

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
“ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ”

КАФЕДРА «ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕПЛОФИЗИКА»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

для проведения практических занятий и выполнения самостоятельной работы
студентов (СРС) по дисциплине «Спецвопросы проектирования тепловых
режимов печных агрегатов»

(для студентов направлений подготовки 22.04.02 «Металлургия» профиля
«Промышленная теплотехника»
авторов Курбатова Ю.Л., Новиковой Е.В., Заика А.А.)

Донецк – 2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
“ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ”

КАФЕДРА «ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕПЛОФИЗИКА»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

для проведения практических занятий и выполнения самостоятельной работы
студентов (СРС) по дисциплине «Спецвопросы проектирования тепловых
режимов печных агрегатов»

(для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки
22.04.02 «Металлургия» магистерской программы
«Промышленная теплотехника» Курбатова Ю.Л., Новиковой Е.В., Заика А.А.)

Рассмотрено
на заседании кафедры
«Техническая теплофизика»
Протокол № 9 от 03.04.2017 г.

Донецк – 2017

УДК 669.04 (075.8)

Методические указания для проведения практических занятий и выполнения СРС по дисциплине «Спецвопросы проектирования тепловых режимов печных агрегатов» / Курбатов Ю.Л., Новикова Е.В., Заика А.А. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – 31 с.

Методические указания для проведения практических занятий и выполнения самостоятельной работы студентов (СРС) по дисциплине «Спецвопросы проектирования тепловых режимов печных агрегатов». Методические указания содержат материалы для проведения практических занятий и материалы для руководства самостоятельной работой студентов.

Составили:

проф., к.т.н. Курбатов Ю.Л.

доц. Новикова Е.В.

ассист. Заика А.А.

Рецензент:

ст. пр. Н.В. Колесниченко

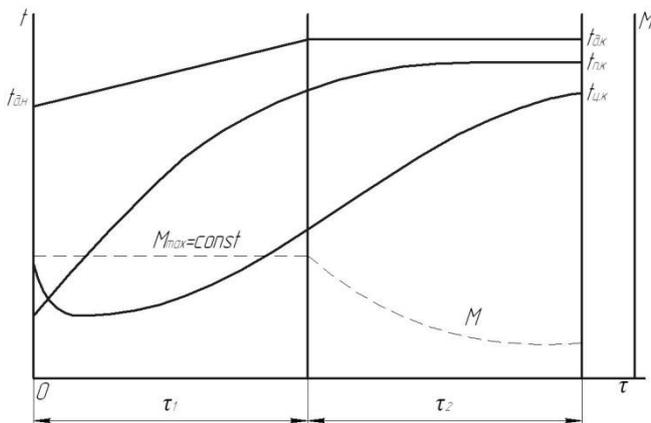
СОДЕРЖАНИЕ

1. Расчёт тепловой мощности регенеративного нагревательного колодца	5
2. Расчёт тепловой мощности рекуперативного нагревательного колодца	7
3. Расчёт тепловой мощности камерной печи с выкатным подом	9
4. Расчёт тепловой мощности роликовой проходной печи	13
5. Расчётная работа	19

Задача №1

Определить тепловую мощность регенеративного нагревательного колодца и расход доменного газа в начале нагрева слитков горячего посада для условий: поверхность нагрева слитков $F_M = 48 \text{ м}^2$; температура дымовых газов $t_{\text{д}} = 1000^\circ\text{С}$; начальная температура поверхности металла $t_{\text{п.н.}} = 800^\circ\text{С}$; температура подогрева топлива $t_{\text{т}} = 450^\circ\text{С}$; воздуха $t_{\text{в}} = 750^\circ\text{С}$; теплота сгорания доменного газа $Q_{\text{Н}}^{\text{р}} = 3,98 \text{ МДж/м}^3$; тепловые потери составляют 40% от тепловой мощности, усвоенной металлом. Приведенная степень черноты системы $\varepsilon_{\text{м}} = 0,4$; коэффициент расхода воздуха $\alpha = 1,1$; теплоемкость всех газовых сред принять $C_{\text{т}} = C_{\text{в}} = C_{\text{д}} = 1,4 \text{ кДж/(м}^3\text{К)}$. теоретический объем воздуха и продуктов сгорания рассчитать по эмпирическим формулам: $L_0 = 0,21 \cdot Q_{\text{Н}}^{\text{р}}$; $V_{\text{д}} = 0,17 \cdot Q_{\text{Н}}^{\text{р}} + 1,0 + (\alpha - 1) \cdot L_0$.

Решение



1. Мгновенную тепловую мощность печи периодического действия можно определить по формуле:

$$M = \frac{Q_{\text{усв}} + Q_{\text{пот}}}{\eta}, \text{ Вт,}$$

где $Q_{\text{усв}}$ – тепловая мощность, усвоенная металлом, Вт;

$Q_{\text{пот}}$ – мощность тепловых потерь, Вт;

η – коэффициент использования теплоты топлива.

2. Усвоенная тепловая мощность и мощность тепловых потерь

$$Q_{\text{усв}} = q_{\text{м}} \cdot F_{\text{м}};$$

- плотность теплового потока

$$q_{\text{м}} = \varepsilon_{\text{м}} \cdot C_0 \left(\left(\frac{t_{\text{д.н.}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{п.н.}} + 273}{100} \right)^4 \right) =$$

$$= 0,4 \cdot 5,67 \left(\left(\frac{1000 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{800 + 273}{100} \right)^4 \right) = 29497 \text{ Вт/м}^2;$$

- усвоенная тепловая мощность

$$Q_{\text{усв}} = 29497 \cdot 48 = 1415856 = 1,4 \text{ МВт};$$

- мощность тепловых потерь

$$Q_{\text{пот}} = 0,4 \cdot Q_{\text{усв}} = 0,4 \cdot 1,4 = 0,56 \text{ МВт};$$

3. Коэффициент использования теплоты топлива:

$$\eta = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{п}} + Q_{\text{ф.в.}} + Q_{\text{ф.т.}} - Q_{\text{ух}}}{Q_{\text{н}}^{\text{п}}}$$

- физическая теплота топлива:

$$Q_{\text{ф.т.}} = 1 \cdot C_{\text{т}} \cdot t_{\text{т}} = 1 \cdot 1,4 \cdot 450 = 630 \text{ кДж/м}^3 = 0,63 \text{ МДж/м}^3;$$

- физическая теплота воздуха

$$Q_{\text{ф.в.}} = L_{\text{д}} \cdot C_{\text{в}} \cdot t_{\text{в}}, \text{ Дж/м}^3;$$

- действительный объем воздуха:

$$L_{\text{д}} = \alpha \cdot L_0;$$

$$L_0 = 0,21 \cdot Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 0,21 \cdot 3,98 = 0,836 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$L_{\text{д}} = 1,1 \cdot 0,836 = 0,92 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$Q_{\text{ф.в.}} = 0,92 \cdot 1,4 \cdot 750 = 966 \text{ кДж/м}^3 = 0,97 \text{ МДж/м}^3;$$

- физическая теплота уходящих продуктов сгорания (дыма):

$$Q_{\text{ух}} = V_{\text{д}} \cdot C_{\text{д}} \cdot t_{\text{д}}, \text{ Дж/м}^3;$$

- объем дыма:

$$V_{\text{д}} = 0,17 \cdot Q_{\text{н}}^{\text{п}} + 1,0 + (\alpha - 1) \cdot L_0;$$

$$V_{\text{д}} = 0,17 \cdot 3,98 + 1,0 + (1,1 - 1) \cdot 0,836 = 1,76 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$Q_{\text{ух}} = 1,76 \cdot 1,4 \cdot 1000 = 2464 \text{ кДж/м}^3 = 2,5 \text{ МДж/м}^3;$$

$$\eta = \frac{3,98 + 0,97 + 0,63 - 2,5}{3,98} = 0,77.$$

4. Тепловая мощность

$$M = \frac{1,4 + 0,56}{0,77} = 2,55 \text{ МВт}.$$

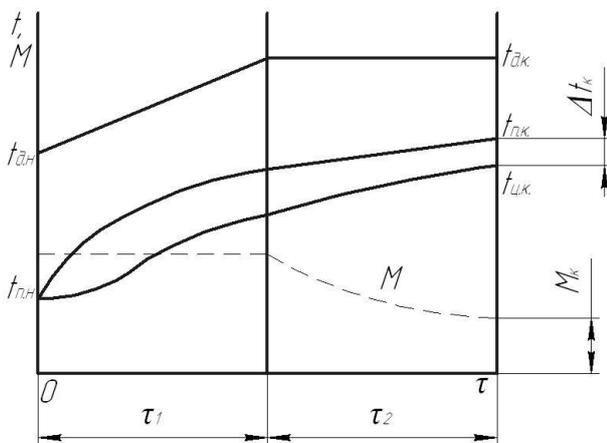
5. Расход доменного газа

$$V = \frac{M}{Q_H^p} = \frac{2,55}{3,98} = 0,64 \text{ м}^3/\text{с} = 2307 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Вывод: определена мощность регенеративного колодца, которая составила $M = 2,55$ МВт и расход доменного газа в начале нагрева слитков горячего посада $V = 2307 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Задача №2

Определить тепловую мощность рекуперативного нагревательного колодца и расход доменного газа, а также температуру дымовых газов в конце нагрева слитков для условий: расчетная толщина стального слитка $\delta_0 = 280$ мм; поверхность нагрева металла $F_M = 48 \text{ м}^2$; температура поверхности в конце нагрева $t_{п.к.} = 1300^\circ\text{C}$; перепад температур по сечению $\Delta t_k = 35^\circ\text{C}$; приведенный коэффициент излучения $C_{пр} = 1,98 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{K}^4)$; коэффициент регенерации $r_{рег} = 0,3$; коэффициент теплопроводности $\lambda = 32 \text{ Вт}/(\text{мК})$; теплота сгорания доменного газа $Q_H^p = 3,98 \text{ МДж}/\text{м}^3$; $V_d = 1,7 \text{ м}^3/\text{м}^3$; $C_d = 1,4 \text{ кДж}/(\text{м}^3\text{K})$; $Q_{пот} = 0,4 \cdot Q_{усв}$.

Решение

1. Плотность теплового потока в конце нагрева

$$q_{п.к.} = \frac{k_2 \cdot \lambda \cdot \Delta t_k}{r_0},$$

где $k_2=2$ – коэффициент тепловых потоков.

$$q_{п.к.} = \frac{2 \cdot 32 \cdot 35}{0,28} = 8000 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

2. Температура дыма в конце нагрева находим из формулы Стефана Больцмана

$$q_{п.к.} = C_{пр} \left(\left(\frac{T_d}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{п.к.}}{100} \right)^4 \right), \text{ откуда}$$

$$\left(\frac{T_d}{100} \right)^4 = \frac{q_{п.к.}}{C_{пр}} + \left(\frac{T_{п.к.}}{100} \right)^4 ;$$

$$\frac{T_d}{100} = \sqrt[4]{\frac{q_{п.к.}}{C_{пр}} + \left(\frac{T_{п.к.}}{100} \right)^4} =$$

$$= \sqrt[4]{\frac{8000}{1,98} + \left(\frac{1300 + 273}{100} \right)^4} = 15,98 \text{ К};$$

$$T_d = 15,98 \cdot 100 = 1598 \text{ К};$$

$$t_d = 1598 - 273 = 1325 \text{ }^\circ\text{C}.$$

3. Тепловая мощность

$$M = \frac{Q_{усв} + Q_{пот}}{\eta};$$

- тепловая мощность, усвоенная металлом

$$Q_{усв} = q_{п.к.} \cdot F_M = 8000 \cdot 48 = 384000 \text{ Вт} = 0,384 \text{ МВт};$$

- мощность тепловых потерь

$$Q_{пот} = 0,4 \cdot Q_{усв} = 0,4 \cdot 0,384 = 0,154 \text{ МВт}.$$

4. Коэффициент использования теплоты топлива

$$\eta = \frac{Q_H^p + Q_{физ} - Q_{ух}}{Q_H^p} = \frac{Q_H^p - (1 - r) \cdot Q_{ух}}{Q_H^p};$$

- физическая теплота уходящих продуктов сгорания

$$Q_{ух} = V_d \cdot C_d \cdot t_d = 1,7 \cdot 1,4 \cdot 1325 = 3153,5 \text{ кДж/м}^3 = 3,154 \text{ МДж/м}^3 ;$$

$$\eta = \frac{3,98 \cdot (1 - 0,3) \cdot 3,154}{3,98} = 0,45.$$

5. Тепловая мощность

$$M = \frac{0,384 + 0,154}{0,45} = 1,196 \text{ МВт}.$$

6. Расход топлива

$$V = \frac{M}{Q_H^p} = \frac{1,196}{3,98} = 0,3 \text{ м}^3/\text{с} = 1080 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Вывод: определена температура дымовых газов в конце нагрева слитков $t_d = 1325 \text{ }^\circ\text{C}$, тепловая мощность нагревательного колодца $M = 1,2 \text{ МВт}$ и расход доменного газа, который составил $V = 1080 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Задача №3

Определить расход топлива, длительность технологического процесса, удельный расход теплоты и условного топлива для роликовой проходной печи (печь непрерывного действия) для термообработки стального листа. Представить схему печи, температурную и тепловую диаграммы режима нагрева металла. Исходные данные:

- производительность печи $-P = 50 \text{ т/ч}$;
- теплота сгорания топлива $-Q_H^p = 11 \text{ МДж/м}^3$;
- коэффициент расхода воздуха $\alpha = 1,1$;
- нагрев двусторонний симметричный;
- нагреваемый материал – сталь 20;
- толщина стального листа $2 \cdot r_0 = 40 \text{ мм}$;
- начальная температура нагрева $t_n = 10 \text{ }^\circ\text{C}$;
- конечная температура нагрева $t_k = 920 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура в печи постоянная в течении всего времени нагрева и составляет $t_{\text{печ}} = 950 \text{ }^\circ\text{C}$;
- приведенный коэффициент излучения в течении всего времени нагрева составляет $C_{\text{печ.м}} = 3,5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$;
- температура нагрева воздуха в рекуператоре $t_B = 300 \text{ }^\circ\text{C}$;
- нагреваемое тело термически тонкое $k_1 = 1$;
- температура продуктов сгорания на выходе из печи $t_{\text{вых}} = 840 \text{ }^\circ\text{C}$;

- принять потери тепла через кладку через коэффициент потерь $k_{\text{пот}} = 0,25$; ($k_{\text{пот}} = Q_{\text{пот}}/Q_{\text{усв}}$);

- расчеты теоретического расхода воздуха и расход продуктов сгорания производится по упрощенным формулам, приведенных в справочных материалах:

$$Q_{\text{H}}^{\text{p}} < 12 \text{ МДж/м}^3; L_0 = 0,21 \cdot Q_{\text{H}}^{\text{p}}, \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{\text{д}} = 0,17 \cdot Q_{\text{H}}^{\text{p}} + 1,0 + (\alpha - 1) \cdot L_0, \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

- теплофизические характеристики воздуха, продуктов сгорания и стали заданной марки приводятся в таблицах в справочных материалах.

Решение

1. Схема печи, температурная и тепловая диаграммы режима нагрева металла.

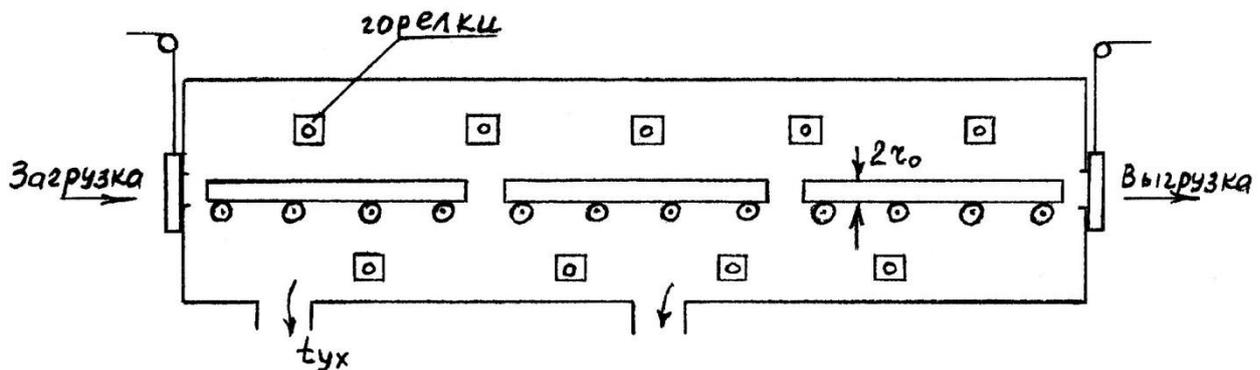


Рисунок 1 – Печь непрерывного действия для нагрева стального листа

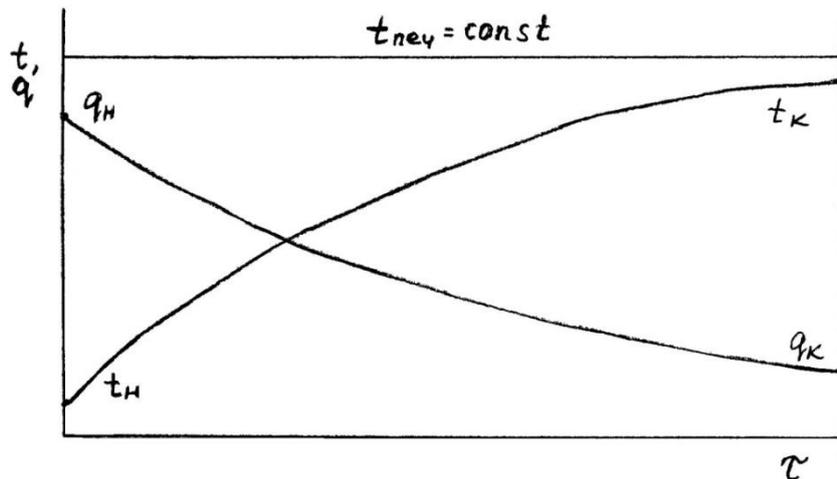


Рисунок 2 – Температурная и тепловая диаграмма режима нагрева металла

2. Основной расчет является тепловой баланс печи

$$B \cdot Q_H^p + B \cdot \alpha \cdot V_0 \cdot c_B \cdot t_B = P \cdot (i_K - i_H) + Q_{\text{пот}} + B \cdot V_d + c_d \cdot t_{\text{ух}}.$$

3. Тепловая мощность печи

$$M = \frac{Q_{\text{усв}} + Q_{\text{пот}}}{\eta}.$$

4. Длительность нагрева металла в печи (длительность технологического процесса)

$$\tau = \frac{r_0 \cdot \rho \cdot c_M}{k_1 \cdot q_{\text{ср}}} (t_K - t_H).$$

5. Средний тепловой поток за время нагрева металла

$$q_{\text{ср}} = \frac{q_H - q_K}{\ln \frac{q_H}{q_K}}.$$

6. Тепловой поток в начале нагрева

$$\begin{aligned} q_H &= C_{\text{печ.м}} \cdot \left(\left(\frac{t_{\text{печ.н}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{п.н}} + 273}{100} \right)^4 \right) = \\ &= 3,5 \cdot \left(\left(\frac{950 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{10 + 273}{100} \right)^4 \right) = 78077,7 \text{ Вт/м}^2. \end{aligned}$$

7. Тепловой поток в конце нагрева

$$q_K = C_{\text{печ.м}} \cdot \left(\left(\frac{t_{\text{печ.к}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{п.к}} + 273}{100} \right)^4 \right) =$$

$$= 3,5 \cdot \left(\left(\frac{950 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{920 + 273}{100} \right)^4 \right) = 7405 \text{ Вт/м}^2.$$

8. Средний тепловой поток

$$q_{\text{ср}} = \frac{78077,7 - 7405}{\ln \frac{78077,7}{7405}} = 30003,3 \text{ Вт/м}^2.$$

9. Время нагрева металла в печи с учетом влияния температуры металла на удельную теплоемкость и на плотность стали

при $t_{\text{н}} = 10^\circ\text{C}$; $\rho_{\text{н}} = 7860 \text{ кг/м}^3$;

при $t_{\text{к}} = 920^\circ\text{C}$; $\rho_{\text{к}} = 7600 \text{ кг/м}^3$; тогда $\bar{\rho} = 7730 \text{ кг/м}^3$;

$$\tau = \frac{0,02 \cdot 7730 \cdot (0,65 \cdot 920 - 0,48 \cdot 10) \cdot 10^3}{1 \cdot 30003,3} = 3057 \text{ с} = 0,85 \text{ ч}.$$

10. Тепло усвоенное металлом

$$Q_{\text{усв}} = P \cdot (i_{\text{к}} - i_{\text{н}}) = P \cdot (c_{\text{к}} \cdot t_{\text{к}} - c_{\text{н}} \cdot t_{\text{н}});$$

$$Q_{\text{усв}} = \frac{50 \cdot 1000}{3600} (0,65 \cdot 920 - 0,48 \cdot 10) \cdot 10^3 = 8238 \text{ кВт} = 8,238 \text{ МВт}.$$

11. Потери тепла через кладку печи

$$Q_{\text{пот}} = k_{\text{пот}} \cdot Q_{\text{усв}} = 0,25 \cdot 8,238 = 2,06 \text{ МВт}.$$

12. Физическое тепло нагретого в рекуператоре воздуха

$$Q_{\text{ф.в.}} = \alpha \cdot L_0 \cdot C_{\text{в}} \cdot t_{\text{в}} = 1,1 \cdot 2,31 \cdot 1,342 \cdot 300 = 1023 \text{ кДж/м}^3,$$

где L_0 – теоретический необходимый объем воздуха

$$L_0 = 0,21 \cdot Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 0,21 \cdot 11 = 2,31 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

13. Физическое тепло продуктов сгорания, уносимое из печи

$$Q_{\text{ух}} = V_{\text{д}} \cdot C_{\text{д}} \cdot t_{\text{ух}} = 3,04 \cdot 1,479 \cdot 840 = 3777 \text{ кДж/м}^3,$$

где расход продуктов сгорания

$$V_{\text{д}} = 0,17 \cdot Q_{\text{н}}^{\text{п}} + 1,0 + (\alpha - 1) \cdot L_0, \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{\text{д}} = 0,17 \cdot 11 + 1,0 + (1,1 - 1) \cdot 2,31 = 3,101 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

13. Коэффициент использования тепла топлива

$$\eta_{\text{кит}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{п}} + Q_{\text{ф.в.}} - Q_{\text{ух}}}{Q_{\text{н}}^{\text{п}}} = \frac{11000 + 1023 - 3777}{11000} = 0,75.$$

15. Тепловая мощность печи

$$M = \frac{8,238 + 2,06}{0,75} = 13,73 \text{ МВт.}$$

16. Расход топлива

$$V = \frac{M}{Q_H^p} = \frac{13,73}{11} = 1,248 \text{ м}^3/\text{с} = 44930 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

17. Удельный расход тепла

$$b = \frac{V \cdot Q_H^p}{P} = \frac{1,248 \cdot 11 \cdot 3600}{50 \cdot 1000} = 0,988 \text{ МДж/кг.}$$

18. Удельный расход условного топлива

$$b_{\text{усл}} = \frac{b}{Q_{H(\text{усл.т})}^p} = \frac{0,988}{29,3} = 0,034 \frac{\text{кг. у. т.}}{\text{кг. мет}} = 34 \frac{\text{кг. у. т.}}{\text{т. мет}}.$$

Выводы:- длительность технологического процесса $\tau = 0,85$ ч;

- расход топлива $V = 44930 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- удельный расход тепла $b = 0,988 \text{ МДж/кг}$;
- удельный расход условного топлива $b_{\text{усл}} = 34 \text{ кг. у. т.}/(\text{т. мет})$.

Задача №4

Определить тепловую мощность, удельные затраты теплоты и условного топлива при нагреве крупных заготовок под ковку в камерной печи (печь периодического действия) с выкатным подом. Представить схему печи, температурную и тепловую диаграммы нагрева металла.

Исходные данные для выполнения задания:

- теплота сгорания топлива $-Q_H^p = 32 \text{ МДж/м}^3$;
- количество заготовок в печи $n = 2$;
- размеры заготовки:

$$\text{диаметр } d = 500 \text{ мм};$$

$$\text{длина } l = 2000 \text{ мм};$$

- коэффициент расхода воздуха $\alpha = 1,15$;
- начальная температура печи $t_{\text{печ.н}} = 700^\circ\text{C}$;

- конечная температура нагрева заготовки $t_{п.к} = 1250^{\circ}\text{C}$;
 - начальная температура заготовки $t_{н} = 20^{\circ}\text{C}$;
 - перепад температур между поверхностью и осью в конце нагрева $\Delta t_{к} = 50^{\circ}\text{C}$;
 - марка стали нагреваемой заготовки – сталь 3
 - приведенный коэффициент излучения в системе «печь-металл» $C_{печ.м} = 4,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
 - температура нагрева воздуха в рекуператоре $t_{в} = 300^{\circ}\text{C}$;
 - принять потери тепла через кладку по формуле $Q_{пот} = k_{пот} \cdot Q_{усв}$;
 - коэффициент потерь тепла через кладку $k_{пот} = 0,2$;
 - коэффициент теплопроводности $\lambda = 40 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$
 - принять температуру уходящих продуктов сгорания равной температуре печи $t_{ух} = t_{печ}$
 - расчеты теоретического расхода воздуха и расход продуктов сгорания производится по упрощенным формулам, приведенных в справочных материалах:
- $$Q_{н}^p > 12 \text{ МДж}/\text{м}^3; V_0 = 0,26 \cdot Q_{н}^p - 0,25; V_d = 0,27 Q_{н}^p + 0,25 + (\alpha - 1) V_0.$$
- теплофизические характеристики воздуха, продуктов сгорания и стали заданной марки приводятся в таблицах в справочных материалах.

Порядок выполнения задания

1. Схема печи, температурная и тепловая диаграммы режима нагрева металла.

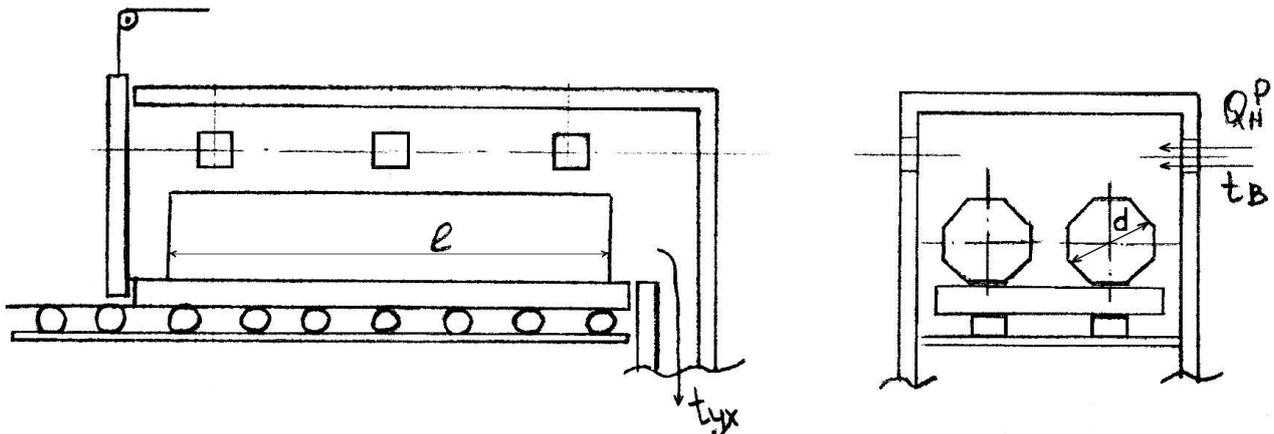


Рисунок 1 – Печь периодического действия для нагрева крупных заготовок

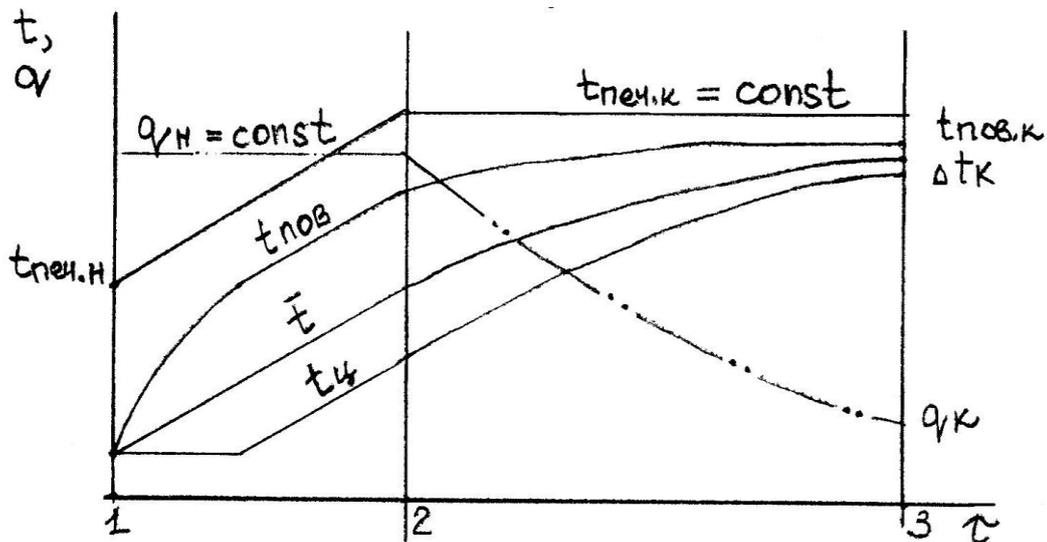


Рисунок 2 – Тепловая и температурная диаграммы режима нагрева металла

2. Поверхность нагрева заготовок

$$F_M = n(\pi \cdot d \cdot l + \frac{2\pi \cdot d^2}{4}) = 2(3,14 \cdot 0,5 \cdot 2 + 2 \frac{3,14 \cdot 0,5^2}{4}) = 7,065 \text{ м}^2$$

3. Удельный тепловой поток к поверхности металла в конце нагрева

$$q_K = \frac{2 \cdot \lambda \cdot \Delta t_K}{r_0} = \frac{2 \cdot 40 \cdot 50}{0,25} = 16000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

где $r_0 = 0,5d$ при симметричном нагреве

4. Температура печи в конце нагрева

$$q_K = C_{\text{печ.м}} \left[\left(\frac{t_{\text{печ.к}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{п.к}} + 273}{100} \right)^4 \right]$$

$$t_{\text{печ.к}} = 100^4 \sqrt{\frac{q_K}{C_{\text{печ.м}}} + \left(\frac{t_{\text{п.к}} + 273}{100} \right)^4} - 273 = 100^4 \sqrt{\frac{16000}{4,2} + \left(\frac{1250 + 273}{100} \right)^4} - 273 = 1276^\circ\text{C}$$

5. Тепловая мощность в конце нагрева:

$$M_K = \frac{Q_{\text{усв.к}} + Q_{\text{пот.к}}}{\eta_{\text{кит.к}}}$$

6. Тепло, усвоенное металлом в конце нагрева при $t_{\text{печ.к}} = \text{const}$

$$Q_{\text{усв.к}} = q_{\text{к}} \cdot F_{\text{м}} = 16000 \cdot 7,065 = 113040 \text{ Вт}$$

7. Тепловые потери через кладку печи

$$Q_{\text{пот}} = k_{\text{пот}} \cdot Q_{\text{усв.к}} = 0,2 \cdot 113040 = 22608 \text{ Вт}$$

8. Коэффициент использования тепла в конце нагрева

$$\eta_{\text{КИТ.к}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{п}} + Q_{\text{ф.в}} - Q_{\text{усв.к}}}{Q_{\text{н}}^{\text{п}}}$$

9. Физическое тепло нагретого в рекуператоре воздуха:

$$Q_{\text{ф.в}} = \alpha \cdot V_0 \cdot c_{\text{в}} \cdot t_{\text{в}}$$

$$\text{где } V_0 = 0,26 \cdot Q_{\text{н}}^{\text{п}} - 0,25 = 0,26 \cdot 32 - 0,25 = 8,07 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}; c_{\text{в}} = 1,34 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$$

$$Q_{\text{ф.в}} = 1,15 \cdot 8,07 \cdot 1,34 \cdot 300 = 3731 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$$

10. Физическое тепло продуктов сгорания, уносимое из печи в конце нагрева

$$Q_{\text{ух.к}} = V_{\text{д}} \cdot c_{\text{д}} \cdot t_{\text{ух.к}} = 10,1 \cdot 1,58 \cdot 1276 = 20362 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$$

$$\text{где } V_{\text{д}} = 0,27 Q_{\text{н}}^{\text{п}} + 0,25 + (\alpha - 1) V_0 = 0,27 \cdot 32 + 0,25 + (1,15 - 1) \cdot 8,07 = 10,1 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3};$$

$$c_{\text{д}} = 1,58 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$$

11. Определяем КИТ печи в режиме нагрева при $t_{\text{печ.к}} = \text{const}$

$$\eta_{\text{КИТ.к}} = \frac{32000 + 3731 - 20362}{32000} = 0,48$$

12. Тепловая мощность печи в конце нагрева:

$$M_{\text{к}} = \frac{113040 + 22608}{0,48} = 282600 \text{ Вт}$$

13. Тепловая мощность печи в начале нагрева:

$$M_{\text{н}} = \frac{Q_{\text{усв.н}} + Q_{\text{пот.н}}}{\eta_{\text{КИТ.н}}}$$

14. Усвоенное тепло металлом при $q = \text{const}$

$$Q_{\text{усв.н}} = q_{\text{н}} \cdot F_{\text{м}}$$

где

$$q_n = C_{\text{печ.м}} \left[\left(\frac{t_{\text{печ.н}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{н}} + 273}{100} \right)^4 \right] = 4,2 \left[\left(\frac{700 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] = 37330 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

$$Q_{\text{усв.н}} = 37330 \cdot 7,065 = 263736 \text{ Вт}$$

15. Тепловые потери через кладку печи

$$Q_{\text{пот.н}} = k_{\text{пот}} \cdot Q_{\text{усв.н}} = 0,2 \cdot 263736 = 52747,2 \text{ Вт}$$

16. Принимаем физическое тепло подогретого в рекуператоре воздуха как и при режиме $t_{\text{в.в}} = \text{const}$

$$Q_{\text{ф.в}} = 3731 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$$

17. Физическое тепло продуктов сгорания, уносимое из печи $t_{\text{д}} = t_{\text{печ}}$:

$$Q_{\text{ух.н}} = V_{\text{д}} \cdot c_{\text{д}} \cdot t_{\text{ух.н}} = 10,1 \cdot 1,51 \cdot 700 = 10500 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$$

где $c_{\text{д}} = 1,51 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$

18. Определяем КИТ печи в режиме нагрева при $q = \text{const}$:

$$\eta_{\text{КИТ.н}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{п}} + Q_{\text{ф.в}} - Q_{\text{ух.н}}}{Q_{\text{н}}^{\text{п}}} = \frac{32000 + 3731 - 10500}{32000} = 0,788$$

19. Тепловая мощность печи в режимы $q = \text{const}$:

$$M_{\text{н}} = \frac{263736 + 52747,2}{0,788} = 401628 \text{ Вт}$$

20. Средняя тепловая мощность печи (при одинаковых мощностях в точках «1» и «2»):

$$M_{\text{ср}} = \frac{2 \cdot M_{\text{н}} + M_{\text{к}}}{3} = \frac{2 \cdot 401628 + 282600}{3} = 361952 \text{ Вт}$$

21. Расход топлива

$$V_{\text{ср}} = \frac{M_{\text{ср}}}{Q_{\text{н}}^{\text{п}}} = \frac{361952}{32 \cdot 10^6} = 0,01131 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 40,7 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$$

22. Удельный расход тепла

$$b = \frac{V_{\text{ср}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{п}}}{G},$$

где G – вес садки, кг

$$G = n \frac{\pi d^2}{4} \ell \rho = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,5^2}{4} \cdot 2 \cdot 7800 = 6123 \text{ кг}$$

$$b = \frac{0,01131 \cdot 32000}{6123} = 0,059 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{с}} = 59 \frac{\text{кДж}}{\text{т} \cdot \text{с}} = 212 \frac{\text{МДж}}{\text{т} \cdot \text{ч}}$$

23. Удельный расход условного топлива:

$$b_{\text{усл}} = \frac{b}{Q_{\text{н(усл.т)}}^p} = \frac{212}{29,3} = 7,23 \frac{\text{кг} \cdot \text{у} \cdot \text{т}}{\text{т} \cdot \text{ч}}$$

Выводы:

- расход топлива $V = 40,7 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$;

- удельный расход тепла $b = 212 \frac{\text{МДж}}{\text{т} \cdot \text{ч}}$;

- удельный расход условного топлива $b_{\text{усл}} = 7,23 \frac{\text{кг} \cdot \text{у} \cdot \text{т}}{\text{т} \cdot \text{ч}}$.

РАСЧЕТНАЯ РАБОТА

«Определение времени и затрат энергии на разогрев обмуровки нагревательной печи»

1 Вводная часть

Проектируются печи с выкатным подом для нагрева крупных заготовок перед обработкой давлением (ковкой). Печи имеют форму параллелепипеда с внутренними размерами: ширина (В), высота (Н), длина (L) и объемом рабочей камеры $V \times H \times L$.

2 Задание на расчетную работу

Определить время и затраты энергии на разогрев обмуровки нагревательной печи.

В процессе выполнения работы определить:

- необходимые размеры слоев и массу обмуровки из штучных материалов;
- необходимые размеры и массу однослойной футеровки из волокнистых материалов;
- рассчитать тепловые потери на стационарном тепловом режиме;
- определить прирост температуры каждого слоя за период разогрева;
- определить время разогрева по формуле И.Д.Семикина;
- определить затраты тепловой энергии на разогрев;
- сделать сравнительный анализ параметров разогрева традиционной обмуровки из штучных материалов и волокнистых материалов.

3.Методика выполнения работы

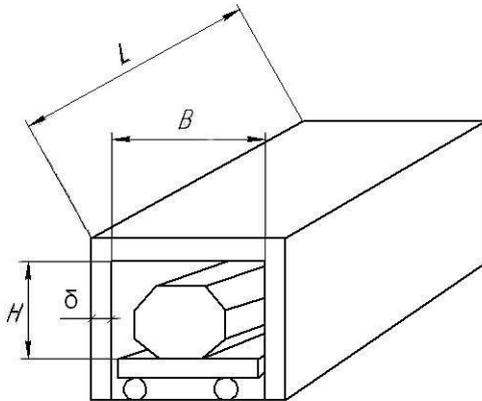
3.1 Схема печи и схема теплопередачи в обмуровке

Схема печи и схема теплопередачи в обмуровке представлена на рисунке

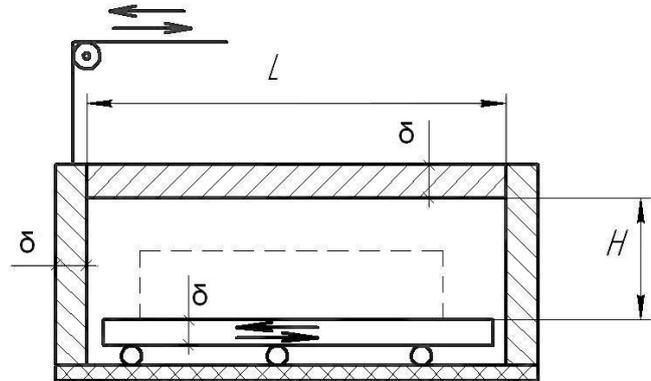
1. Рабочая камера печи имеет форму параллелепипеда с размерами $V \times H \times L$. Передняя стенка печи является крышкой с обмуровкой, которая поднимается для загрузки (выгрузки) нагреваемой заготовки и опускается, когда идет процесс нагрева. Стены, свод печи и выкатная подина имеют (в настоящем

задании) одинаковую обмуровку толщиной " δ ". Топливосжигающие устройства и дымоотводящие каналы на схеме не показаны.

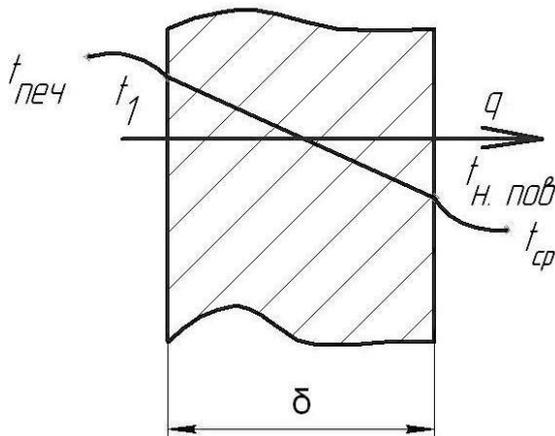
а)



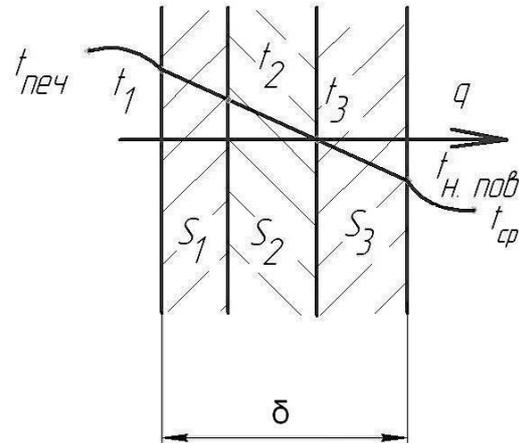
б)



в)



г)



а) схема печи; б) продольный разрез печи; в) однослойная футеровка из волокнистого материала; г) многослойная футеровка

Рисунок 1 – Схема обмуровки печи с выкатным подом и схема теплопередачи через обмуровку

Обмуровка печи должна обеспечить температуру наружной поверхности, не выше заданной. В случае трехслойной футеровки рабочий слой имеет толщину S_1 , необходимую для получения температуры t_2 на стыке рабочего и промежуточного слоя не выше допустимой для последнего слоя. Промежуточный слой имеет толщину S_2 , необходимую для получения

температуры t_3 на стыке промежуточного и теплоизоляционного слоев не выше допустимого для последнего слоя. Теплоизоляционный слой имеет толщину S_3 необходимую для получения температуры наружной поверхности $t_{н.пов}$ не выше заданной. В случае однослойной обмуровки из волокнистого огнеупорного материала толщина слоя δ обеспечивает заданную температуру $t_{н.пов}$.

3.2 Методика и пример расчета

3.2.1 Определение толщины трехслойной обмуровки

Пример расчета для следующих исходных данных:

Температура, °С			Вт м ² · К	Материал слоя			Размер камеры, м			Волокнистый материал
печи $t_{печ}$	окр. среды $t_{ср}$	наружн. поверхн. $t_{пов}$		$\alpha_{печ}$	1	2	3	В	Н	
1290	-10	40	200	ША	ШЛ1	Д 2	4,0	5,2	18	Ff

- определение теплового потока через обмуровку рассчитывается по заданной разнице температур наружной поверхности и окружающей среды

$$q_{пот} = \alpha_{\Sigma} \cdot (t_{н.пов} - t_{ср}),$$

где α_{Σ} – суммарный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_{конв} + \alpha_{изл},$$

$\alpha_{конв}$ – коэффициент теплоотдачи свободной конвекцией определяется по формуле

$$\alpha_{конв} = A \cdot \sqrt[4]{t_{н.пов} - t_{ср}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где усредненный для вертикальных и горизонтальных поверхностей $A \cong 3,0$ [2].

Например,

$$\alpha_{конв} = 3 \cdot \sqrt[4]{40 - (-10)} = 7,98 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

$\alpha_{изл}$ – коэффициент теплоотдачи излучением,

$$\alpha_{\text{изл}} = \frac{\varepsilon_{\text{ст}} \cdot \sigma_0 \cdot (T_{\text{н.пов}}^4 - T_{\text{ср}}^4)}{t_{\text{н.пов}} - t_{\text{ср}}},$$

$$\alpha_{\text{изл}} = \frac{0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} ((273 + 40)^4 - (273 - 10)^4)}{40 - (-10)} = 4,37 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

$$\alpha_{\Sigma} = 7,98 + 4,37 = 12,35 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

$$q_{\text{пот}} = 12,35 \cdot (40 - (-10)) = 617,5 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Температура внутренней поверхности обмуровки при стационарном тепловом состоянии определяется из формулы

$$q_{\text{пот}} = \alpha_{\text{вн}} \cdot (t_{\text{печ}} - t_1),$$

откуда

$$t_1 = t_{\text{печ}} - \frac{q_{\text{пот}}}{\alpha_{\text{печ}}},$$

$$t_1 = 1290 - \frac{617,5}{200} = 1287 \text{ }^\circ\text{С}.$$

Толщина слоев обмуровки определяется из уравнения стационарной теплопроводности. Для первого слоя

$$q_{\text{пот}} = \frac{\lambda_1}{S_1} (t_1 - t_2),$$

где t_2 – допустимая температура второго слоя. Коэффициент теплопроводности первого слоя определяется по средней температуре

$$\bar{t}_1 = \frac{t_1 + t_2}{2}.$$

Толщина слоя

$$S_1 = \frac{\lambda_1 \cdot (t_1 - t_2)}{q_{\text{пот}}}.$$

Для второго слоя из шамота-легковеса ШЛ1 $t_2 = t_{\text{доп}} = 1170 \text{ }^\circ\text{С}$. Тогда

$$\bar{t}_1 = \frac{1287 + 1170}{2} = 1228 \text{ }^\circ\text{С}.$$

Коэффициент теплопроводности первого слоя из шамота класса А ША

$$\lambda_1 = 0,84 + 0,58 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{t}_1, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

$$\lambda_1 = 0,84 + 0,58 \cdot 10^{-3} \cdot 1228 = 1,55 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

$$S_1 = \frac{1,55 \cdot (1287 - 1170)}{617,5} = 0,294 \text{ м.}$$

Толщина второго слоя

$$S_2 = \frac{\lambda_2 \cdot (t_2 - t_3)}{q_{\text{пот}}}.$$

Для третьего слоя из диатомита $t_3 = t_{\text{доп}} = 670 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$\bar{t}_2 = \frac{t_2 + t_3}{2} = \frac{1170 + 670}{2} = 920 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Коэффициент теплопроводности шамота-легковеса ШЛ1

$$\lambda_2 = 0,291 + 20,5 \cdot 10^{-5} \cdot \bar{T}_2, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

$$\lambda_2 = 0,291 + 20,5 \cdot 10^{-5} \cdot (920 + 273) = 0,536 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

$$S_2 = \frac{0,536 \cdot (1170 - 670)}{617,5} = 0,434 \text{ м.}$$

Толщина третьего слоя

$$S_3 = \frac{\lambda_3 \cdot (t_3 - t_{\text{н.пов}})}{q_{\text{пот}}}.$$

Для третьего слоя D_2

$$\bar{t}_3 = \frac{t_3 + t_{\text{н.пов}}}{2} = \frac{670 + 40}{2} = 355 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$\lambda_3 = 0,127 + 2,42 \cdot 10^{-4} \cdot \bar{t}_3, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

$$\lambda_3 = 0,127 + 2,42 \cdot 10^{-4} \cdot 355 = 0,219 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

$$S_3 = \frac{0,219 \cdot (670 - 40)}{617,5} = 0,223 \text{ м.}$$

Общая толщина обмуровки

$$S = S_1 + S_2 + S_3.$$

$$S = 0,294 + 0,434 + 0,223 = 0,951 \text{ м.}$$

Для строительства принимаем обмуровку из прямых кирпичей 230x115x65.

Тогда примем

$$S_1 = 345 \text{ мм (в полтора кирпича);}$$

$$S_2 = 460 \text{ мм (в два кирпича, 230+230);}$$

$$S_3 = 230 \text{ мм (в один кирпич).}$$

После уточнения толщина обмуровки желательно сделать пересчет температур по слоям обмуровки.

3.2.2 Определение времени разогрева трехслойной обмуровки производится из уравнения теплового баланса:

$$\text{приход тепла } Q_{\text{прих}} = q_{\text{ср}} \cdot F \cdot \tau$$

$$\text{расход тепла на разогрев обмуровки } Q_{\text{расх}} = \sum m_i \cdot c_i \cdot (t_{i,\text{к}} - t_{i,\text{н}}).$$

Средний тепловой поток, поступающий через внутреннюю поверхность печи

$$q_{\text{ср}} = \frac{q_{\text{н}} - q_{\text{к}}}{\ln \frac{q_{\text{н}}}{q_{\text{к}}}},$$

$$q_{\text{н}} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot 10^{-8} \cdot (T_{\text{печ}}^4 - T_{\text{н}}^4),$$

$$q_{\text{к}} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot 10^{-8} \cdot (T_{\text{печ}}^4 - T_{\text{к}}^4)$$

Начальная температура внутренней поверхности обмуровки равна температура окружающей среды $T_{\text{н}} = T_{\text{среды}}$; конечная температура принимается $T_{\text{к}} = T_1$, где T_1 – температура внутренней поверхности в конце разогрева.

Масса слоя обмуровки производится по средней поверхности слоя. Так, масса первого слоя (шамот класса А ША)

$$m_1 = F_1 \cdot S_1 \cdot \rho_1,$$

где

$$F_1 = 2((B + S_1) + (H + S_1)) \cdot (L + S_1) + 2 \cdot (B + S_1) \cdot (H + S_1).$$

$$F_1 = 2((4 + 0,294) + (5,2 + 0,294)) \cdot (18 + 0,294) + \\ + 2(4 + 0,294)(5,2 + 0,294) = 405 \text{ м}^2.$$

$$m_1 = 405 \cdot 0,294 \cdot 1850 = 220279,5 \text{ кг.}$$

Масса второго слоя (шамот-легковес ШЛ-1)

$$F_2 = 2((4 + 0,294 + 0,434) + (5,2 + 0,294 + 0,434)) \cdot (18 + 0,294 + 0,434) \\ + 2(4 + 0,294 + 0,434) \cdot (5,2 + 0,294 + 0,434) = 455 \text{ м}^2.$$

$$m_2 = 455 \cdot 0,434 \cdot 900 = 177723 \text{ кг.}$$

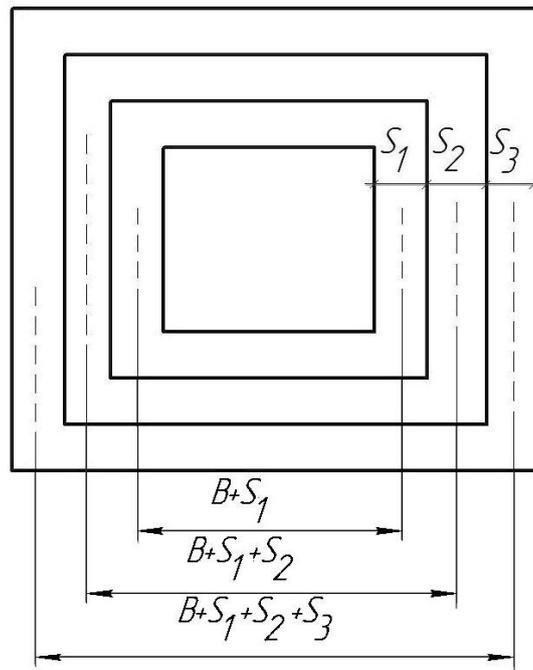


Рисунок 2– К расчету обмуровки

Масса третьего слоя (диатомит Д 2)

$$F_3 = 2((4 + 0,951) + (5,2 + 0,951)) \cdot (18 + 0,951) + \\ + 2(4 + 0,951) \cdot (5,2 + 0,951) = 482 \text{ м}^2.$$

$$m_3 = 482 \cdot 0,223 \cdot 650 = 69865,9 \text{ кг.}$$

Общая масса $m = 220279,5 + 177723 + 69865,9 = 467868 \text{ кг} = 468 \text{ т.}$

Средние температуры слоев в конце разогрева:

слоя ША: $t_{1к} = 1228 \text{ }^\circ\text{C};$

слоя ШЛ1: $t_{2к} = 920 \text{ }^\circ\text{C};$

слоя Д 2: $t_{3к} = 355 \text{ }^\circ\text{C.}$

Теплоемкости слоев:

слоя ША:

$$c_1 = 0,88 + 0,23 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{t}_1 = 0,88 + 0,23 \cdot 10^{-3} \cdot 1228 = 1,16 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

слоя ШЛ1:

$$c_2 = 0,88 + 0,23 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{t}_2 = 0,88 + 0,23 \cdot 10^{-3} \cdot 920 = 1,09 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

слоя Д 2: $c_3 = 0,84 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$

Разница температур $\Delta t = t_k - t_n$

слоя ША: $\Delta t_1 = 1228 - (-10) = 1238 \text{ }^\circ\text{C};$

слоя ШЛ1: $\Delta t_2 = 920 - (-10) = 930 \text{ }^\circ\text{C}$;

слоя Д 2: $\Delta t_3 = 355 - (-10) = 365 \text{ }^\circ\text{C}$.

Расход тепла на нагрев слоев:

слоя ША: $Q_1 = m_1 \cdot c_1 \cdot \Delta t_1 = 220279,5 \cdot 1,16 \cdot 1238 = 316 \text{ ГДж}$;

слоя ШЛ1: $Q_2 = m_2 \cdot c_2 \cdot \Delta t_2 = 177723 \cdot 1,09 \cdot 930 = 180 \text{ ГДж}$;

слоя Д 2: $Q_3 = m_3 \cdot c_3 \cdot \Delta t_3 = 69865,9 \cdot 0,84 \cdot 365 = 21 \text{ ГДж}$.

Общий расход тепла

$$Q_{\text{расх}} = \sum m_i \cdot c_i \cdot \Delta t_i = Q_1 + Q_2 + Q_3 = (316 + 180 + 21) \cdot 10^9 = \\ = 517 \text{ ГДж.}$$

Плотность теплового потока в начале разогрева

$$q_{\text{н}} = 0,8 \cdot 5,67 \cdot \left(\left(\frac{1290 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{(-10) + 273}{100} \right)^4 \right) = 270496 \text{ Вт/м}^2.$$

Плотность теплового потока в конце разогрева равна тепловым потерям при стационарном тепловом состоянии.

$$q_{\text{к}} = q_{\text{пот}} = 617,5 \text{ Вт/м}^2; \\ q_{\text{ср}} = \frac{270496 - 617,5}{\ln \frac{270496}{617,5}} = 44373 \text{ Вт/м}^2.$$

Внутренняя поверхность печи

$$F = 2 \cdot (H + B) \cdot L + 2 \cdot H \cdot B = \\ = 2 \cdot (4,0 + 5,2) \cdot 18 + 2 \cdot 4,0 \cdot 5,2 = 373 \text{ м}^2.$$

Мощность теплового потока

$$M_{\text{ср}} = q_{\text{ср}} \cdot F = 44373 \cdot 373 = 16551 \cdot 10^3 \text{ Вт} = 16,6 \text{ МВт.}$$

Время разогрева

$$\tau = \frac{Q_{\text{расх}}}{M_{\text{ср}}} = \frac{517 \cdot 10^3}{16,6} = 31,14 \cdot 10^3 \text{ с} = 8,65 \text{ ч.}$$

3.2.3 Определение толщины однослойной обмуровки из волокнистого материала

Расчет тепловых потерь и температуры внутренней поверхности обмуровки выполнены в разделе 3.2.1. в примере $q_{\text{пот}} = 617,5 \text{ Вт/м}^2$, $t_1 = 1287 \text{ }^\circ\text{C}$.

Средняя температура обмуровки из фибер-фракса (Ff) в конце разогрева составляет

$$\bar{t}_{\text{Ff}} = \frac{t_1 + t_{\text{н.пов}}}{2} = \frac{1287 + 40}{2} = 664 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Теплопроводность

$$\lambda_{\text{Ff}} = 0,08 + 0,15 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{t}_{\text{Ff}}, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)};$$

$$\lambda_{\text{Ff}} = 0,08 + 0,15 \cdot 10^{-3} \cdot 664 = 0,18 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Толщина обмуровки

$$S_{\text{Ff}} = \frac{\lambda_{\text{Ff}} \cdot (t_1 - t_{\text{н.пов}})}{q_{\text{пот}}} = \frac{0,18 \cdot (1287 - 40)}{617,5} = 0,36 \text{ м}.$$

3.2.4 Определение времени разогрева обмуровки из волокнистого материала

$$Q_{\text{расх}} = m \cdot c_{\text{Ff}} \cdot \Delta t,$$

$$m = F_{\text{Ff}} \cdot S_{\text{Ff}} \cdot \rho_{\text{Ff}}.$$

В примере

$$F_{\text{Ff}} = 2((4 + 0,36) + (5,2 + 0,36)) \cdot (18 + 0,36) + \\ + 2(4 + 0,36)(5,2 + 0,36) = 413 \text{ м}^2.$$

$$m = 413 \cdot 0,36 \cdot 200 = 30600 \text{ кг} = 30,6 \text{ т}.$$

Расход тепла

$$Q_{\text{расх}} = 30600 \cdot 1,05 \cdot 10^3 \cdot (1287 - 40) = 40 \cdot 10^3 \text{ МДж}.$$

Время разогрева обмуровки из фибер-фракса

$$\tau = \frac{Q_{\text{расх}}}{M_{\text{ср}}} = \frac{40 \cdot 10^3}{16,6} = 2409,6 \text{ с} = 0,67 \text{ ч}.$$

Выводы: масса традиционной трехслойной обмуровки составляет 468 т, из волокнистого материала – 30,6 т, или в 15 раз меньше. Затраты тепла на разогрев трехслойной футеровки составляет 517 ГДж, из волокнистого материала – 40 ГДж, или почти в 13 раз меньше. Время разогрева традиционной обмуровки составляет 8,65 часа, из волокнистого материала – 0,67 часа, или почти в 13 раз меньше.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1.Теплотехника металлургического производства. Т.2./Кривандин В.А. и др.- М.:Мисис, 2002.
- 2.Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. – Металлургиздат, 1962.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица 1 – Исходные данные

№ вариант	Температура,			$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ $\alpha_{печ}$	Материал слоя			Размер камеры, м			Волокнистый материал
	печи $t_{печ}$	окр. среды $t_{ср}$	наружн. поверхн. $t_{пов}$		1	2	3	B	H	L	
1	1300	0	50	220	ША	ШЛ1	Д 2	4,0	5,2	18	Ff
2	1290	-10	40	210	ША	ШЛ1	Д 1	4,2	5,0	15	Ff
3	1280	-10	40	200	ША	ШЛ2	Д 1	4,4	5,0	13	Kw
4	1270	0	40	200	ША	ШЛ1	Д 2	4,6	5,2	14	Ff
5	1260	0	50	210	ША	ШЛ1	Д 1	4,6	5,0	15	Sb
6	1250	0	50	220	ШБ	ШЛ2	Д 2	4,4	5,2	16	Sb
7	1250	-10	40	230	ШБ	ШЛ1	Д 1	4,2	5,2	17	Kw
8	1250	-10	40	230	ШБ	ШЛ2	Д 2	4,0	5,2	18	Sb
9	1250	0	40	220	ШБ	ШЛ1	Д 1	4,2	5,0	15	Sb
10	1260	0	50	210	ША	ШЛ2	Д 1	4,4	5,0	13	Kw
11	1260	0	50	200	ША	ШЛ1	Д 2	4,6	5,0	14	Kw
12	1270	-10	50	190	ША	ШЛ2	Д 1	4,0	5,6	16	Kw
13	1270	-10	40	200	ША	ШЛ1	Д 2	4,2	5,4	16	Kw
14	1280	-10	40	210	ША	ШЛ2	Д 1	4,4	5,2	14	Kw
15	1280	0	40	220	ША	ШЛ1	Д 2	4,2	5,0	18	Ff
16	1290	0	50	230	ША	ШЛ1	Д 2	4,2	5,0	18	Ff
17	1290	0	40	230	ША	ШЛ2	Д 1	4,4	5,2	16	Ff
18	1300	-10	50	220	ША	ШЛ1	Д 2	4,4	5,0	16	Ff
19	1300	-10	40	210	ША	ШЛ2	Д 1	4,0	5,4	16	Ff
20	1290	-10	40	200	ША	ШЛ1	Д 2	4,0	5,2	18	Ff

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица 2 – Теплофизические свойства огнеупорных материалов

Материал	$t_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$\rho,$ кг/м^3	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$c, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
Штучные изделия				
Шамот кл.А ША	1300	1850	$0,84+0,58\cdot 10^{-3}\cdot \bar{t}$	$0,88+0,23\cdot 10^{-3}\cdot \bar{t}$
Шамот кл.Б ШБ	1250	1820	$0,84+0,42\cdot 10^{-3}\cdot \bar{t}$	$0,84+0,23\cdot 10^{-3}\cdot \bar{t}$
Диатомит натур Д 1	650	680	$0,171+2,32\cdot 10^{-4}\cdot \bar{t}$	0,84
Диатомит обож. Д 2	670	650	$0,127+2,42\cdot 10^{-4}\cdot \bar{t}$	0,84
Шамот-легковес ШЛ 1	1170	900	$0,291+20,5\cdot 10^{-5}\cdot \bar{T}$	$0,88+0,23\cdot 10^{-3}\cdot \bar{t}$
Шамот-легковес ШЛ 2	1120	600	$0,102+11,9\cdot 10^{-5}\cdot \bar{T}$	$0,88+0,23\cdot 10^{-3}\cdot \bar{t}$
Волокнистые огнеупорные материалы				
Fiberfrax(США)	1320	200	$0,08+0,15\cdot 10^{-3}\cdot \bar{t}$	1,05
Каowool(ВБ)	1280	160	$0,06+0,3\cdot 10^{-3}\cdot \bar{t}$	0,90
Sibral(Чехия)	1260	220	$0,06+0,25\cdot 10^{-3}\cdot \bar{t}$	0,90

Размер штучного изделия 230x115x65 мм.

Толщина войлока волокнистого материала – 10 мм.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по проведению практических занятий и
организации СРС по дисциплине
«Спецвопросы проектирования тепловых режимов печных агрегатов»

для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки 22.04.02
«Металлургия» магистерской программы
«Промышленная теплотехника»

Составители: проф., к.т.н.Курбатов Ю.Л.,
доц., к.т.н.Новикова Е.В.,
Заика А.А.