

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Институт повышения квалификации
и переподготовки

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и экология»

Н. А. Вальченко

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ

ПРАКТИКУМ

**для слушателей специальности
переподготовки 1-43 01 71 «Техническая
эксплуатация теплоэнергетических установок
и систем теплоснабжения»
заочной формы обучения**

Гомель 2021

УДК 621.78-977(075.8)
ББК 34.651.01-1я73
В16

*Рекомендовано кафедрой «Промышленная теплоэнергетика
и экология» ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 6 от 30.11.2020 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого
А. А. Капанский

Вальченко, Н. А.
В16

Высокотемпературные процессы и установки : практикум для слушателей специальности переподготовки 1-43 01 71 «Техническая эксплуатация теплоэнергетических установок и систем теплоснабжения» заоч. формы обучения / Н. А. Вальченко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – 28 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Практикум составлен в соответствии с учебной программой, что способствует совершенствованию знаний и практических навыков при изучении вопросов расчета режимных параметров и эксплуатации высокотемпературных установок промышленных предприятий.

Предназначен для слушателей специальности переподготовки 1-43 01 71 «Техническая эксплуатация теплоэнергетических установок и систем теплоснабжения» института повышения квалификации и переподготовки заочной формы обучения.

УДК 621.78-977(075.8)
ББК 34.651.01-1я73

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2021

Практическая работа № 1

Конструктивные схемы рабочего пространства ВТТУ

В ВТУ с газовым теплоносителем широко используются следующие теплотехнические принципы:

- Плотного фильтруемого слоя (происходит тепловая обработка свободной засыпки дробленых материалов, мелких изделий и т.д.);
- «Кипящего» слоя (тепловая обработка зернистых или грубоизмельчённых материалов в условиях псевдооживления);
- Взвешенного слоя (тепловая обработка измельчённых материалов, в условиях газозвеси).
- Пересыпающегося слоя (тепловая обработка сыпучего материала, перемещаемого различными способами);
- Уложенных загрузок (тепловая обработка укладки изделий или полуфабрикатов);
- Излучающего факела или излучающего газового потока;
- Поверхностного излучателя;
- Погруженного факела (тепловая обработка материала в ванне расплава, продуваемой газовым теплоносителем);
- Комбинированный (тепловая обработка материала в условиях последовательного применения 2-х или нескольких теплотехнических принципов).

По способу электрического нагрева выделяют следующие типы теплотехнологических установок с электрическим источником энергии:

- Косвенного нагрева;
- Прямого (контактного) нагрева;
- Индукционного нагрева;
- Электродугового нагрева;
- Электронно-лучевого нагрева;
- Плазменного нагрева.

Рассмотрим 7 основных теплотехнических схем камер ОТО ВТТУ.

Таблица 1.1

Теплотехнические схемы камер ОТО ВТТУ

Название теплотех принципа	Плотный слой	Кипящий слой	Взвешенный слой	Погруженный слой	Излучающий факел		
					Закрученный поток газов	Прямоточный, рециркуляционный, набегающий поток газов	
№	1	2	3	4	5	6	7
схема							
$K_v = \frac{V_{ce}}{V_{zh}}$	~0.25	~4.0	0-1.0	~4.0	$\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1$	$\frac{H}{\delta} - 1$	$\frac{H}{\delta} - 1$
K_d	~5-10	~10-50	~1.0	~5-20	1.0	1.0	1.0
m	~	~	$1 - \frac{\mu_m}{\rho_m}$	>0.0	0.0	0.0	0.0

$V_{з.м.}$, $V_{св.}$ – соответственно объём камеры занятый материалом и свободный от него;

М – материал;

П – продукт;

Г – газовый теплоноситель;

μ_m , ρ_m – соответственно концентрация материала и его плотность;

D , d , H , δ – соответственно диаметры камеры и цилиндрической заготовки, высота камеры, толщина плиты (заготовки);

K_v – коэффициент, характеризующий степень полезного использования объёма технологической камеры, относительное развитие её поверхности ограждения;

m – порозность материала;

K_d – коэффициент отображающий отношение фактической массы обрабатываемого материала к теоретической массе обрабатываемого материала.

Практическая работа № 2

Схемы и устройства использования теплоты теплотехнологических продуктов и отходов, охлаждаемых элементов установок.

Пример. Для подогрева газа в методической печи используется прямотрубный рекуператор. Трубы диаметром $d = 57$ мм и длиной $l = 2,94$ м расположены в шахматном порядке и образуют по ходу дыма $m = 8$ рядов по $n = 7$ труб в каждом ряду. Расстояние между рядами $S_2 = 2d$; расстояние между трубами в ряду $S_1 = 2,5d$, средняя температура поверхности труб 400°C . Средняя скорость движения дыма при 0°C составляет $u_{ж,0} = 3$ м/с. Температура дыма перед входом в рекуператор $t_{ж1} = 900^\circ\text{C}$ после рекуператора $t_{ж2} = 600^\circ\text{C}$.

Как изменится величина теплового потока от дымовых газов к поверхности труб рекуператора при выходе из строя первого (по ходу дыма) ряда труб, двух первых, трех первых рядов?

Решение

Средняя плотность теплового потока от дымовых газов к поверхности труб составит:

$$q = \alpha \cdot (t_{ж} - t_c), \quad (2.1)$$

Средняя температура дымовых газов в рекуператоре определяется:

$$t_{ж} = 0,5 \cdot (t_{ж1} + t_{ж2}) = 0,5 \cdot (900 + 600) = 750^\circ\text{C}.$$

Средний для шахматного пучка коэффициент конвективной теплоотдачи определяем по формуле $\alpha = \alpha_0 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3$, Вт/(м²·град), используя для этого номограмму на рис. 2.1.

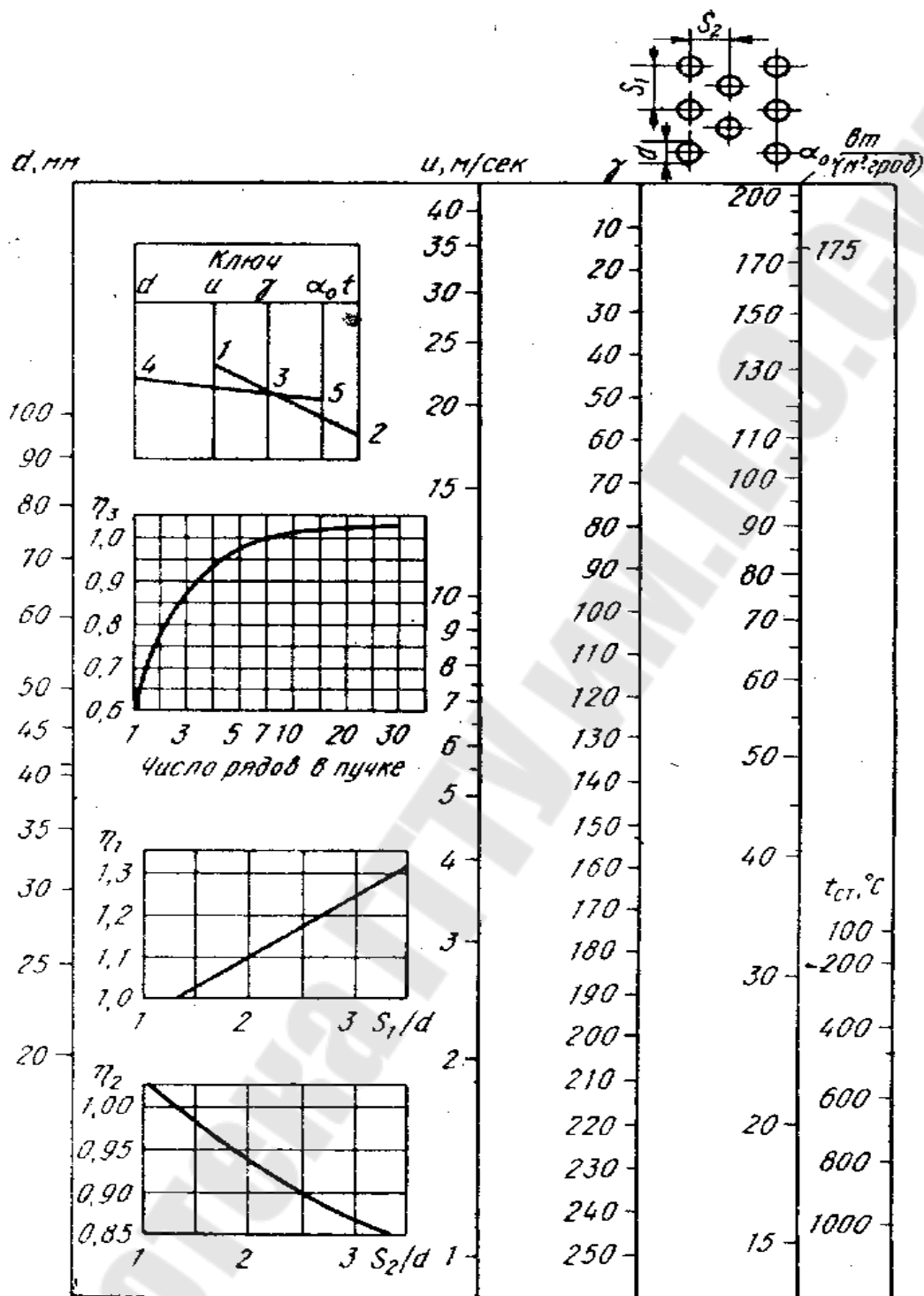


Рис. 2.1. Номограмма для определения коэффициента теплоотдачи конвекцией шахматных пучков труб

При $S_1/d = 2,5$ величина $\eta_1 = 1,16$, при $S_1/d = 2,0$ величина $\eta_2 = 0,94$, при числе рядов труб в пучке $m = 8$ значение $\eta_3 = 1,01$.

При средней температуре дымовых газов в рекуператоре $t_{ж} = 750^{\circ}\text{C}$ истинная скорость движения дымовых газов:

$$u_{ж} = u_{ж,0} \cdot \left(1 + \frac{t_{ж}}{273}\right) = 3 \cdot \left(1 + \frac{750}{273}\right) = 11,25 \text{ м/с.}$$

Тогда $\alpha_0 = 49 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$.

Отсюда:

$$\alpha = 49 \cdot 1,16 \cdot 0,94 \cdot 1,01 = 54 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град.}$$

Средняя плотность теплового потока равна:

$$q = 54 \cdot (750 - 400) = 18900 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Общий тепловой поток от дымовых газов к поверхности труб рекуператора:

$$Q = q \cdot \pi \cdot d \cdot l \cdot m \cdot n = 18900 \cdot 3,14 \cdot 5,7 \cdot 10^{-2} \cdot 2,94 \cdot 8 \cdot 7 = 55,7 \cdot 10^4 \text{ Вт.}$$

При выходе из строя первого ряда труб тепловой поток от дымовых газов к поверхности труб рекуператора уменьшится на:

$$Q = \alpha_1 \cdot (t_{ж1} - t_{c1}) \cdot \pi \cdot d \cdot l \cdot n, \quad (2.2)$$

где α_1 – коэффициент конвективной теплоотдачи от дыма к первому ряду труб, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$;

$t_{ж1}$ – температура дыма на входе в рекуператор, $^{\circ}\text{C}$;

t_{c1} – температура стенки первого ряда труб, $^{\circ}\text{C}$.

Полагая линейный характер изменения температуры дыма, находим, что при переходе от ряда к ряду труб температура дыма меняется на величину

$$\Delta t_{ж} = \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{m - 1} = \frac{900 - 600}{8 - 1} = 42,9 \text{ град.}$$

При прямоточном движении дыма и нагреваемого газа в рекуператоре температура стенок труб рекуператора по ходу дыма практически неизменна. При противоточном движении дыма и нагреваемого газа также примем линейный характер изменения температуры поверхности труб по ходу дыма, подобный характеру изменения температуры дыма, т. е.

$$t_{ж1} - t_{c1} = t_{ж2} - t_{c2} = t_{жс} - t_{с} = 750 - 400 = 350^{\circ}\text{C},$$

отсюда $t_{c1} = 550 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{c2} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$.

При переходе от ряда к ряду труб температура их стенок меняется на величину:

$$\Delta t_c = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{m - 1} = \frac{550 - 250}{8 - 1} = 42,9.$$

Коэффициент конвективной теплоотдачи от потока продуктов сгорания к третьему ряду труб шахматного пучка может быть в нашем случае найден по формуле

$$Nu_{ж} = 0,41 \cdot Re_{ж}^{0,6} \cdot Pr_{ж}^{0,33}, \quad (2.3)$$

В качестве определяющей температуры в этой формуле принимается средняя температура дыма $t_{ж} = 750 \text{ }^\circ\text{C}$, в качестве определяющего размера – диаметр труб d . Этой температуре соответствуют следующие теплофизические параметры продуктов сгорания $\nu_{ж} = 131,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $\lambda_{ж} = 8,29 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$, $Pr = 0,6$.

Критерий Рейнольдса:

$$Re_{ж} = \frac{11,25 \cdot 5,7 \cdot 10^{-2}}{1,318 \cdot 10^{-4}} = 4860 > 2300.$$

Поскольку полученное значение критерия Рейнольдса находится в допустимых пределах $2 \cdot 10^2 < Re_{ж} < 2 \cdot 10^5$, формула справедлива для рассматриваемого случая:

$$Nu_{ж} = 0,41 \cdot 4860^{0,6} \cdot 0,6^{0,33} = 49,5.$$

Коэффициент теплоотдачи к третьему ряду труб рекуператора

$$\alpha_3 = Nu_{ж} \cdot \frac{\lambda_{ж}}{d} = 49,5 \cdot \frac{8,29 \cdot 10^{-2}}{5,7 \cdot 10^{-2}} = 71,7 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град}.$$

Коэффициент теплоотдачи ко второму ряду труб шахматного пучка

$$\alpha_2 = 0,7 \cdot \alpha_3 = 0,7 \cdot 71,7 = 50,2 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град}.$$

Коэффициент теплоотдачи к первому ряду труб

$$\alpha_1 = 0,6 \cdot \alpha_3 = 0,6 \cdot 71,7 = 43 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град}.$$

Количество тепла, передаваемого продуктами сгорания в единицу времени первому ряду труб, равно:

$$Q_1 = \alpha_1 \cdot (t_{ж1} - t_{c1}) \cdot \pi \cdot d \cdot l \cdot n = 43 \cdot (900 - 550) \cdot 3,14 \cdot 5,7 \cdot 10^{-2} \cdot 2,94 \cdot 7 = 5,56 \cdot 10^4 \text{ Вт};$$

второму ряду труб:

$$Q_2 = 50,2 \cdot (857,1 - 507,1) \cdot 3,14 \cdot 5,7 \cdot 10^{-2} \cdot 2,94 \cdot 7 = 6,5 \cdot 10^4 \text{ Вт};$$

третьему ряду труб:

$$Q_3 = 71,7 \cdot (814,2 - 464,2) \cdot 3,14 \cdot 5,7 \cdot 10^{-2} \cdot 2,94 \cdot 7 = 9,29 \cdot 10^4 \text{ Вт}.$$

Таким образом, при выходе из строя первого ряда труб шахматного пучка тепловой поток от продуктов сгорания к поверхности труб уменьшится на величину:

$$Q_1 = 5,56 \cdot 10^4 \text{ Вт или на } \frac{5,56 \cdot 10^4}{55,7 \cdot 10^4} \cdot 100 = 10 \text{ \%}.$$

При выходе из строя двух первых рядов труб тепловой поток от продуктов сгорания к поверхности труб уменьшится на величину:

$$Q_1 + Q_2 = 5,56 \cdot 10^4 + 6,5 \cdot 10^4 = 12,06 \cdot 10^4 \text{ Вт}$$

или на:

$$\frac{12,06 \cdot 10^4}{55,7 \cdot 10^4} \cdot 100 = 21,7 \text{ \%},$$

а при выходе из строя трех первых рядов труб уменьшится на величину:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = 5,56 \cdot 10^4 + 6,5 \cdot 10^4 + 9,29 \cdot 10^4 = 21,35 \cdot 10^4 \text{ Вт}$$

или на:

$$\frac{21,35 \cdot 10^4}{55,7 \cdot 10^4} \cdot 100 = 38,4 \text{ \%}.$$

Практическая работа № 3

Расчет внешнего теплообмена в рабочем пространстве ВТТУ

Пример. Рассчитать потери через свод и стены печи. Потери теплоты через под пренебрегаем. Площадь свода $F_{\text{св}}$ равна площади габаритного пода печи, т.е. $F_{\Gamma} = 12,69 \text{ м}^2$; толщина свода $\delta_1 = 0,3 \text{ м}$, материал - шамот класса А.

Решение

Принимаем, что температура внутренней поверхности свода равна средней, по длине печи, температуре газов.

$$t_{\Gamma}^{\text{cp}} = \frac{t_{\text{отх}} + t_{\text{св.зоны}} + t_{\text{том.зоны}}}{3} = t_{\text{св}}^{\text{BH}}, \quad (3.1)$$
$$t_{\Gamma}^{\text{cp}} = t_{\text{св}}^{\text{BH}} = \frac{820 + 1422 + 1200}{3} = 1147,34 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Температуру окружающей среды принимаем равной $t_{\text{в}} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Температура поверхности кладки свода $t_{\text{нар}} = 58 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Тогда средняя по толщине температура шамотного свода равна:

$$t_{\text{ш.св}} = \frac{t_{\Gamma}^{\text{cp}} + t_{\text{нар}}}{2}, \quad (3.2)$$
$$t_{\text{ш.св}} = \frac{1147,34 + 58}{2} = 602,67 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Данным температурным условиям отвечает коэффициент теплопроводности шамотного материала $\lambda_{\text{ш}}$ определяемый по:

$$\lambda_{\text{ш}} = 0,835 + 0,58 \cdot t_{\text{ш.св}} \cdot 10^{-3}, \quad (3.3)$$
$$\lambda_{\text{ш}} = 0,835 + 0,58 \cdot 602,67 \cdot 10^{-3} = 1,185 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}.$$

Тогда потери через свод составят:

$$Q_{\text{св}} = \frac{t_{\text{св}}^{\text{BH}} - t_{\text{в}}}{\frac{\delta_1}{\lambda_{\text{ш}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{нар}}}} \cdot F_{\text{св}}, \frac{\text{кДж}}{\text{с}}, \quad (3.4)$$

где $\alpha_{\text{нар}}^{\text{св}}$ – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности свода в окружающую среду, получаемый статическими методами.

$$\alpha_{\text{нар}}^{\text{св}} = 9,7 + 0,1 \cdot (t_{\text{нар}} - 30) - 4,43 \cdot 10^{-4} \cdot (t_{\text{нар}} - 30)^2 + 1,35 \cdot 10^{-6} \cdot (t_{\text{нар}} - 30)^3;$$

$$\alpha_{\text{нар}}^{\text{св}} = 9,7 + 0,1 \cdot (58 - 30) - 4,43 \cdot 10^{-4} \cdot (58 - 30)^2 + 1,35 \cdot 10^{-6} \cdot (58 - 30)^3 =$$

$$= 12,18 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Для вертикальной стенки:

$$\alpha_{\text{нар}}^{\text{верт}} = 9,5 + 98,15 \cdot 10^{-3} \cdot (t_{\text{нар}} - 30) - 4,74 \cdot 10^{-4} \cdot (t_{\text{нар}} - 30)^2 + 1,74 \cdot 10^{-6} \cdot (t_{\text{нар}} - 30)^3$$

$$\alpha_{\text{нар}}^{\text{верт}} = 9,5 + 98,15 \cdot 10^{-3} \cdot (58 - 30) - 4,74 \cdot 10^{-4} \cdot (58 - 30)^2 + 1,74 \cdot 10^{-6} \cdot (58 - 30)^3 =$$

$$= 11,91 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Для пода печи:

$$\alpha_{\text{нар}}^{\text{под}} = 9,3 + 91,5 \cdot 10^{-3} \cdot (t_{\text{нар}} - 30) - 3,88 \cdot 10^{-4} \cdot (t_{\text{нар}} - 30)^2 + 1,37 \cdot 10^{-6} \cdot$$

$$\cdot (t_{\text{нар}} - 30)^3, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

$$\alpha_{\text{нар}}^{\text{под}} = 9,3 + 91,5 \cdot 10^{-3} \cdot (58 - 30) - 3,88 \cdot 10^{-4} \cdot (58 - 30)^2 + 1,37 \cdot 10^{-6} \cdot (58 - 30)^3 =$$

$$= 11,588 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Потери через свод:

$$Q_{\text{св}} = \frac{1147,34 - 25}{\frac{0,3}{1,185} + \frac{1}{12,18}} \cdot 12,69 = 42,51 \frac{\text{кДж}}{\text{с}}.$$

Определяем потери теплоты через стены.

Кладка стен выполнена двухслойной (шамот толщиной $\delta_2 = 345 \text{ мм} = 0,345 \text{ м}$) и диатомит толщиной $\delta_3 = 0,115 \text{ м}$

Площадь стен следующая:

– методической зоны:

$$F_{\text{мет}} = 2 \cdot L_{\text{мет}} \cdot H_{\text{м}}^{\text{ср}} = 2 \cdot 3,29 \cdot 1,58 = 10,4 \text{ м}^2;$$

– сварочной зоны:

$$F_{\text{св}} = 2 \cdot L_{\text{св}} \cdot H_{\text{св}} = 2 \cdot 0,01 \cdot 2,4 = 0,048 \text{ м}^2;$$

– томильной зоны:

$$F_{\text{Т}} = 2 \cdot L_{\text{Т}} \cdot H_{\text{Т}} = 2 \cdot 3,74 \cdot 1,4 = 10,5 \text{ м}^2;$$

– торцевых стен:

$$F_{\text{торц}} = B \cdot H_{\text{Т}} + B \cdot H_{\text{М}}^{\text{коп}} = 1,8 \cdot 1,4 + 1,8 \cdot 0,76 = 3,888 \text{ м}^2;$$

– общая площадь стен:

$$F_{\text{ст}} = F_{\text{мет}} + F_{\text{св}} + F_{\text{Т}} + F_{\text{торц}} = 10,4 + 0,048 + 10,5 + 3,888 = 24,836 \text{ м}^2.$$

При прямолинейном распределении температуры по толщине стены средняя температура шамота равна:

$$t_{\text{ш}} = \frac{t_{\text{кл}}^{\text{вн}} + t'}{2}, \quad (3.5)$$

диатомитового кирпича:

$$t_{\text{д}} = \frac{t_{\text{кл}}^{\text{нар}} + t'}{2}, \quad (3.6)$$

где $t_{\text{кл}}^{\text{вн}} = t_{\text{св}}^{\text{вн}} = t_{\text{г}}^{\text{ср}} = 1147,34 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{кл}}^{\text{нар}} = t_{\text{нар}} - 10 \text{ }^{\circ}\text{C} = 58 - 10 = 48 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

$t' \approx 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – температура на границе слоев.

$$t_{\text{ш}} = \frac{1147,34 + 800}{2} = 973,67 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$t_{\text{д}} = \frac{48 + 800}{2} = 424 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Тогда теплопроводность шамота и диатомитового кирпича:

$$\lambda_{\text{ш}} = 0,835 + 0,58 \cdot 10^{-3} \cdot t_{\text{ш}}, \quad (3.7)$$

$$\lambda_{\text{ш}} = 0,835 + 0,58 \cdot 10^{-3} \cdot 973,67 = 1,3997286 \text{ Вт / (м} \cdot \text{К)};$$

$$\lambda_{\text{д.к}} = 0,154 + 0,314 \cdot 10^{-3} \cdot t_{\text{д}}, \quad (3.8)$$

$$\lambda_{\text{д.к}} = 0,154 + 0,314 \cdot 10^{-3} \cdot 424 = 0,278136 \text{ Вт / (м} \cdot \text{К)};$$

Количество теплоты, теряемое теплопроводностью через стены:

$$Q_{\text{ст}} = \frac{t_{\text{кл}}^{\text{вн}} - t_{\text{в}}}{\frac{\delta_2}{\lambda_{\text{ш}}} + \frac{\delta_3}{\lambda_{\text{д}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{нар}}^{\text{верт}}}} \cdot F_{\text{ст}}, \quad (3.9)$$

$$Q_{\text{ст}} = \frac{1147,34 - 25}{\frac{0,345}{1,3997} + \frac{0,115}{0,278} + \frac{1}{11,91}} \cdot 24,836 = 37,47 \text{ кДж/с}.$$

Полные потери теплоты через кладку составят:

$$Q_{\text{кл}} = Q_{\text{св}} + Q_{\text{ст}}, \quad (3.10)$$

$$Q_{\text{кл}} = 42,51 + 37,47 = 79,98 \text{ кДж/с}.$$

Практическая работа № 4, 5

Расчет основных размеров нагревательных печей

Расчет продолжительности нагрева тел в рабочем пространстве ВТТУ

Пример. Производительность печи $P = 6 \frac{\text{Т}}{\text{ч}}$, удельная производительность печи $H_{\Gamma} = 200 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{ч}}$, $a = 0,25$ м – зазор между заготовками и стенами печи, $b = 0,15$, $\delta = 0,5$, $l = 1,3$ – ширина, толщина и длина заготовки, м, соответственно. Рассчитать основные размеры методической зоны печи и продолжительность нагрева заготовки в методической зоне ВТТУ.

Решение

Расчет проводится для каждого из трех участков методической зоны.

Степень черноты газов:

$$\varepsilon_{\Gamma} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \beta_1, \quad (4.1)$$

где $\varepsilon_{\text{CO}_2}$, $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ - степени черноты углекислого газа и водяных паров, соответственно; определяется по номограммам в зависимости от температуры газа t_{Γ} и произведения $P_i \cdot S_{\text{ЭФ}}$, где P_i – парциальное давление компонента газовой смеси (P_{CO_2} и $P_{\text{H}_2\text{O}}$).

β - поправочный коэффициент на отклонение от закона аддитивности, определяется по графику.

Парциальное давление P_i компонентов газовой смеси можно рассчитать через их объёмные доли:

$$P_{\text{CO}_2} = P_{\text{абс.}} \cdot r_{\text{CO}_2};$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = P_{\text{абс.}} \cdot r_{\text{H}_2\text{O}};$$

$$P_{\text{абс.}} = P_{\text{бар}} - P_{\text{изб.}}$$

где $P_{\text{бар}} = 10^5$ - барометрическое давление.

Принимаем по конструктивным соображениям (разряжение в печи):

$$P_{\text{изб}} = 0,02 \cdot 10^5;$$

$$P_{\text{абс}} = 10^5 - 0,02 \cdot 10^5;$$

$$P_{\text{CO}_2} = 0,1561 \cdot 0,98 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1215 \cdot 0,98 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$P_{\text{CO}_2} \cdot S_{\text{ЭФ}}^{\text{M}} = 0,1561 \cdot 0,98 \cdot 10^5 \cdot 1,51 = 0,153 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot \text{м};$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} \cdot S_{\text{ЭФ}}^{\text{M}} = 0,1215 \cdot 0,98 \cdot 10^5 \cdot 1,51 = 0,119 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot \text{м}.$$

Таблица 4.1

Степень черноты газов

№ участков	$t_{\text{ср}}^{\Gamma}, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon_{\text{CO}_2}$	$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$	ε_{Γ}	$\beta_{\text{H}_2\text{O}}$
I	920	0,136	0,158	0,305	1,07
II	1120	0,127	0,132	0,268	
III	1321	0,114	0,111	0,233	

Приведённый коэффициент излучения в системе газ – кладка – материал определяется для каждого участка методической зоны по формуле:

$$C_{\text{ГКМ}}^{i-\text{M}} = C_0 \cdot \varepsilon_{\text{M}} \cdot \frac{W + 1 - \varepsilon_{\Gamma}}{[\varepsilon_{\text{M}} + \varepsilon_{\Gamma} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{M}})] \cdot \frac{1 - \varepsilon_{\Gamma}}{\varepsilon_{\Gamma}} + W}, \quad (4.2)$$

где $\varepsilon_{\text{M}} = 0,8$ - степень черноты металла;

$C_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ - коэффициент лучеиспускания абсолютно чёрного тела.

I участок:

$$C_{\text{ГКМ}}^{\text{I}} = 5,67 \cdot 0,8 \cdot \frac{3,815 + 1 - 0,305}{[0,8 + 0,305 \cdot (1 - 0,8)] \cdot \frac{1 - 0,305}{0,305} + 3,815} = 3,54 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}.$$

II участок:

$$C_{ГКМ}^{II} = 5,67 \cdot 0,8 \cdot \frac{3,815 + 1 - 0,268}{[0,8 + 0,268 \cdot (1 - 0,8)] \cdot \frac{1 - 0,268}{0,268} + 3,815} = 3,36 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$$

III участок:

$$C_{ГКМ}^{III} = 5,67 \cdot 0,8 \cdot \frac{3,815 + 1 - 0,233}{[0,8 + 0,233 \cdot (1 - 0,8)] \cdot \frac{1 - 0,233}{0,233} + 3,815} = 3,15 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$$

Средний по длине участка методической зоны коэффициент теплоотдачи излучением определяется:

$$\alpha_{\text{изл}}^{i-M} = C_{ГКМ}^{i-M} \cdot \frac{\sqrt{\left[\left(\frac{T_{\Gamma}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{М}}^{\text{нач}}}{100} \right)^4 \right] \cdot \left[\left(\frac{T_{\Gamma}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{М}}^{\text{кон}}}{100} \right)^4 \right]}}{\sqrt{(T_{\Gamma} - T_{\text{М}}^{\text{нач}}) \cdot (T_{\Gamma} - T_{\text{М}}^{\text{кон}})}}, \quad (4.3)$$

где $T_{\text{М}}^{\text{нач}}$ и $T_{\text{М}}^{\text{кон}}$ - соответственно температуры поверхности металла в конце и начале i -того участка методической зоны, К; T_{Γ} - средняя по длине i -того участка методической зоны температура газов.

I участок:

$$T_{\Gamma}^{\text{cp}} = 920 + 273 = 1193 \text{ К};$$

$$T_{\text{М}}^{\text{нач}} = 35 + 273 = 308 \text{ К};$$

$$T_{\text{М}}^{\text{кон}} = 550 + 273 = 823 \text{ К}.$$

$$\alpha_{\text{изл}}^{i-M} = 3,54 \cdot \frac{\sqrt{\left[\left(\frac{1193}{100} \right)^4 - \left(\frac{308}{100} \right)^4 \right] \cdot \left[\left(\frac{1193}{100} \right)^4 - \left(\frac{823}{100} \right)^4 \right]}}{\sqrt{(1193 - 308) \cdot (1193 - 823)}} = 109,97 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

II участок:

$$T_{\Gamma}^{\text{cp}} = 1120 + 273 = 1393 \text{ К};$$

$$T_{\text{М}}^{\text{нач}} = 550 + 273 = 823 \text{ К};$$

$$T_{\text{М}}^{\text{кон}} = 850 + 273 = 1123 \text{ К}.$$

$$\alpha_{\text{изл}}^{i-M} = 3,36 \cdot \frac{\sqrt{\left[\left(\frac{1393}{100}\right)^4 - \left(\frac{823}{100}\right)^4\right] \cdot \left[\left(\frac{1393}{100}\right)^4 - \left(\frac{1123}{100}\right)^4\right]}}{\sqrt{(1393-823) \cdot (1393-1123)}} = 229,68 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

III участок:

$$T_{\Gamma}^{\text{сп}} = 1321 + 273 = 1594 \text{ К};$$

$$T_{\text{М}}^{\text{нач}} = 850 + 273 = 1123 \text{ К};$$

$$T_{\text{М}}^{\text{кон}} = 1060 + 273 = 1333 \text{ К}.$$

$$\alpha_{\text{изл}}^{i-M} = 3,15 \cdot \frac{\sqrt{\left[\left(\frac{1594}{100}\right)^4 - \left(\frac{1123}{100}\right)^4\right] \cdot \left[\left(\frac{1594}{100}\right)^4 - \left(\frac{1333}{100}\right)^4\right]}}{\sqrt{(1594-1123) \cdot (1594-1333)}} = 359,91 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Численное значение безразмерного коэффициента теплоотдачи, это критерий Био:

$$Bi = \frac{\alpha_{\text{изл}} \cdot S}{\lambda_{\text{М}}}, \quad (4.4)$$

где S - характерный размер при двухстороннем нагреве материала.

$$S = 0,5 \cdot \delta = 0,5 \cdot 0,5 = 0,25 \text{ м}.$$

Таким образом, для определения времени нагрева материала необходимо вначале определить значение Bi .

Таблица 4.2

Значения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности стали

№ участков	Средняя температура материала		Ст. 40 $\lambda_{\text{М}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	Ст. 40 $a, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$
	°С	К		
I	292,5	565,5	45,78	$1,146 \cdot 10^{-5}$
II	700	973	30,005	$0,648 \cdot 10^{-5}$
III	955	1228	26,13	$0,528 \cdot 10^{-5}$

$$Bi^I = \frac{109,97 \cdot 0,25}{45,78} = 0,6 > 0,25;$$

$$Bi^{II} = \frac{229,68 \cdot 0,25}{30,005} = 1,91 > 0,25;$$

$$Bi^{III} = \frac{359,91 \cdot 0,25}{26,13} = 3,44 > 0,25.$$

Если $Bi > 0,25$, то для решения задачи нагрева заготовки целесообразно воспользоваться расчётом в условиях нестационарной теплопроводности с граничными условиями третьего рода.

Определяем температурный критерий для поверхности материала:

$$\Theta_{II} = \frac{t_{\Gamma}^i - t_{II}^i}{t_{\Gamma}^i - t_{H}^i}, \quad (4.5)$$

где t_{Γ}^i - средняя температура газов в i -том участке методической зоны.
 t^i, t_{H}^i - текущая и начальная температуры нагреваемого тела на i -том участке методической зоны.

$$\Theta_{II}^I = \frac{920 - 550}{920 - 35} = 0,418;$$

$$\Theta_{II}^{II} = \frac{1120 - 850}{1120 - 550} = 0,473;$$

$$\Theta_{II}^{III} = \frac{1321 - 1060}{1321 - 850} = 0,554.$$

По номограмме для поверхности пластины по значениям Bi и Θ_{II} определяем критерий Фурье – F_0 .

$$I \text{ участок: } Bi^I = 0,6 \quad \Theta_{II}^I = 0,418 \quad F_0^I = 1,4 \quad \Theta_{II}^I = 0,55.$$

$$II \text{ участок: } Bi^{II} = 1,91 \quad \Theta_{II}^{II} = 0,473 \quad F_0^{II} = 0,23 \quad \Theta_{II}^{II} = 0,85.$$

$$III \text{ участок: } Bi^{III} = 3,14 \quad \Theta_{II}^{III} = 0,554 \quad F_0^{III} = 0,04 \quad \Theta_{II}^{III} = 0,98.$$

Определяем коэффициент температуропроводности металла a по формуле:

$$a = \frac{\lambda_M}{C \cdot \rho}, \quad (4.6)$$

где ρ – плотность материала (Ст. 40), кг/м^3 ,

$$\rho^I = 7768,7 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \text{ (при } t=292,5 \text{ }^\circ\text{C)};$$

$$\rho^{II} = 7613 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \text{ (при } t = 700 \text{ }^\circ\text{C)};$$

$$\rho^{III} = 7561,4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \text{ (при } t = 955 \text{ }^\circ\text{C)}.$$

C-массовая теплоёмкость заготовки (Ст. 40), Дж/кг·К.

$$C^I = 0,514 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$C^{II} = 0,6075 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$C^{III} = 0,6536 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Рассчитываем время нагрева материала на участках методической зоны по формуле:

$$t_M^i = \frac{F_0 \cdot S^2}{a}, \quad (4.7)$$

$$t_M^I = \frac{1,4 \cdot 0,25^2}{1,146 \cdot 10^{-5}} = 7635,25 \text{ сек} = 2,12 \text{ ч.}$$

$$t_M^{II} = \frac{0,2 \cdot 0,25^2}{0,648 \cdot 10^{-5}} = 1929 \text{ сек} = 0,54 \text{ ч.}$$

$$t_M^{III} = \frac{0,04 \cdot 0,25^2}{0,528 \cdot 10^{-5}} = 473,48 \text{ сек} = 0,13 \text{ ч.}$$

Полное время нагрева изделия в методической зоне:

$$t_M = t_M^I + t_M^{II} + t_M^{III} = 2,12 + 0,54 + 0,13 = 2,79 \text{ ч.}$$

Площадь пода печи определяется по формуле:

$$F = \frac{P}{H_r} = \frac{6 \cdot 10^3}{200} = 30 \text{ м}^2.$$

Для однорядного варианта расположения заготовок ширина и длина печи равны:

$$B = l + 2a = 1,3 + 2 \cdot 0,25 = 1,8 \text{ м.}$$

$$L = \frac{F}{B} = \frac{30}{1,8} = 16,7 \text{ м.}$$

По конструктивным соображениям высота печи принимается:

В томильной зоне – $H_T = 1,4$ м ;

В сварочной зоне – $H_{св} = 2,4$ м ;

В конце методической – $H_M^K = 0,76$ м .

Средняя высота методической зоны будет равна:

$$H_M^{cp} = 0,5(H_M^{koh} + H_{св}) = 0,5(0,76 + 2,4) = 1,58 \text{ м.}$$

Для обеспечения заданной производительности в печи должно одновременно находиться следующее количество металла:

$$G = P \cdot \tau, \quad (4.8)$$

$$G = 6 \cdot 5,99 = 35,94 \text{ т.}$$

Масса одной заготовки составит:

$$q = \frac{B \cdot \delta \cdot l \cdot \rho}{1000}, \quad (4.9)$$

$$q = \frac{0,15 \cdot 0,5 \cdot 1,3 \cdot 7848,85}{1000} = 0,765 \text{ т.}$$

где ρ - плотность материала $\rho = 7848,85$ кг/м³ (при $t = 35^\circ\text{C}$).

Тогда число заготовок, одновременно находящихся в печи. шт:

$$n = \frac{G}{q} = \frac{35,94}{0,765} = 46,98 \approx 47.$$

При однорядном расположении заготовок:

общая длина печи: $L = B \cdot n = 0,15 \cdot 47 = 7,05$ м ;

ширина печи: $B = l + 2 \cdot a = 1,3 + 2 \cdot 0,25 = 1,8$ м ;

площадь активного пода: $F_a = L \cdot b = 7,05 \cdot 0,15 = 1,06$ м² ;

площадь габаритного пода: $F_a = L \cdot B = 7,05 \cdot 1,8 = 12,69$ м² .

Длину печи L разбиваем на зоны пропорционально времени нагрева:

– длина первой методической зоны:

$$L_M^I = \frac{L}{\tau} \cdot \tau_M^I = \frac{7,05}{5,99} \cdot 2,12 = 2,5 \text{ м};$$

– длина второй методической зоны:

$$L_M^{II} = \frac{L}{\tau} \cdot \tau_M^{II} = \frac{7,05}{5,99} \cdot 0,54 = 0,64 \text{ м};$$

– длина третьей методической зоны:

$$L_M^{III} = \frac{L}{\tau} \cdot \tau_M^{III} = \frac{7,05}{5,99} \cdot 0,13 = 0,15 \text{ м}.$$

Практическая работа № 6

Расчет составляющих тепловых балансов нагревательных (термических) печей

Пример. В стенах камерной печи в качестве тепловой изоляции используется щель шириной $\delta = 50$ мм, заполненная воздухом. Определить тепловые потери через 1 м^2 стенки печи, если температура горячей поверхности $t_{c1} = 730^\circ\text{C}$, холодной $t_{c2} = 400^\circ\text{C}$.

Решение

Эквивалентный коэффициент теплопроводности слоя воздуха может быть вычислен по формуле:

$$\lambda_{\text{эк}} = \lambda \cdot \varepsilon_{\text{к}}.$$

Для вычисления $\varepsilon_{\text{к}}$ определяем величину произведения $(Gr \cdot Pr)$. В качестве определяющей температуры принимаем:

$$\bar{t} = \frac{t_{c1} + t_{c2}}{2} = \frac{730 + 400}{2} = 565^\circ\text{C}.$$

В качестве определяющего размера принимаем ширину щели $5 \cdot 10^{-2}$ м, расчетная разность температур:

$$\Delta t = t_{c1} - t_{c2} = 730 - 400 = 330 \text{ град.}$$

При определяющей температуре $t = 565^\circ\text{C}$.

$$\nu_{\text{в}} = 89,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}, \quad \lambda_{\text{в}} = 6,0 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}), \quad Pr_{\text{в}} = 0,703,$$

$$\beta_{\text{в}} = \frac{1}{t + 273} = \frac{1}{603} \text{ 1/град.}$$

Вычисляем произведение

$$(Gr \cdot Pr)_{\text{в}} = 9,8 \frac{330(5 \cdot 10^{-2})^3}{603(89,5 \cdot 10^{-6})^2} \cdot 0,703 = 5,95 \cdot 10^4.$$

Коэффициент конвективной теплоотдачи при значении $(Gr \cdot Pr) > 10^3$ находим по формуле:

$$\varepsilon_{\text{к}} = 0,18(Gr \cdot Pr)^{0,25} = 0,18(5,95 \cdot 10^4)^{0,25} = 2,84.$$

Тогда: $\lambda_{\text{эк}} = 2,84 \cdot 6,0 \cdot 10^{-2} = 17,05 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}).$

$$q = \frac{\lambda_{\text{эк}}}{\delta} (t_{c1} - t_{c2}) = \frac{17,05 \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 10^{-2}} 330 = 1126 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Практическая работа № 7

Расчеты материальных балансов ВТТУ

Пример. Для смеси коксового и доменного газов с теплотой сгорания $Q_{нсм}^p = 6,6$ МДж/м³ определить расход воздуха, количество и состав продуктов сгорания. А также составить материальный баланс продуктов горения в ВТТУ.

Решение

Примем состав сухих газов, приведенный в табл. 7.1

Таблица 7.1

Состав сухих газов, %

Газ	CO_2^c	CO^c	H_2^c	N_2^c	CH_4^c	$C_2H_4^c$	O_2^c
Коксовый	2,35	7,44	56,42	3,97	26,05	3,14	0,63
Доменный	10,7	28,5	2,5	58,2	0,1	—	—

Принимаем влажность коксового газа $W_{\text{кокс}} = 25$ г/м³, а влажность доменного газа $W_{\text{дом}} = 30$ г/м³ и рассчитаем состав влажных газов по формуле:

$$x_v = x^c \cdot \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot W} \%;$$

$$x_v = x_{\text{дом}}^c \cdot \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 30} = 0,964 \cdot x_{\text{дом}}^c;$$

$$x_v = x_{\text{кокс}}^c \cdot \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 25} = 0,97 \cdot x_{\text{кокс}}^c.$$

Состав влажных газов сведем в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Состав влажных газов, %

Газ	CO_2^b	CO^b	H_2^b	N_2^b	CH_4^b	$C_2H_4^b$	O_2^b	H_2O
Коксовый	2,28	7,21	54,72	3,85	25,27	3,04	0,61	3,02
Доменный	10,3	27,5	2,41	56,1	0,09	—	—	3,6

Определяем теплоту сгорания газов:

$$Q_{\text{H}_{\text{кокс}}}^{\text{P}} = 12645 \cdot 0,0721 + 10760 \cdot 0,5472 + 35800 \cdot 0,2527 + 59037 \cdot 0,00304 =$$

$$= 17610 \text{ кДж/м}^3 ;$$

$$Q_{\text{H}_{\text{дом}}}^{\text{P}} = 12645 \cdot 0,275 + 10760 \cdot 0,00241 + 35800 \cdot 0,009 = 3780 \text{ кДж/м}^3 .$$

Долю доменного газа в смеси находим по формуле:

$$a = \frac{Q_{\text{H}_{\text{кокс}}}^{\text{P}} - Q_{\text{H}_{\text{см}}}^{\text{P}}}{Q_{\text{H}_{\text{кокс}}}^{\text{P}} - Q_{\text{H}_{\text{см}}}^{\text{P}}} = \frac{17610 - 6600}{17610 - 3780} = 0,796 .$$

Рассчитывая состав смеси, находим состав смешенного газа, %:

$$CO_{2\text{см}} = 10,3 \cdot 0,796 + 2,28 \cdot 0,204 = 8,68$$

$$CO_{\text{см}} = 27,5 \cdot 0,796 + 7,21 \cdot 0,204 = 23,35$$

$$N_{2\text{см}} = 56,1 \cdot 0,796 + 3,85 \cdot 0,204 = 45,40$$

$$H_{2\text{см}} = 2,41 \cdot 0,796 + 54,72 \cdot 0,204 = 13,10$$

$$CH_{4\text{см}} = 0 \cdot 0,796 + 25,27 \cdot 0,204 = 5,23$$

$$C_2H_{4\text{см}} = 0 \cdot 0,796 + 3,04 \cdot 0,204 = 0,62$$

$$O_{2\text{см}} = 10,3 \cdot 0,796 + 0,61 \cdot 0,204 = 0,12$$

$$H_2O_{\text{см}} = 3,6 \cdot 0,796 + 3,02 \cdot 0,204 = 3,5$$

$$\Sigma = 100$$

Расход воздуха, состав и количество продуктов сгорания приводим в табличной форме. Расчет ведем на 100 м^3 газа при нормальных условиях (табл. 7.3).

Таблица 7.3

Расход воздуха, состав и количество продуктов сгорания смеси газов при н.у.

Топливо			Воздух, м ³			Образуется продуктов горения, м ³					
Составляющие	Содержание, %	Количество, м ³	O ₂	N ₂	Всего	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	Всего	
CO ₂	8,68	8,68	–	30,425·3,762=115,125	30,425+115,125=145,550	8,68	–	–	115,125 из воздуха и 45,40 из топлива		
CO	23,35	23,35	11,675			23,35	–	–			
CH ₄	5,23	5,23	10,46			5,23	10,460	–			
C ₂ H ₄	0,62	0,62	1,86			1,24	1,240	–			
H ₂	13,10	13,10	6,55			–	13,10	–			
N ₂	45,40	45,40	–			–	–	–			
H ₂ O	3,50	3,50	–			–	3,50	–			
O ₂	0,12	0,12	-0,12			–	–	–			
α = 1	Σ	100,0	100,0	30,425	115,125	145,550	38,50	28,30	–	160,525	227,32
	%	–	–	21,0	79,0	100,0	16,93	12,45	–	70,62	100,0
α = 1,1	Σ	100,0	100,0	33,52	126,588	160,108	38,50	28,30	3,093	171,988	241,88
	%	–	–	21,0	79,0	100,0	15,90	11,70	1,28	71,12	100,0

Поступило 100м^3 газа, в том числе, кг:

CO_2	$8,68 \cdot 44 = 382,0$
CO	$23,35 \cdot 28 = 653,0$
CH_4	$5,23 \cdot 16 = 83,50$
C_2H_4	$0,62 \cdot 28 = 17,35$
H_2	$13,10 \cdot 2 = 26,20$
N_2	$45,40 \cdot 28 = 1268,0$
H_2O	$3,50 \cdot 18 = 63,0$
O_2	$0,12 \cdot 32 = 3,84$
Всего	2496,89

Поступило $241,883\text{м}^3$ продуктов сгорания, в том числе, кг:

CO_2	$38,50 \cdot 44 = 1692,0$
O_2	$3,095 \cdot 32 = 99,0$
H_2O	$28,30 \cdot 18 = 510,0$
N_2	$171,988 \cdot 28 = 4813,0$
Всего	7114,0

Количество воздуха составляет $160,108\text{м}^3$, в том числе: $33,52 \cdot 32 = 1071,0$ кг O_2 и $126,588 \cdot 28 = 3545,0$ кг N_2 всего 4616,0 кг. Итого поступило газа и воздуха 7112,89 кг.

Расхождение, определяемое погрешностью расчета, равно 1,11кг.

Литература

1. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки: учеб. пособие для вузов; под ред. А. П. Лисиенко. – Минск: Высшая школа, 1988. – 231 с.
2. Тимошпольский, В.И. Промышленные теплотехнологии: учебное пособие для вузов / В.И. Тимошпольский, А.П. Несенчук, И.А. Трусова; под общ. ред. А.П. Несенчука и В.И. Тимошпольского. – Минск: Высшая школа, 1998. – Кн.3. – 422 с.
3. Тимошпольский, В.И. Промышленные теплотехнологии: учеб. пособие для вузов / В.И. Тимошпольский, А.П. Несенчук, И.А. Трусова; под общ.ред. А.П. Несенчука и В.И. Тимошпольского. – Минск: Высшая школа, 1998. – Кн.5. – 422 с.
4. Теплотехника металлургического производства: учеб. пособие для вузов; под ред. В. А. Кривандина. – Москва: МИСИС, 2002. – 321 с.
5. Василькова, С.Б. Расчет нагревательных и термических печей: справочник / С.Б. Василькова, М.М. Генкина, В.Л. Гусовский. – Москва: Металлургия, 1983. – 428 с.
6. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: справочник / В.А. Григорьев [и др.]; под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – Кн. 4. – 586 с.
7. Теплотехнические расчеты металлургических печей: учебное пособие для вузов; под ред. А.С. Телегина. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Металлургия, 1982. – 358 с.
8. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: справочник // Справ. серия «Теплоэнергетика и теплотехника». – Москва : Энергоиздат, 1982. – 510 с.
9. Котляр, Я. Н. Методы и задачи тепломассообмена: учеб. пособие для студентов вузов / Я.Н. Котляр, В.Д. Совершенный. – Москва: Машиностроение, 1987. – 318 с.

Содержание

Практическая работа № 1. Конструктивные схемы рабочего пространства ВТТУ.....	3
Практическая работа № 2. Схемы и устройства использования теплоты теплотехнологических продуктов и отходов, охлаждаемых элементов установок.....	5
Практическая работа № 3. Расчет внешнего теплообмена в рабочем пространстве ВТТУ.....	10
Практическая работа № 4, 5. Расчет основных размеров нагревательных печей. Расчет продолжительности нагрева тел в рабочем пространстве ВТТУ.....	14
Практическая работа № 6. Расчет составляющих тепловых балансов нагревательных (термических) печей.....	22
Практическая работа № 7. Расчеты материальных балансов ВТТУ.....	23
Литература.....	27

Вальченко Николай Адамович

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПРОЦЕССЫ
И УСТАНОВКИ**

**Практикум
для слушателей специальности
переподготовки 1-43 01 71 «Техническая
эксплуатация теплоэнергетических установок
и систем теплоснабжения»
заочной формы обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 02.02.21.

Рег. № 88Е.

<http://www.gstu.by>