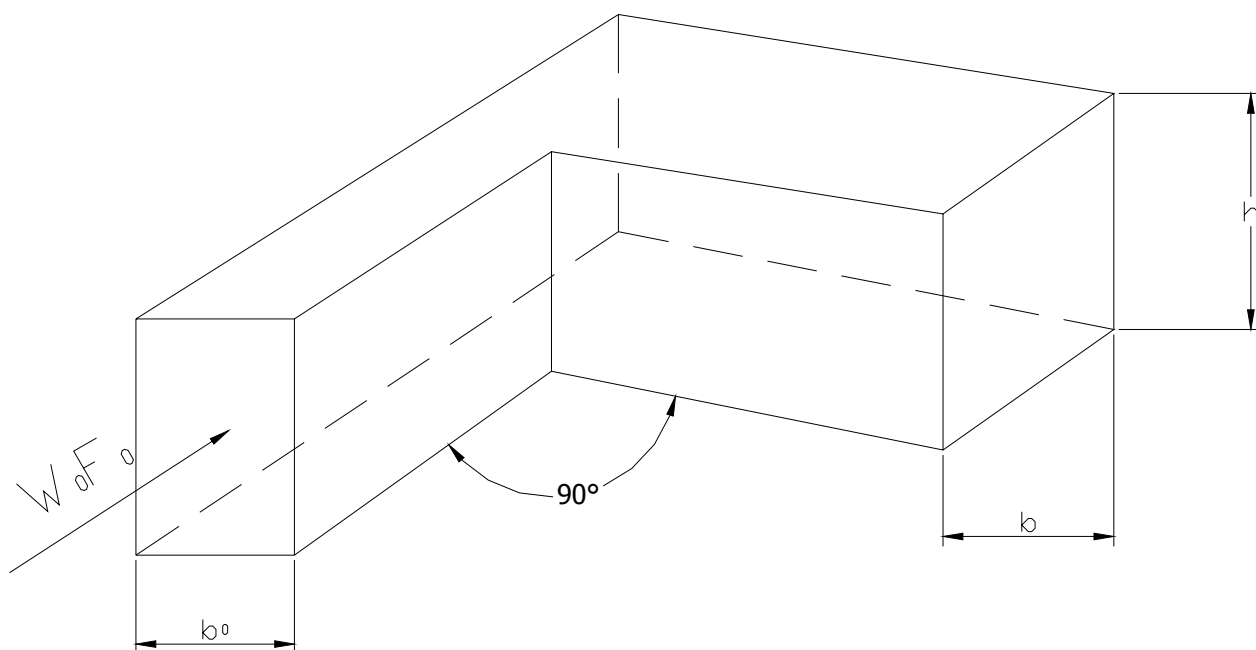


Рисунок 8.6 – Схема канала с поворотом с расширенным выходным сечением

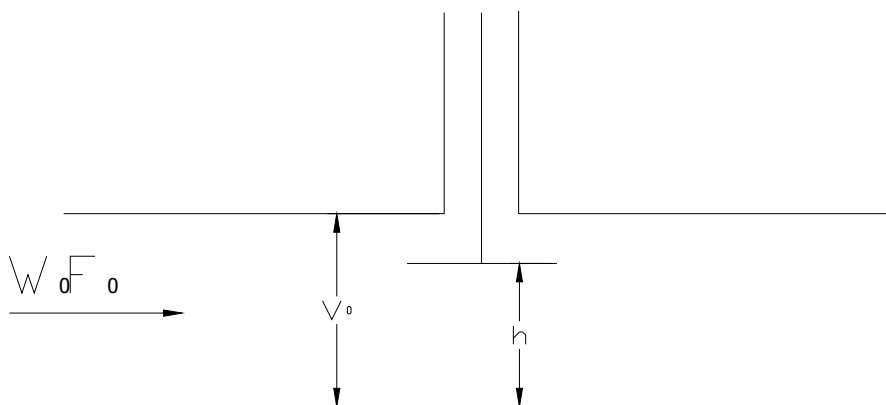


Рисунок 8.7 – Схема канала с задвижкой

Таблица 8.5 - Значение коэффициента сопротивления К для колена 90° с гладкими стенками прямоугольного сечения с расширенным или суженным выходным сечением при $Re \geq 0,2 \cdot 10^6$

$\frac{b_1}{b_0}$	$\frac{h}{b_0}$		
	0,25	1,0	4,0
	Коэффициент К		
0,6	1,76	1,70	1,46
0,8	1,43	1,36	1,10
1,0	1,24	1,15	0,90
1,2	1,14	1,02	0,81
1,4	1,09	0,98	0,76
1,6	1,06	0,90	0,72
2,0	1,06	0,84	0,66

Таблица 8.6 - Значение коэффициента сопротивления К для задвижки в прямоугольной трубе

$\frac{h}{b_0}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
К	∞	193	44,5	17,8	8,12	4,02	2,08	0,95	0,39	0,09	0

Примечание. Для элементов, не указанных в таблицах, местные сопротивления можно определить по изданию [2, с. 26-46].

Потери давления в рекуператоре складывается из потерь при внезапном расширении на входе, потерь при внезапном сужении на выходе из рекуператора и потерь давления при поперечном омывании дымом пучка труб [2], или их можно принять укрупнено:

- трубчатый рекуператор – 50...80Па;
- игольчатый рекуператор – 20...40Па;
- керамический – 100...140Па.

Определяются потери на местное сопротивление для участков: поворота дымохода, входа в дымоход, расширения или сужения дымохода, на задвижке и в рекуператоре, затем все потери суммируются.

Потери давления дыма на преодоление геометрического напора, Па,

$$\Delta P_{geom} = \pm gH \left(\frac{\rho_v}{1 + \beta t_B} - \frac{\rho_{d.г}}{1 + \beta t_{\Gamma}} \right),$$

где g – ускорение свободного падения, $g=9,8\text{м/с}^2$;

ρ_v – плотность воздуха при нормальных условиях, $1,29\text{кг/м}^3$;

t_B – температура воздуха (окружающей среды);

t_{Γ} – температура дыма;

β – коэффициент объёмного расширения, $1/^\circ\text{C}$ $\beta = \frac{1}{273}$;

H – высота канала.

Если дым по каналу направляется вниз, то ставят знак «+», если

поднимается вверх, то «-». Общие потери давления при движении продуктов сгорания от рабочего пространства печи до шиберы, Па,

$$\Delta P_{nom} = \sum \Delta P_{mpi} + \sum \Delta P_{MCi} + \Delta P_{geom}.$$

8.2 Расчёт дымовой трубы

Диаметр устья дымовой трубы, м,

$$d_y = \sqrt{\frac{4V_{d.2}B(1+m)}{\pi\omega_{02}}},$$

ω_{02} – скорость дыма в устье трубы, $\omega_{02} = 2...4$ м/с;

$V_{d.2}$ – объём дымовых газов, м³/м³ (см. расчёт горения топлива);

m – коэффициент, учитывающий подсос воздуха в дымовой тракт за рекуператором, $m=0,2$;

B – расход топлива, м³/с.

Из конструктивных соображений диаметр устья не должен быть меньше 0,8м. Если расчётное значение $d_y < 0,8$ м, то принимаем $d_y = 0,8$ м.

Диаметр основания трубы, м, $d_{осн} = 1,5d_y$.

Средний диаметр трубы, м, $d_{cp} = 0,5(d_y + d_{осн})$.

Приведённая скорость дыма у основания трубы, м/с,

$$\omega_{02} = \frac{4V_{d.2}B(1+m)}{\pi d_{осн}^2}.$$

Величина расчётного разрежения, Па,

$$P_{эф} = (1,2...1,4) \left[\Delta P_{nom} + \frac{\omega_{01}^2}{2} (1 + \beta \cdot t_8) \rho_{d.2} \right],$$

где t_8 – температура дыма у основания трубы, °С.

Ориентировочную высоту трубы H' можно определить по рисунку 8.8, по t_8 и $P_{эф}$ (тяги).

Температура дыма в устье трубы, °С, $t_9 = t_8 - (1...3)H'$.

Средняя температура дыма в трубе, $t_{cp}^{TP} = 0,5(t_8 + t_9)$.

Средняя температура воздуха по высоте дымовой трубы, $t_B^{cp} = t_6 - \frac{\sqrt{H'}}{2}$.

Высота дымовой трубы, м,

$$H = \frac{P_{эф} + \rho_{д.г} \left[\frac{\omega_{02}^2}{2} (1 + \beta_{t9}) - \frac{\omega_{01}^2}{2} (1 + \beta_{t8}) \right]}{g \left(\frac{\rho_B}{1 + \beta_{t_e}^{cp}} - \frac{\rho_{д.г}}{1 + \beta_{t_{cp}}^{TP}} \right) - \mu \frac{\rho_{д.г}}{2 \cdot d_{cp}} \left[\frac{\omega_{01}^2}{2} (1 + \beta_{t8}) + \frac{\omega_{02}^2}{2} (1 + \beta_{t9}) \right]}.$$

Высота трубы по санитарным нормам не должна быть ниже 16м.

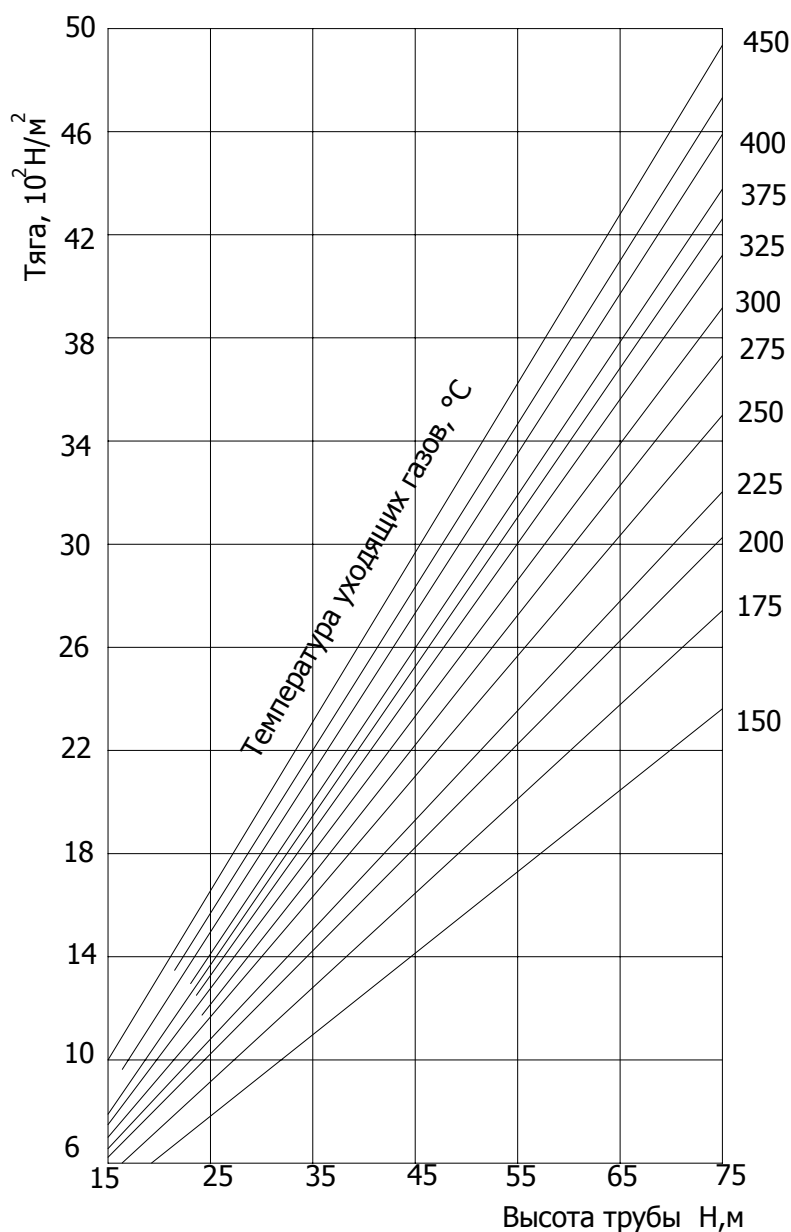


Рисунок 8.8 – График для определения ориентировочной высоты дымовой трубы

8.3 Пример расчёта дымового тракта

Определить суммарные потери давления на пути движения продуктов сгорания от рабочего пространства печи до шиберы (см. рисунок 8.1).

Исходные данные для расчёта:

объём продуктов сгорания $V_o = 10 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

расход топлива (природный газ) $B = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$.

температура уходящих газов $t_{yx} = 800^\circ\text{C}$;

тип рекуператора – металлический, трубчатый;

температура окружающего воздуха, $t_B = 20^\circ\text{C}$;

плотность воздуха $\rho_B = 1,29 \text{ кг/м}^3$;

плотность дыма $\rho_r = 0,9 \text{ кг/м}^3$;

температура дыма после рекуператора $t_{yx} = 420^\circ\text{C}$;

скорость дыма после рекуператора $\omega_p = 2,5 \text{ м/с}$.

суммарное проходное сечение вертикальных клапанов, м^2 ,

$$F_{\partial} = \frac{V_{\partial,2} m B}{\omega_{\partial,2}} = \frac{10 \cdot 0,7 \cdot 100}{2 \cdot 3600} = 0,095,$$

где m – коэффициент потерь дыма, $m = 0,65 \dots 0,8$, приняли: $m = 0,7$;

$\omega_{\partial,2}$ – допустимая скорость дыма ($1,5 \dots 3 \text{ м/с}$), приняли: $\omega_{\partial,2} = 2 \text{ м/с}$.

Наименьшее значение проходного сечения вертикального канала $f_{в.к}$ для кирпичной кладки $0,3 \text{ м}^2$. Поэтому увеличиваем F_{∂} до $0,3 \text{ м}^2$. Принимаем ширину прямоугольного дымового канала $a = 0,5 \text{ м}$, тогда длина канала $b = 0,6 \text{ м}$.

Эквивалентный диаметр одного канала, м ,

$$d_{\partial} = \frac{4 f_{в.к}}{P} = \frac{4 \cdot 0,3}{2 \cdot (0,5 + 0,6)} = 0,54.$$

где P – периметр канала, м .

Скорость дыма в тех местах, где меняется его сечение, м/с :

– в вертикальном канале и перед расширением - $\omega_1 = \omega_2 = \omega_{\partial,2} = 2 \text{ м/с}$;

– после расширения - $\omega_3 = \frac{\omega_2 F_2}{F_3} = \frac{\omega_2 d_{\partial 2}}{d_{\partial 3}} = \frac{2 \cdot 2^2}{3^2} = 0,9 \text{ м/с}$;

– средняя скорость на участке расширения -

$$\omega_{3cp} = 0,5(\omega_2 + \omega_3) = 0,5 \cdot (2 + 0,9) = 1,45 \text{ м/с};$$

– после сужения - $\omega_4 = \frac{\omega_3 F_3}{F_4} = \frac{\omega_3 d_{\partial 3}}{d_{\partial 4}} = \frac{0,9 \cdot 3^2}{2^2} = 2,25 \text{ м/с}$.

Температура дыма в характерных точках, $^\circ\text{C}$:

– на повороте вертикального канала - $t_1 = t_{yx} - (1 \dots 3)H = 80 - 2 \cdot 4 = 792$;

– средняя температура дыма в вертикальном канале -

$$t_{cp1} = 0,5(t_{yx} + t_1) = 0,5 \cdot (80 + 792) = 796;$$

– температура дыма перед расширением канала -

$$t_2 = t_1 - (1...3)l_1 = 792 - 2 \cdot 5 = 782;$$

– средняя температура дыма на горизонтальном втором участке -

$$t_{cp2} = 0,5(t_1 + t_2) = 0,5 \cdot (792 + 782) = 787;$$

– температура дыма в конце расширения -

$$t_3 = t_2 - (1...3)l_2 = 782 - 2 \cdot 2 = 778;$$

– средняя температура на участке расширения -

$$t_{cp3} = 0,5(t_2 + t_3) = 0,5 \cdot (782 + 778) = 780;$$

– температура дыма в конце четвёртого участка -

$$t_4 = t_3 - (1...3)l_3 = 778 - 2 \cdot 5 = 768;$$

– средняя температура дыма на четвёртом участке -

$$t_{cp4} = 0,5(t_3 + t_4) = 0,5 \cdot (778 + 768) = 773;$$

– температура дыма на входе в рекуператор -

$$t_5 = t_4 - (1...3)l_4 = 768 - 2 \cdot 5 = 758;$$

– средняя температура дыма на пятом участке -

$$t_{cp5} = 0,5(t_4 + t_5) = 0,5 \cdot (768 + 758) = 763;$$

– температура дыма перед задвижкой -

$$t_7 = t_0'' - (1...3)l_5 = 420 - 2 \cdot 10 = 400,$$

где t_0'' берётся из расчёта рекуператора;

– средняя температура дыма на шестом участке -

$$t_{cp6} = 0,5(t_0'' + t_7) = 0,5 \cdot (420 + 400) = 410.$$

Потери давления на трение при $\mu = 0,05$ (дымоход кирпичный), Па:

$$\Delta P_{Tpi} = \mu_{Tp} \frac{l_i}{d_{\partial i}} \frac{\omega_{cpi}^2}{2} \rho_{\partial, \varepsilon} (1 + \beta t_{cpi});$$

вертикальный канал -

$$\Delta P_{Tp1} = 0,05 \cdot \frac{4}{0,54} \cdot \frac{2^2}{2} \cdot 0,9 \cdot \left(1 + \frac{796}{273}\right) = 1,95,$$

горизонтальный участок -

$$\Delta P_{Tp2} = 0,05 \cdot \frac{5}{2} \cdot \frac{2^2}{2} \cdot 0,9 \cdot \left(1 + \frac{787}{273}\right) = 0,9;$$

участок расширения -

$$\Delta P_{Tp3} = 0,05 \cdot \frac{2}{0,5 \cdot (3 + 2)} \cdot \frac{1,45^2}{2} \cdot 0,9 \cdot \left(1 + \frac{780}{273}\right) = 0,15;$$

четвёртый участок -

$$\Delta P_{Tp4} = 0,05 \cdot \frac{5}{3} \cdot \frac{0,9^2}{2} \cdot 0,9 \cdot \left(1 + \frac{773}{273}\right) = 0,1;$$

пятый участок -

$$\Delta P_{Tp5} = 0,05 \cdot \frac{5}{2} \cdot \frac{2.25^2}{2} \cdot 0,9 \cdot \left(1 + \frac{763}{273}\right) = 1,2;$$

шестой участок -

$$\Delta P_{Tp6} = 0,05 \cdot \frac{10}{2} \cdot \frac{2.5^2}{2} \cdot 0,9 \cdot \left(1 + \frac{410}{273}\right) = 1,1.$$

Общие потери давления на трение

$$\sum \Delta P_{Tp} = 1,95 + 0,9 + 0,15 + 0,1 + 1,2 + 1,1 = 5,4 \text{ Па}.$$

Потери давления дыма на местные сопротивления, Па,

$$\Delta P_{Mi} = K_i \frac{\omega_i^2}{2} \rho_{d,z} (1 + \beta \cdot t_i).$$

$$\text{Вход в дымовой канал} - \Delta P_{MC1} = 0,5 \cdot \frac{2^2}{2} \cdot 0,9 \cdot \left(1 + \frac{796}{273}\right) = 3,51.$$

Поворот канала под прямым углом -

$$\Delta P_{MC2} = 1,25 \cdot \frac{2^2}{2} \cdot 0,9 \cdot \left(1 + \frac{792}{273}\right) = 6,53.$$

расширение канала

$$K = \eta \left(1 - \frac{F_1}{F_2}\right) = 0,65 \cdot \left(1 - \frac{2^2}{3^2}\right) = 0,36,$$

где $\eta = 0,65$ при угле расширения $\varphi = 30^\circ$,

$$\Delta P_{MC3} = 0,36 \cdot \frac{2^2}{2} \cdot 0,9 \cdot \left(1 + \frac{782}{273}\right) = 2,66.$$

сужение канала -

$$K = 0,35 \text{ при } \frac{F_4}{F_3} = \frac{d_4^2}{d_3^2} = \frac{2^2}{3^2} = 0,44,$$

$$\Delta P_{MC4} = 0,35 \cdot \frac{0,9^2}{2} \cdot 0,9 \cdot \left(1 + \frac{778}{273}\right) = 0,5.$$

Определяются потери на местное сопротивление для участков: поворота дымохода, входа в дымоход, расширения или сужения дымохода, на задвижке и в рекуператоре, затем все потери суммируются.

Размеры камеры для установки рекуператора: $1,4 \times 2,5 \text{ м}^2$, диаметр труб $d = 57 \text{ мм}$, $S_1 = S_2 = 2d = 114 \text{ мм} = 0,114 \text{ м}$. Температура дыма на входе в рекуператор $t_5 = 758^\circ \text{C}$, на выходе из рекуператора $t_0'' = 420^\circ \text{C}$. Скорость движения дыма в рекуператоре принимаем: $\omega_0^4 = 4 \text{ м/с}$.

Число рядов труб по глубине печи $n = 14$.

Потери давления при входе в рекуператор, Па,

$$\Delta P_{MC1}^P = K \rho_0 \frac{\omega_4^2}{2} \left(1 + \frac{t_5}{273}\right) = 0,01 \cdot 0,9 \cdot \frac{1,6^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{758}{273}\right) = 0,04,$$

где $K = \left(1 - \frac{F_1}{F_2}\right)^2 = 0,01.$

Потери давления в пучке труб, Па,

$$\Delta P_{нуч}^P = c_S c_d \Delta P_{Гр} (n + 1) = 1 \cdot 0,86 \cdot 11,1 \cdot (14 + 1) = 143,19,$$

где $c_S = 1$ (для $\frac{S_1}{d} = \frac{S_2}{d} = 2$);

$c_d = 0,86$ (для $d=57\text{мм}$);

$\Delta P_{Гр}$ зависит от средней температуры дыма и действительной скорости.

Средняя температура дыма в рекуператоре, °С,

$$t_{cp}^P = 0,5(t_D'' + t_5) = 0,5 \cdot (420 + 758) = 589.$$

Действительная скорость дыма, м/с,

$$\omega^P = \omega_0^P \left(1 + \frac{t_{cp}^P}{273}\right) = 4 \cdot \left(1 + \frac{589}{273}\right) = 12,63.$$

Потери давления при внезапном сужении на выходе из рекуператора, Па,

$$\Delta P_{MC2}^P = K \rho_0 \frac{\omega_0^{P^2}}{2} \left(1 + \frac{t_B}{273}\right) = 0,06 \cdot 0,9 \cdot \frac{4^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{420}{273}\right) = 1,1,$$

где $K = 0,06$ при $\frac{F_1}{F_2} = 0,9.$

Потери давления в рекуператоре, Па, $\Delta P_p = 0,09 + 143,19 + 1,1 = 143,38.$

Потери давления на задвижке, Па, $\Delta P_{MC5} = 1,0 \cdot \frac{2,5^2}{2} \cdot 0,9 \cdot \left(1 + \frac{410}{273}\right) = 9,5,$

где $K = 1,0.$

Общие потери давления дыма на местное сопротивление, Па,

$$\sum \Delta P_{MC} = 3,51 + 6,53 + 2,66 + 0,5 + 143,38 + 9,5 = 166,1.$$

Потери давления дыма на преодоление геометрического напора, Па,

$$\Delta P_{geom} = 9,8 \cdot 4 \cdot \left(1,29 \cdot \frac{1}{1 + \frac{20}{273}} - \frac{0,9}{1 + \frac{796}{273}}\right) = 39,1.$$

Общие потери давления при движении продуктов сгорания от рабочего пространства печи до шибер, Па,

$$\Delta P_{nom} = \sum \Delta P_{mpi} + \sum \Delta P_{MCi} + \Delta P_{geom} = 5,4 + 166,1 + 39,1 = 210,6.$$

8.4 Пример расчёта дымовой трубы

Определить высоту кирпичной дымовой трубы.

Общие потери давления $\Delta P_{nom} = 226,4 \text{ Па}$, температура дыма перед трубой $t_{Г1} = 394^\circ\text{C}$, плотность дымовых газов $\rho_{Г0} = 1,21 \text{ кг/м}^3$, температура окружающего воздуха $t_B = 20^\circ\text{C}$, плотность воздуха $\rho_{B0} = 1,29 \text{ кг/м}^3$. Объём дымовых газов $V_{\partial.г} = 9,8 \text{ м}^3/\text{м}^3$, расход топлива $B = 0,8 \text{ м}^3/\text{с}$.

Диаметр устья дымовой трубы, м,

$$d_y = \sqrt{\frac{4V_{\partial.г}B(1+m)}{\pi\omega_{02}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 9,8 \cdot 0,8}{3,14 \cdot 3}} = 1,82,$$

где ω_{02} – скорость дыма в устье трубы, $\omega_{02} = 2 \dots 4 \text{ м/с}$, приняли: $\omega_{02} = 3 \text{ м/с}$.

Диаметр основания трубы, м, $d_{осн} = 1,5d_y = 1,5 \cdot 1,82 = 2,73$.

Средний диаметр трубы, м,

$$d_{cp} = 0,5(d_y + d_{осн}) = 0,5 \cdot (2,73 + 1,82) = 2,28.$$

Приведённая скорость дыма у основания трубы, м/с,

$$\omega_{02} = \frac{4V_{\partial.г}B(1+m)}{\pi d_{осн}^2} = \frac{4 \cdot 9,8 \cdot 0,8 \cdot 1,2}{3,14 \cdot 2,73^2} = 1,34.$$

Величина расчётного разрежения, Па,

$$P_{эф} = (1,2 - 1,4)\Delta P_{nom} = 1,3 \cdot 226,4 = 294,32.$$

Ориентировочную высоту трубы H' можно определить по рисунку 8.8, по t_8 и $P_{эф}$ (тяги): $H' = 43 \text{ м}$.

Температура дыма в устье трубы, $^\circ\text{C}$,

$$t_9 = t_8 - (1 \dots 3)H' = 394 - 1,5 \cdot 43 = 329,5.$$

Средняя температура дыма в трубе

$$t_{cp}^{TP} = 0,5(t_8 + t_9) = 0,5 \cdot (329,5 + 394) = 362.$$

Высота дымовой трубы, м,

$$H = \frac{P_{эф} + \rho_{\partial.г} \left[\frac{\omega_{02}^2}{2} (1 + \beta t_9) - \frac{\omega_{01}^2}{2} (1 + \beta t_8) \right]}{g \left(\frac{\rho_B}{1 + \beta t_8^{cp}} - \frac{\rho_{\partial.г}}{1 + \beta t_{cp}^{TP}} \right) - \mu \frac{\rho_{\partial.г}}{2d_{cp}} \left[\frac{\omega_{01}^2}{2} (1 + \beta t_8) + \frac{\omega_{02}^2}{2} (1 + \beta t_9) \right]} =$$

$$= \frac{294,32 + 1,21 \cdot \left[\frac{1,34^2}{2} \cdot \left(\frac{394 + 273}{273} \right) - \frac{3^2}{2} \cdot \left(\frac{329,5 + 273}{273} \right) \right]}{9,8 \cdot \left(1,29 \cdot \frac{273}{20 + 273} - 1,21 \cdot \frac{273}{362 + 273} \right) - \frac{0,05}{2,28} \cdot 1,21 \cdot \frac{1,67^2}{2} \cdot \frac{362 + 273}{273}} = 40.$$

Заключение

В заключении делается вывод по результатам расчёта, оговаривается область применения спроектированной печи, сопоставляются характеристики печи с существующими аналогами (преимущества и недостатки). В таблицу сводятся технико-экономические показатели новой печи.

Таблица - Техничко-экономические характеристики печи

№	Показатель, обозначение	Единица измерения	Величин -на
1	Теплота сгорания топлива Q_p^H	$КДж/м^3$	
2	Действительный объём воздуха L_{∂}	$м^3/м^3$	
3	Объём дымовых газов $V_{\partial.г}$	$м^3/м^3$	
4	Плотность топлива $\rho_г$	$кг/м^3$	
5	Плотность дыма $\rho_{\partial.г}$	$кг/м^3$	
6	Неувязка баланса m_i	%	
7	Калориметрическая температура t_K	$^{\circ}C$	
8	Действительная температура t_{∂}	$^{\circ}C$	
9	Длина печи L	м	
10	Ширина печи B	м	
11	Максимальная высота H_{max}	м	
12	Минимальная высота H_{min}	м	
13	Температур нагрева T_H	$^{\circ}C$	
14	Температура выдержки T_B	$^{\circ}C$	
15	Скорость нагрева $\nu_{min} \dots \nu_{max}$	$^{\circ}C/ч$	
16	Критерий Био Bi	-	
17	Общее время нагрева $\tau_{общ}$	час	
18	Ёмкость печи E	кг	
19	Общая масса огнеупорного материала $M_{ш}$	кг	
20	Общая масса теплоизоляционного слоя M_{∂}	кг	-
21	Толщина огнеупорной кладки δ	м	
22	Толщина теплоизоляционной кладки δ	м	
23	Расход топлива B	$м^3/с$	
24	Погрешность расчёта Δ	%	
25	Термический коэффициент полезного действия η_t	%	
26	Тип рекуператора	-	
27	Расход воздуха V_B	$м^3/с$	
28	Средний коэф. теплопередачи K_{cp}	$Вт / (м^2 \cdot ^{\circ}C)$	
29	Средняя температура дыма в рекуператоре $t_г$	$^{\circ}C$	

Продолжение таблицы

№	Показатель, обозначение	Единица измерения	Величины
30	Диаметр трубок d_H	<i>м</i>	
31	Поверхность нагрева F	$м^2$	
32	Потребное кол-во трубок n	<i>шт.</i>	
33	Производительность горелки B_g	$м^3/с$	
34	Количество горелок n	<i>шт.</i>	
35	Расстояние между горелками l	<i>м</i>	
36	Диаметр носика горелки $d_{НГ}$	<i>мм</i>	
37	Суммарное проходное сечение вертикальных каналов F_{∂}	$м^2$	
38	Кол-во вертикальных каналов $n_{в.к}$	<i>шт.</i>	
39	Температура уходящих газов $t_{ух}$	$^{\circ}C$	
40	Температура дыма в основании трубы t_8	$^{\circ}C$	
41	Общие потери давления $\Delta P_{пот}$	<i>Па</i>	
42	Диаметр устья трубы d_y	<i>м</i>	
43	Диаметр основания трубы $d_{осн}$	<i>м</i>	
44	Высота дымовой трубы H	<i>м</i>	

Перечень ссылок

1 Краснокутський П.Г., Теплотехнічні процеси і конструкції нагрівальних печей: Навч. посібник / За ред. П.Г. Краснокутський, Ф.І. Колесник; – К.: ІСДО, 1995. - 248с.

2 Расчеты нагревательных печей / Под ред. Н.Ю. Тайца – К: Техника, 1969. - 540 с.

3 Кривандин В.А. Металлургические печи / В.А.Кривандин, Б.Л.Марков. – М.: Металлургия – 1967. - 672с. ,

4 Теплотехнические расчёты металлургических печей: Учеб. пособие для студентов вузов. – 2-е изд. / Б.Ф.Зобнин, М.Д.Козяев, Б.И.Китаев и др. - М.: Металлургия, 1982.-360с.

5 Тайц Н.Ю. Методические нагревательные печи / Н.Ю.Тайц, Ю.И.Разенгарт– М.: Металлургия, 1964. - 408с.

6 Ковка и штамповка: Справочник. В 4 т. / Под ред. Е.И. Семёнова. – М.: Машиностроение, 1986.-Т.1. - 592с.

7 Теория и технологияковки / Л.Н. Соколов, Н.К. Голубятников, В.Н. Ефимов, И.П. Шелаев. – К.: Вища шк., 1989. - 317с.

Марков Олег Евгеньевич

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПЕЧЕЙ КУЗНЕЧНО – ПРЕССОВОГО
ПРОИЗВОДСТВА**

Учебное пособие для студентов

специальности «Обработка металлов давлением»

по дисциплине «Теплоэнергетика»

Редактор

Хахина Нелли Александровна

Подп. в печ.

Формат 60х84/16.

Ризограф. печать.

Усл. печ. л.

Уч. - изд.л.

Тираж 100 экз.

Заказ №

ДГМА. 84313, г. Краматорск, ул. Шкадинова, 72