

Министерство образования Республики Беларусь

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

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и экология»

Н. А. Вальченко

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ
ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
УСТАНОВКИ**

ПРАКТИКУМ

**по одноименной дисциплине
для студентов специальности 1-43 01 05
«Промышленная теплоэнергетика»
дневной и заочной форм обучения**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2019

УДК 621.1(075.8)
ББК 34.651.01-1я73
В16

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 10 от 29.06.2018 г.)*

Рецензент: директор института повышения квалификации и переподготовки
ГГТУ им. П. О. Сухого канд. техн. наук, доц. *Ю. Н. Колесник*

Вальченко, Н. А.
В16 Высокотемпературные теплотехнологические установки : практикум по одной дисциплине для студентов специальности 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» днев. и заоч. форм обучения / Н. А. Вальченко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – 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: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-535-404-9.

Содержит практические работы, составленные в соответствии с типовой программой. Предназначен для совершенствования знаний и навыков при изучении вопросов расчета режимных параметров и эксплуатации высокотемпературных установок промышленных предприятий.

Для студентов специальности 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.1(075.8)
ББК 34.651.01-1я73

ISBN 978-985-535-404-9

© Вальченко Н. А., 2019
© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2019

Практическая работа № 1

Конструктивные схемы рабочего пространства высокотемпературных теплотехнологических установок

В высокотемпературных теплотехнологических установках (ВТТУ) 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 грубоизмельченных материалов в условиях псевдооживления);
- взвешенного слоя (тепловая обработка измельченных 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 двух 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 семь основных теплотехнических схем камер ОТО ВТТУ.

Теплотехнические схемы камер ОТО ВТТУ

Название тепло-технолог. принципа	Плотный слой	Кипящий слой	Взвешенный слой	Погруженный слой	Излучающий факел		
					Закрученный поток газов	Прямоточный, рециркуляционный, набегающий поток газов	
Схема							
$K_V = \frac{V_{св}}{V_{з.м}}$	~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	~	~	-	>0,0	0,0	0,0	0,0

Примечание. Символы $V_{з.м}$, $V_{св}$ – соответственно, объем 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 объема технологической камеры, относительное развитие ее поверхности ограждения; m – порозность материала; K_d – коэффициент, отображающий отношение фактической массы обрабатываемого материала к его теоретической массе.

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 °С. Средняя скорость движения дыма при 0 °С составляет $u_{ж,0} = 3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Температура дыма перед входом в рекуператор $t_{ж1} = 900$ °С, после рекуператора $t_{ж2} = 600$ °С.

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:

$$q = \alpha(t_{ж} - t_{с}). \quad (2.1)$$

Средняя температура дымовых газов в рекуператоре определяется:

$$t_{ж} = 0,5(t_{ж1} + t_{ж2}) = 0,5(900 + 600) = 750 \text{ °С.}$$

Средний для шахматного пучка коэффициент конвективной теплоотдачи определяем по формуле $\alpha = \alpha_0 \eta_1 \eta_2 \eta_3$, $\frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{град})}$, используя для этого номограмму на рис. 2.1.

При $\frac{S_1}{d} = 2,5$ величина $\eta_1 = 1,16$, при $\frac{S_1}{d} = 2,0$ 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 $t_{ж} = 750$ °С истинная скорость движения дымовых газов:

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

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

Отсюда

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

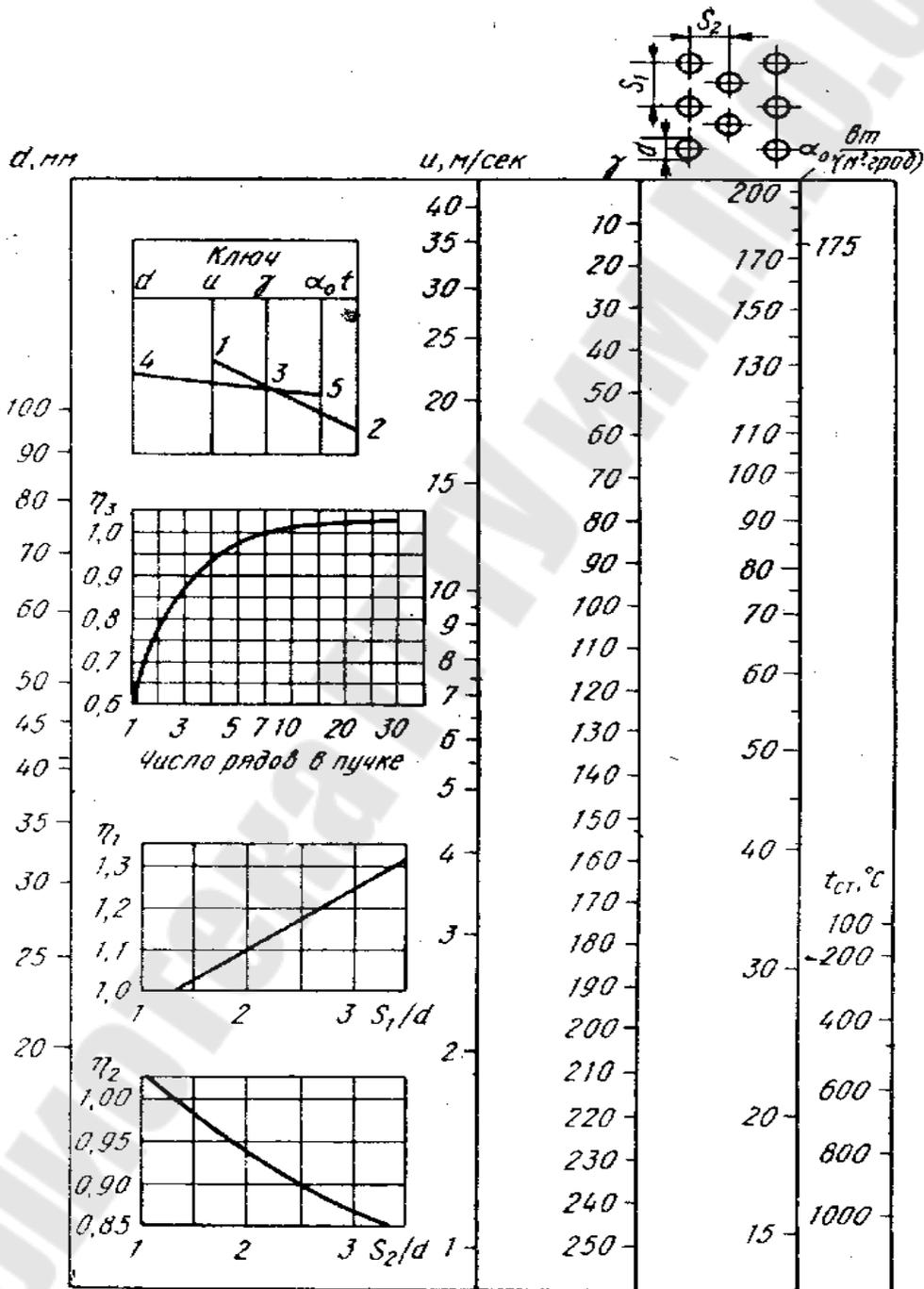


Рис. 2.1. Номограмма для определения коэффициента теплоотдачи конвекцией шахматных пучков труб

Средняя плотность теплового потока равна:

$$q = 54(750 - 40) = 18900 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Общий тепловой поток от дымовых газов к поверхности труб рекуператора:

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

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

$$Q = \alpha_1 (t_{\text{ж1}} - t_{\text{с1}}) \pi d l n, \quad (2.2)$$

где α_1 – коэффициент конвективной теплоотдачи от дыма к первому ряду труб, $\frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{град})}$; $t_{\text{ж1}}$ – температура дыма на входе в рекуператор, °С; $t_{\text{с1}}$ – температура стенки первого ряда труб, °С.

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

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

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.

$$t_{\text{ж1}} - t_{\text{с1}} = t_{\text{ж2}} - t_{\text{с2}} = t_{\text{ж}} - t_{\text{с}} = 750 - 400 = 350 \text{ }^\circ\text{С},$$

отсюда $t_{\text{с1}} = 550 \text{ }^\circ\text{С}$, $t_{\text{с2}} = 250 \text{ }^\circ\text{С}$.

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

$$\Delta t_{\text{с}} = \frac{t_{\text{с1}} - t_{\text{с2}}}{m - 1} = \frac{550 - 250}{8 - 1} = 42,9.$$

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

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = 0,41\text{Re}_{\text{ж}}^{0,6}\text{Pr}_{\text{ж}}^{0,33}. \quad (2.3)$$

В качестве определяющей температуры в этой формуле принимается средняя температура дыма $t_{\text{ж}} = 750$ °С, в качестве определяющего размера – диаметр труб d . Этой температуре соответствуют следующие теплофизические параметры продуктов сгорания:

$$\nu_{\text{ж}} = 131,8 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}, \quad \lambda_{\text{ж}} = 8,29 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}, \quad \text{Pr} = 0,6.$$

Критерий Рейнольдса:

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

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

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

Коэффициент теплоотдачи к третьему ряду труб рекуператора:

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

Коэффициент теплоотдачи ко второму ряду труб шахматного пучка:

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

Коэффициент теплоотдачи к первому ряду труб:

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

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

$$Q_1 = \alpha_1(t_{\text{ж1}} - t_{\text{с1}})\pi d l n = 43(900 - 550)3,14 \cdot 5,7 \cdot 10^{-2} \cdot 2,94 \cdot 7 = 5,56 \cdot 10^4 \text{ Вт};$$

второму ряду труб:

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

третьему ряду труб:

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

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

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

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

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

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

Практическая работа № 3

Расчет внешнего теплообмена в рабочем пространстве высокотемпературных теплотехнологических установок

Пример. Рассчитать потери через свод и стены печи. Потерями теплоты через под пренебрегаем. Площадь свода $F_{\text{св}}$ равна площади габаритного пода печи, т. е. $F_{\text{r}} = 12,69 \text{ м}^2$; 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.

$$t_{\Gamma}^{\text{CP}} = \frac{t_{\text{ОТХ}} + t_{\text{СВ.ЗОНЫ}} + t_{\text{ТОМ.ЗОНЫ}}}{3} = t_{\text{СВ}}^{\text{ВН}}, \quad (3.1)$$

$$t_{\Gamma}^{\text{CP}} = t_{\text{СВ}}^{\text{ВН}} = \frac{820 + 1422 + 1200}{3} = 1147,34 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

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:

$$\lambda_{\text{ш}} = 0,835 + 0,58t_{\text{ш.св}} \cdot 10^{-3}, \quad (3.3)$$

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

Тогда потери через свод составят:

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

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

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

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

$$+ 1,35 \cdot 10^{-6}(58 - 30)^3 = 12,18 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Для вертикальной стенки:

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

$$\alpha_{\text{нар}}^{\text{верт}} = 9,5 + 98,15 \cdot 10^{-3} (58 - 30) - 4,74 \cdot 10^{-4} (58 - 30)^2 + \\ + 1,74 \cdot 10^{-6} (58 - 30)^3 = 11,91 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Для пода печи:

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

$$\alpha_{\text{нар}}^{\text{под}} = 9,3 + 91,5 \cdot 10^{-3} (58 - 30) - 3,88 \cdot 10^{-4} (58 - 30)^2 + \\ + 1,37 \cdot 10^{-6} \cdot (58 - 30)^3 = 11,588 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Потери через свод:

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

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:

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

– сварочной зоны:

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

– томильной зоны:

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

– торцевых стен:

$$F_{\text{торц}} = BH_T + BH_M^{\text{КОН}} = 1,8 \cdot 1,4 + 1,8 \cdot 0,76 = 3,888^2 \text{ м}^2;$$

– общая площадь стен:

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

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:

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

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

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

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

Количество теплоты, теряемое теплопроводностью через стены:

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

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

Полные потери теплоты через кладку составят:

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

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

Практическая работа № 4, 5

Расчет основных параметров нагревательных печей. Расчет продолжительности нагрева тел в рабочем пространстве высокотемпературных теплотехнологических установок

Пример. Производительность печи $P = 6 \frac{\text{т}}{\text{ч}}$, удельная производительность печи $H_{\text{г}} = 200 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{ч}}$, $a = 0,25$ 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:

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

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 $t_{\text{г}}$ и произведения $P_i S_{\text{ЭФ}}$, 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 объемные доли:

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

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

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

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

Принимаем по конструктивным соображениям (разряжение в печи):

$$P_{\text{изб}} = 0,02 \cdot 10^5;$$

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

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

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

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

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

Таблица 4.1

Степень черноты газов

Номер участков	$t_{\text{ср}}^r, \text{ }^\circ\text{C}$	ϵ_{CO_2}	$\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}$	$\epsilon_{\text{г}}$	$\beta_{\text{H}_2\text{O}}$
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	

Приведенный коэффициент излучения в системе «газ–кладка–материал» определяется для каждого участка методической зоны по формуле

$$C_{\text{Г-К-М}}^{i-\text{М}} = C_0 \epsilon_{\text{М}} \frac{W + 1 - \epsilon_{\text{Г}}}{[\epsilon_{\text{М}} + \epsilon_{\text{Г}}(1 - \epsilon_{\text{М}})] \frac{1 - \epsilon_{\text{Г}}}{\epsilon_{\text{Г}}} + W}, \quad (4.2)$$

где $\epsilon_{\text{М}} = 0,8$ – степень черноты металла; $C_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела.

I участок:

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

II участок:

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

III участок:

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

Средний по длине участка методической зоны коэффициент теплоотдачи излучением определяется:

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

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

I участок:

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

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

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

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

II участок:

$$T_{\Gamma}^{\text{CP}} = 1120 + 273 = 1393 \text{ K};$$

$$T_{\text{M}}^{\text{нач}} = 550 + 273 = 823 \text{ K};$$

$$T_{\text{M}}^{\text{кон}} = 850 + 273 = 1123 \text{ K}.$$

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

III участок:

$$T_{\Gamma}^{\text{CP}} = 1321 + 273 = 1594 \text{ K};$$

$$T_{\text{M}}^{\text{нач}} = 850 + 273 = 1123 \text{ K};$$

$$T_{\text{M}}^{\text{кон}} = 1060 + 273 = 1333 \text{ K}.$$

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

Численное значение безразмерного коэффициента теплоотдачи, это критерий Био:

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

где S – характерный размер при двухстороннем нагреве материала, $S = 0,5\delta = 0,5 \cdot 0,5 = 0,25$ м.

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

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

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

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

**Значения коэффициентов теплопроводности
и температуропроводности стали**

Номер участков	Средняя температура материала		Ст. 40 $\lambda_m, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	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	$0,528 \cdot 10^{-5}$

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

Определяем температурный критерий для поверхности материала:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Определяем коэффициент температуропроводности металла a по формуле

$$a = \frac{\lambda_{\text{м}}}{C\rho}, \quad (4.6)$$

где ρ – плотность материала (Ст. 40), $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$,

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

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

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

C – массовая теплоемкость заготовки (Ст. 40), $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

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

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

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

Рассчитываем время нагрева материала на участках методической зоны по формуле

$$t_{\text{м}}^i = \frac{FoS^2}{a}, \quad (4.7)$$

откуда $t_{\text{м}}^{\text{I}} = \frac{1,4 \cdot 0,25^2}{1,146 \cdot 10^{-5}} = 7635,25 \text{ с} = 2,12 \text{ ч};$

$$t_{\text{м}}^{\text{II}} = \frac{0,2 \cdot 0,25^2}{0,648 \cdot 10^{-5}} = 1929 \text{ с} = 0,54 \text{ ч};$$

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

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

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

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 – $H_T = 1,4 \text{ м}$;

– в сварочной зоне – $H_{CB} = 2,4 \text{ м}$;

– в конце методической зоны – $H_M^{\text{кон}} = 0,76 \text{ м}$.

Средняя высота методической зоны будет равна:

$$H_M^{\text{ср}} = 0,5(H_M^{\text{кон}} + H_{CB}) = 0,5(0,76 + 2,4) = 1,58 \text{ м.}$$

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

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

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

Масса одной заготовки составит:

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

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

где ρ – плотность материала, $\rho = 7848,85 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ (при $t = 35 \text{ }^\circ\text{C}$).

Тогда число заготовок, одновременно находящихся в печи, штук:

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

При однорядном расположении заготовок:

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

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

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

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

Длину печи L разбиваем на зоны пропорционально времени нагрева:

– длина первой методической зоны:

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

– длина второй методической зоны:

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

– длина третьей методической зоны:

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

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 м² стенки печи, если температура горячей поверхности $t_{c1} = 730$ °С, холодной $t_{c2} = 400$ °С.

Решение

Эквивалентный коэффициент теплопроводности слоя воздуха может быть вычислен по формуле

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

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

$$\bar{t} = \frac{t_{c1} + t_{c2}}{2} = \frac{730 + 400}{2} = 565 \text{ °С}.$$

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 $t = 565$ °С;

$$\nu_B = 89,5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}, \quad \lambda_B = 6,0 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}, \quad \text{Pr}_B = 0,703,$$

$$\beta_B = \frac{1}{t + 273} = \frac{1}{603} \frac{1}{\text{град}}.$$

Вычисляем произведение:

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

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

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

$$\text{Тогда } \lambda_{\text{ЭК}} = 2,84 \cdot 6,0 \cdot 10^{-2} = 17,05 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}},$$

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

Практическая работа № 7

Расчеты материальных балансов высокотемпературных теплотехнологических установок

Пример. Для смеси коксового и доменного газов с теплотой сгорания $Q_{\text{нсм}}^p = 6,6 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$ 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 ₂ H 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 $W_{\text{кокс}} = 25 \frac{\Gamma}{\text{М}^3}$, а влажность доменного газа $W_{\text{дом}} = 30 \frac{\Gamma}{\text{М}^3}$ и рассчитаем состав влажных газов по формуле

$$x_{\text{в}} = x^{\text{с}} \frac{100}{100 + 0,1242W} \%,$$

откуда

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

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

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 ₂ H ₄ ^B	O ₂ ^B	H ₂ O
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:

$$Q_{\text{H}_{\text{кокс}}}^{\text{p}} = 12645 \cdot 0,0721 + 10760 \cdot 0,5472 + 35800 \cdot 0,2527 + \\ + 59037 \cdot 0,00304 = 17610 \frac{\text{кДж}}{\text{М}^3};$$

$$Q_{H_{\text{ДОМ}}}^p = 12645 \cdot 0,275 + 10760 \cdot 0,00241 + \\ + 35800 \cdot 0,009 = 3780 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}.$$

Долю доменного газа в смеси находим по формуле

$$a = \frac{Q_{H_{\text{КОКС}}}^p - Q_{H_{\text{СМ}}}^p}{Q_{H_{\text{КОКС}}}^p - Q_{H_{\text{СМ}}}^p} = \frac{17610 - 6600}{17610 - 3780} = 0,796.$$

Рассчитывая состав смеси, находим состав смешенного газа, %:

$$\text{CO}_{2_{\text{СМ}}} = 10,3 \cdot 0,796 + 2,28 \cdot 0,204 = 8,68;$$

$$\text{CO}_{\text{СМ}} = 27,5 \cdot 0,796 + 7,21 \cdot 0,204 = 23,35;$$

$$\text{N}_{2_{\text{СМ}}} = 56,1 \cdot 0,796 + 3,85 \cdot 0,204 = 45,40;$$

$$\text{H}_{2_{\text{СМ}}} = 2,41 \cdot 0,796 + 54,72 \cdot 0,204 = 13,10;$$

$$\text{CH}_{4_{\text{СМ}}} = 0 \cdot 0,796 + 25,27 \cdot 0,204 = 5,23;$$

$$\text{C}_2\text{H}_{4_{\text{СМ}}} = 0 \cdot 0,796 + 3,04 \cdot 0,204 = 0,62;$$

$$\text{O}_{2_{\text{СМ}}} = 10,3 \cdot 0,796 + 0,61 \cdot 0,204 = 0,12;$$

$$\text{H}_2\text{O}_{\text{СМ}} = 3,6 \cdot 0,796 + 3,02 \cdot 0,204 = 3,5;$$

$$\Sigma = 100.$$

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	–	
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	–			–	–	–	–	и 45,40 из топлива	–
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 100 м^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 1,11 кг.

Литература

1. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки : учеб. пособие для вузов / под ред. А. П. Лисиенко. – Минск : Высш. шк., 1988. – 231 с.

2. 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 : Высш. шк., 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 : Высш. шк., 1998. – Кн. 5. – 422 с.

4. Теплотехника металлургического производства : учеб. пособие для вузов ; под ред. В. А. Кривандина. – М. : МИСИС, 2002. – 321 с.

5. Василькова, С. Б. Расчет нагревательных и термических печей : справочник / С. Б. Василькова, М. М. Генкина, В. Л. Гусовский. – М. : Металлургия, 1983. – 428 с.

6. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника : справочник / В. А. Григорьев [и др.] ; под общ. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – Кн. 4. – 586 с.

7. Теплотехнические расчеты металлургических печей : учеб. пособие для вузов / под ред. А. С. Телегина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1982. – 358 с.

8. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент : справочник // Справ. серия «Теплоэнергетика и теплотехника». – М. : Энергоиздат, 1982. – 510 с.

9. Котляр, Я. Н. Методы и задачи тепломассообмена : учеб. пособие для студентов вузов / Я. Н. Котляр, В. Д. Совершенный. – М. : Машиностроение, 1987. – 318 с.

Содержание

<i>Практическая работа № 1. Конструктивные схемы рабочего пространства высокотемпературных теплотехнологических установок</i>	3
<i>Практическая работа № 2. Схемы и устройства использования теплоты теплотехнологических продуктов и отходов охлаждаемых элементов установок</i>	5
<i>Практическая работа № 3. Расчет внешнего теплообмена в рабочем пространстве высокотемпературных теплотехнологических установок</i>	9
<i>Практическая работа № 4, 5. Расчет основных параметров нагревательных печей. Расчет продолжительности нагрева тел в рабочем пространстве высокотемпературных теплотехнологических установок</i>	13
<i>Практическая работа № 6. Расчет составляющих тепловых балансов нагревательных (термических) печей</i>	20
<i>Практическая работа № 7. Расчеты материальных балансов высокотемпературных теплотехнологических установок</i>	21
Литература	26

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

Вальченко Николай Адамович

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ
ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
УСТАНОВКИ**

**Практикум
по одноименной дисциплине
для студентов специальности 1-43 01 05
«Промышленная теплоэнергетика»
дневной и заочной форм обучения**

Электронный аналог печатного издания

Редактор *А. В. Власов*
Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 29.03.19.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,57.

Изд. № 31.

<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение
Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого.
Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя
печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.
пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель