

Методические указания по выполнению курсового проекта по курсу «Перенос энергии и массы, основы теплотехники» для студентов направления 22.03.01 – Материаловедение и технологии материалов

Задания на выполнение проекта приведены в приложении 1

(Примечание: Если шифр студента больше 20, то номер задания повторяется с первого номера. Например, 24 соответствует 4 заданию, а 37—17 заданию)

Содержание

Введение	4
1. Расчет горения топлива	5
1.1 Определение расхода воздуха	5
1.2 Определение объемного выхода продуктов	6
1.3 Определение низшей теплоты сгорания полукоксового газа	8
1.4 Определение температуры горения топлива	9
2. Определение времени нагрева и размеров печи	12
2.1.Определение времени нагрева металла в методической зоне	14
2.2.Определение времени нагрева металла в сварочной зоне	16
2.3.Определение основных размеров печи	18
3. Тепловой баланс печи	20
3.1.Расчет кладки печи	20
3.2.Статьи приходной части теплового баланса	22
3.3.Статьи расходной части теплового баланса	24
4. Выбор и расчет топливосжигающих устройств (горелки)	25
5. Расчет воздухоподогревательного устройства	26
6. Расчет дымоотводящей системы	28
7. Охрана окружающей среды и техника безопасности	32
Заключение	34
Список литературы	35

1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

Определяется расход воздуха, количество и объемный вес продуктов горения на единицу топлива и температура горения. Составляется материальный баланс процесса горения топлива и рассчитывается теплота сгорания. Рассмотрим сущность этого расчета на конкретных примерах.

ПРИМЕР № 1:

Спроектировать камерную печь с выдвижным подом для отжига заготовок размером 600x700x800 мм из стали 5ХНГ. Производительность печи 40 тонн за садку.

Топливо — полукоксовый газ состава:

CO_2^{CF}	$C_2H_4^{CF}$	O_2^{CF}	CO_2^{CF}	H_2^{CF}	CH_4^{CF}	N_2^{CF}	q_{H_2O}
11.2	2.8	0.4	7.2	20.9	47.3	10.2	20 г/м ³

Температура подогрева воздуха в рекуператоре 500 °С.

Расчет ведем по методике, описанной в / 1 /.

Определить расход воздуха, объемный выход продуктов сгорания, температуру горения данного газа и его теплотворную способность.

Перед началом аналитического расчета необходимо установить коэффициент расхода воздуха. Коэффициент расхода воздуха определяется видом топлива и типом выбранного топливосжигающего устройства (табл. 1).

Таблица 1

Выбор коэффициента расхода топлива

Топливо	Топливосжигающее устройство	α^*	$\frac{q_3}{Q_H} \cdot 100\%$
Доменный, газогенераторный, коксодоменный, природный газ	Длиннопламенные горелки *	1.15 — 1.30	2 — 3
Все виды газообразного топлива	Короткопламенные горелки **	1.05 — 1.15	1 — 2
Мазут, смола	Форсунки ***	1.15 — 1.35	2 — 3

* Применять значения коэффициента расхода воздуха (α) меньше для горелок и форсунок, дающих лучшее перемешивание топлива с воздухом, большее при худшем перемешивании.

** В термических печах короткопламенные горелки рекомендуется направлять на кладку, например, на свод и использовать косвенную передачу тепла металлу или производить полное сжигание топлива до выхода газов в рабочее пространство.

*** В термических печах мазут рекомендуется сжигать в топках, отделенных от рабочего пространства.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ВОЗДУХА

Для данной печи применяют горелку с регулируемой длиной факела. Эта горелка может работать как короткопламенная и как длиннопламенная. Принимаем $\alpha=1.15$, при этом относительный химический недожог топлива

будет составлять $\frac{q_3}{Q_p} \cdot 100 = 2$ %. Температура воздуха, поступающего в воздухопровод, равна 22 °С. Согласно справочным данным в насыщенном

воздухе при данной температуре находится $q_{H_2O}^{с.в.} = 21.5 \frac{\text{г}_- \text{водяного}_- \text{пара}}{\text{м}^3 \text{-сухого}_- \text{воздуха}}$.

1. Определение объема кислорода, необходимого для полного сжигания газа.

$$V_{O_2} = 0.01 \left[0.5(CO + H_2 + 3H_2S) + \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right] \frac{M^3 O_2}{M^3 \text{газа}}$$

$$V_{O_2} = 0.01(0.5 CO^{с.г.} + 0.5 H_2^{с.г.} + 2 CH_4^{с.г.} + 3 C_2 H_4^{с.г.} - O_2^{с.г.}) =$$

$$= 0.01(0.5 \cdot 7.2 + 0.5 \cdot 20.9 + 2 \cdot 47.3 + 3 \cdot 2.80 - 0.4) = 1.17 \frac{M^3 O_2}{M^3 \text{газа}}$$

2. Определение теоретического расхода воздуха

$$L_o = (K+1) V_{O_2} \frac{M^3 \text{воздуха}}{M^3 \text{газа}}; L_o = 4.76 \cdot 1.17 = 5.6 \frac{M^3 \text{воздуха}}{M^3 \text{газа}}$$

3. Определение действительного расхода сухого воздуха.

$$L_\alpha = \alpha \cdot L_o \frac{M^3 \text{воздуха}}{M^3 \text{газа}}; L_\alpha = 1.15 \cdot 5.6 = 6.45 \frac{M^3 \text{воздуха}}{M^3 \text{газа}}$$

4. Определение действительного расхода влажного воздуха

$$L_\alpha^{в.в.} = (1 + 0.00124 \cdot q_{H_2O}^{с.в.}) L_\alpha \frac{M^3 \text{воздуха}}{M^3 \text{газа}};$$

$$L_\alpha^{в.в.} = (1 + 0.00124 \cdot 21.5) \cdot 6.45 = 6.8 \frac{M^3 \text{воздуха}}{M^3 \text{газа}}$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМНОГО ВЫХОДА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

1. Определение CO_2 в продуктах сгорания

$$V_{RO_2}^* = 0.01 \left(CH_4 + m C_m H_n + CO + CO_2 + H_2S + SO_2 \right) \frac{M^3 CO_2}{M^3 \text{газа}}$$

$$V_{CO_2}^{\alpha} = 0.01(CO_2^{C.F.} + CO^{C.F.} + CH_4^{C.F.} + 2C_2H_4^{C.F.}) =$$

$$= 0.01(11.2 + 7.2 + 47.3 + 2 \cdot 2.8) = 0.71 \frac{M^3 CO_2}{M^3 \text{ газа}}$$

2. Определение количества N_2 в продуктах сгорания

$$V_{N_2}^{C.F.} = K\alpha V_{O_2} + 0.01 N_2^{C.F.} \frac{M^3 N_2}{M^3 \text{ газа}};$$

$$V_{N_2}^{C.F.} = 3.76 \cdot 1.15 \cdot 1.17 + 0.01 \cdot 10.2 = 5.15 \frac{M^3 N_2}{M^3 \text{ газа}}$$

3. Количество избыточного O_2 в продуктах сгорания

$$V_{O_2}^{изб.} = (\alpha - 1) V_{O_2} \frac{M^3 O_2}{M^3 \text{ газа}}; V_{O_2}^{изб.} = 0.15 \cdot 1.17 = 0.18 \frac{M^3 O_2}{M^3 \text{ газа}}$$

4. Объем водяных паров в продуктах сгорания при теоретическом расходе воздуха

$$V_{H_2O}^O = 0.01 \left[H_2 + H_2S + \frac{n}{4} C_m H_n + 0.124 \left(q_{H_2O}^{C.F.} + q_{H_2O}^{C.B.} L_o \right) \right] \frac{M^3 H_2O}{M^3 \text{ газа}}$$

$$V_{H_2O}^O = 0.01(H_2 + 2CH_4^{C.F.} + 2C_2H_4^{C.F.}) + 0.00124(q_{H_2O}^{C.F.} + q_{H_2O}^{C.B.} \cdot L_o) =$$

$$= 0.01(20.9 + 2 \cdot 47.3 + 2 \cdot 2.8) + 0.00124(20 + 21.5 \cdot 5.6) = 1.21 + 0.17 = 1.4 \frac{M^3 H_2O}{M^3 \text{ газа}}$$

5. Объем водяных паров в продуктах сгорания при практическом расходе воздуха

$$V_{H_2O}^{\alpha} = V_{H_2O}^O + (\alpha - 1) L_o 0.00124 q_{H_2O}^{C.B.} \frac{M^3 H_2O}{M^3 \text{ газа}}$$

$$V_{H_2O}^{\alpha} = 1.4 + 0.15 \cdot 5.6 \cdot 0.00124 \cdot 21.5 = 1.42 \frac{M^3 H_2O}{M^3 \text{ газа}}$$

6. Объем продуктов сгорания

$$V_{\alpha}^{B.Д.} = V_{RO_2}^{\alpha} + V_{N_2}^{\alpha} + V_{H_2O}^{\alpha} + V_{O_2}^{изб.} \frac{M^3 \text{ В. ДЫМА}}{M^3 \text{ газа}}$$

$$V_{\alpha}^{B.Д.} = 0.71 + 5.15 + 1.42 + 0.18 = 7.46 \frac{M^3 \text{ В. ДЫМА}}{M^3 \text{ газа}}$$

7. Состав продуктов сгорания при полном горении.

$$V_{CO_2} = 100 \frac{V_{CO_2}^{\alpha}}{V_{\alpha}^{B.Д.}}; \quad V_{CO_2} = 100 \frac{0.71}{7.46} = 9.52\% ;$$

$$V_{N_2} = 100 \frac{V_{N_2}^{\alpha}}{V_{\alpha}^{B.Д.}}; \quad V_{N_2} = 100 \frac{5.15}{7.46} = 69\%$$

$$V_{H_2O} = 100 \frac{V_{H_2O}^{\alpha}}{V_{\alpha}^{B.Д.}}; \quad V_{H_2O} = 100 \frac{1.42}{7.46} = 19\% ;$$

$$V_{O_2} = 100 \frac{V_{O_2}^{\alpha}}{V_{H_2O}^{\alpha}}; \quad V_{O_2} = 100 \frac{0.18}{7.46} = 2.42\%$$

Таблица 2

Состав продуктов сгорания, %

CO_2	N_2	H_2O	$O_2^{изб.}$
9.56	69	19	2.42

Составим материальный баланс топлива на 100 м^3 газа.

ПРИХОД:

$$G_{CO_2} = \frac{\% CO_2 \cdot M_{CO_2}}{22.4} \text{ кг}; \quad G_{CO_2} = \frac{11.2 \cdot 44}{22.4} = 22 \text{ кг};$$

$$G_{C_2H_4} = \frac{28 \cdot 2.8}{22.4} = 3.5 \text{ кг}; \quad G_{CH_4} = \frac{47.3 \cdot 16}{22.4} = 33.7 \text{ кг}; \quad G_{N_2} = \frac{10.2 \cdot 28}{22.4} = 13 \text{ кг};$$

$$G_{H_2} = \frac{20.9 \cdot 2}{22.4} = 1.86 \text{ кг}; \quad G_{CO} = \frac{72 \cdot 2.8}{22.4} = 9 \text{ кг}; \quad G_{O_2} = \frac{0.4 \cdot 32}{22.4} = 0.57 \text{ кг};$$

M_{CO_2} — молекулярный вес CO_2

Влага топлива:

$$q_{H_2O}^{с.г.} \cdot \frac{100}{1000} = 20 \cdot 0.1 = 2 \text{ кг}$$

Воздух сухой:

$$\frac{L_{\alpha} \cdot M}{22.4} \cdot 100 = \frac{6.45 \cdot 29}{22.4} \cdot 100 = 836 \text{ кг}$$

Влага воздуха:

$$q_{H_2O}^{с.в.} \cdot L_{\alpha} \cdot \frac{100}{1000} = 21.5 \cdot 6.45 \cdot 0.1 = 13.42 \text{ кг}$$

КОМПОНЕНТЫ	$CO_2^{сг}$	$C_2H_4^{сг}$	$O_2^{сг}$	$CO_2^{сг}$	$CH_4^{сг}$	$H_2^{сг}$	$N_2^{сг}$	влага топл.	возд. сух.	Влага в-ха
кг	22	3.5	0.57	9	1.86	33.7	13	2	836	13.42

ИТОГО: 935.05 кг

РАСХОД:

$$G_{CO_2}^{в.д.} = \frac{V_{CO_2}^{в.д.} \cdot M_{CO_2}}{22.4} \cdot 100 \text{ кг}; \quad G_{CO_2}^{в.д.} = \frac{0.71 \cdot 44}{22.4} \cdot 100 = 140 \text{ кг};$$

$$G_{N_2}^{в.д.} = \frac{V_{N_2}^{в.д.} \cdot M_{N_2}}{22.4} \cdot 100 \text{ кг}; \quad G_{N_2}^{в.д.} = \frac{5.15 \cdot 28}{22.4} \cdot 100 = 642 \text{ кг};$$

$$G_{H_2O}^{в.д.} = \frac{V_{H_2O}^{в.д.} \cdot M_{H_2O}}{22.4} \cdot 100 \text{ кг}; \quad G_{H_2O}^{в.д.} = \frac{1.42 \cdot 18}{22.4} \cdot 100 = 114 \text{ кг};$$

$$G_{O_2}^{в.д.} = \frac{V_{O_2}^{в.д.} \cdot M_{O_2}}{22.4} \cdot 100 \text{ кг}; \quad G_{O_2}^{в.д.} = \frac{0.18 \cdot 32}{22.4} \cdot 100 = 25.7 \text{ кг}$$

ИТОГО: 921.7

кг

Компо- ненты	$CO_2^{в.д.}$	$H_2O^{в.д.}$	$N_2^{в.д.}$	O_2	неувязка	ИТОГО
кг	140	114	643	257	13.35	935.05

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НИЗШЕЙ ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ ПОЛУКОКСОВОГО ГАЗА

$$Q_H^p = Q_H^{с.г.} \cdot K; \text{ где } K = \frac{100 - V_{H_2O}}{100}; \quad V_{H_2O} = \frac{100 \cdot q_{H_2O}^{с.г.}}{803,6 + q_{H_2O}^{с.г.}};$$

$$Q_H^{с.г.} = 30.18 CO^{с.г.} + 25.79 H_2^{с.г.} + 85.55 CH_4^{с.г.} + 141.07 C_2H_4^{с.г.} + 55.2 H_2S^{с.г.} =$$

$$Q_H^p = 30.18 \cdot 7.2 + 25.79 \cdot 20.9 + 85.55 \cdot 47.3 + 141.07 \cdot 2.8 = 5180 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3 \text{газа}};$$

$$Q_H^p = 5180 \cdot 0.976 = 5050 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3 \text{газа}}.$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

Относительный химический недожог, обусловленный неудовлетворительным смешиванием газа и воздуха, принят для данной

горелки $\frac{q_3}{Q_H^p} \cdot 100 = 2 \%$.

Отсюда данный недожог будет равен $q_3 = \frac{2 \cdot Q_H^p}{100} = 101 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3 \text{газа}}.$

Физическое тепло, вносимое подогретым воздухом (приложение 2) составит:

сухим ВОЗДУХОМ — $Q_{c.в.} = i_o^{500C} \cdot L_{\alpha} \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3 \text{газа}};$

$$Q_{c.в.} = 160.35 \cdot 6.45 = 1030 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3 \text{газа}}$$

влажной ВОЗДУХА — $Q_{H_2O} = i_o^{500C} (L_{\alpha}^{в.в.} - L_{\alpha}) \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3 \text{газа}};$

$$Q_{H_2O} = 189.85 \cdot 0.35 = 66 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3 \text{газа}}$$

Вносится влажным воздухом тепла:

$$Q_{в.вх.} = Q_{c.в.} + Q_{H_2O} \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3 \text{газа}}; Q_{в.вх.} = 1030 + 66 = 1100 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3 \text{газа}}$$

Общий приход тепла:

$$Q_{общ}^{\delta} = Q_H^P + Q_{в.вх.} - q_3 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3 \text{газа}}; Q_{общ}^{\delta} = 5050 + 1100 - 101 = 6050 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3 \text{газа}},$$

что соответствует: $i_{общ}^{\delta} = \frac{Q_{общ}^{\delta}}{V_{\alpha}^{в.д.}};$

$$i_{общ}^{\delta} = i_k + i_v - q_3 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3 \text{продукт ов_сгорания}};$$

$$i_{общ}^{\delta} = \frac{6050}{7.46} = 820 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3 \text{продукт ов_сгорания}}.$$

По известному теплосодержанию, с помощью $i-t$ диаграмм / 3 / определяют температуру горения.

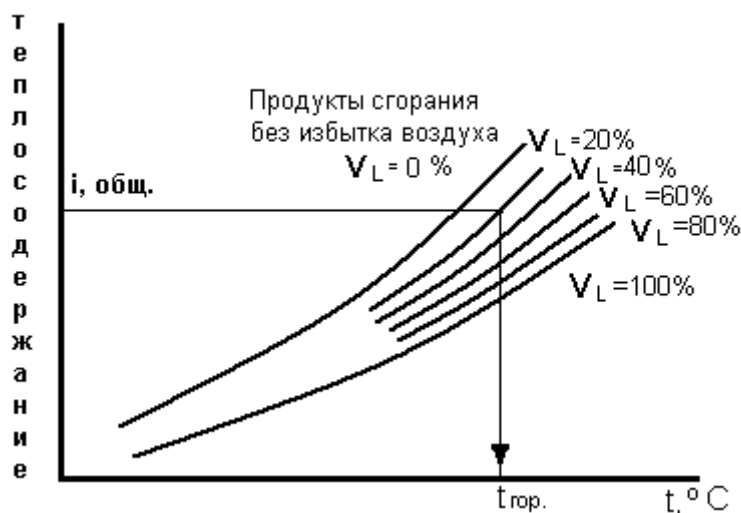


Рис.1. Общий вид $i-t$ диаграмм

Содержание избыточного воздуха $V_L = \frac{L_\alpha - L_o}{V_\alpha} \times 100\%$. Практическая температура $t_n = \eta \times t_o$, где $\eta = 0.9$ – пирометрический коэффициент (эмпирическая величина).

$$V_L = 9.3\%$$

$$t_{\text{гор}} = 1550^\circ \text{C}$$

Практическая температура горения:

$$t_n = t_{\text{гор}} \cdot \eta,$$

$$t_n = 1550 \cdot 0.9 = 1395^\circ \text{C}$$

ПРИМЕР № 2:

Топливо — мазут состава:

C^r	H^r	O^r	N^r	S^p	W^p	A^c
87.4	11.2	0.3	0.6	0.5	2	0.1

Температура подогрева воздуха в рекуператоре равна 500°C , $\alpha = 1.25$

Относительный химический недожог, обусловленный неудовлетворительным смешиванием мазута и воздуха, принят $\frac{q_3}{Q_H} \cdot 100 = 2\%$.

Температура воздуха, поступающая в воздухопровод, равна $t_b = 22^\circ \text{C}$.

Содержание в нем влаги $H_2O^{c.B.} = 21.5 \frac{\Gamma}{\text{M}^3}$.

Пересчитаем мазут данного состава на рабочую массу. Для пересчета используется таблица 3.

Таблица 3

Заданная масса топлива	Масса топлива, на которую ведется пересчет			
	органическая	горючая	сухая	рабочая

органическая	1	$\frac{100 - S^T}{100}$	$\frac{100 - (S^C + A^C)}{100}$	$\frac{100 - (S^P + A^P + W^P)}{100}$
условная горючая	$\frac{100}{100 - S^T}$	1	$\frac{100 - A^C}{100}$	$\frac{100 - (A^P + W^P)}{100}$
сухая	$\frac{100}{100 - (S^T - A^C)}$	$\frac{100}{100 - A^C}$	1	$\frac{100 - W^P}{100}$
рабочая	$\frac{100}{100 - (S^P + A^P + W^P)}$	$\frac{100}{100 - (A^P + W^P)}$	$\frac{100}{100 - W^P}$	1

Содержание золы в рабочей массе топлива:

$$A^P = A^C \cdot \frac{100 - W^P}{100} \% ; A^P = 0.1 \cdot \frac{100 - 2}{100} = 0.098\% ;$$

Коэффициент пересчета с горючей массы топлива на рабочую:

$$K = \frac{100 - (A^P + W^P)}{100} ; K = \frac{100 - (0.098 + 2)}{100} = 0.979 ;$$

Содержание компонентов в рабочей массе топлива:

$$H^P = K \cdot H^T \% ; H^P = 0.979 \cdot 1.2 = 11\% ;$$

$$O^P = K \cdot O^T \% ; O^P = 0.979 \cdot 0.3 = 0.29\% ;$$

$$C^P = K \cdot C^T \% ; C^P = 0.979 \cdot 87.4 = 85.53\% ;$$

$$S^P = K \cdot S^T \% ; S^P = 0.979 \cdot 0.5 = 0.789\% ;$$

$$N^P = K \cdot N^T \% ; N^P = 0.979 \cdot 0.5 = 0.58\% .$$

Результаты расчета состава рабочей массы топлива

C^P	H^P	O^P	N^P	S^P	A^P	W^P
85.53	11	0.29	0.58	0.489	0.098	2

1. Определение объема O_2 , необходимого для сжигания мазута

$$V_{O_2}^{*оп.} = V_{RO_2} + 0.056 \cdot (H^P - 0.125 \cdot O^P) \frac{M^3}{кг} ;$$

$$V_{O_2}^{*оп.} = 1.603 + 0.056 \cdot (11 - 0.125 \cdot 0.29) = 2.22 \frac{M^3}{кг} ;$$

2. Определение теоретического расхода воздуха

$$L_o = (K + 1) \cdot V_{O_2}^{*оп.} \frac{M^3}{кг} ; L_o = 4.76 \cdot 2.22 = 10.5 \frac{M^3}{кг} ;$$

3. Определение действительного расхода сухого воздуха

$$L_{\alpha}^{с.в.} = \alpha \cdot L_o \frac{M^3}{кг} ; L_{\alpha}^{с.в.} = 1.25 \cdot 10.5 = 12.1 \frac{M^3}{кг} ;$$

4. Определение действительного расхода влажного воздуха

$$L_{\alpha}^{B.B.} = (1 + 0.00124 \cdot q_{H_2O}^{c.B.}) \cdot L_{\alpha} \frac{M^3}{кг};$$

$$L_{\alpha}^{B.B.} = (1 + 0.00124 \cdot 21.5) \cdot 12.1 = 12.4 \frac{M^3}{кг};$$

5. Определение объема CO_2 в дымовых газах

$$V_{CO_2} = 0.0187 \cdot C^P \frac{M^3}{кг}; \quad V_{CO_2} = 0.0187 \cdot 85.53 = 1.5 \frac{M^3}{кг};$$

6. Определение объема SO_2 в дымовых газах

$$V_{SO_2} = 0.007 \cdot S^P \frac{M^3}{кг}; \quad V_{SO_2} = 0.007 \cdot 0.49 = 0.008 \frac{M^3}{кг};$$

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2} = 1.603 \frac{M^3}{кг};$$

7. Определение количества N_2 в продуктах сгорания

$$V_{N_2} = 3.76 \cdot \alpha \cdot V_{O_2}^{f.op.} + 0.01 \cdot 0.8 \cdot N^P \frac{M^3}{кг}; \quad V_{N_2} = 3.76 \cdot 1.15 \cdot 2.22 + 0.008 \cdot 0.58 = 9.6 \frac{M^3}{кг};$$

8. Количество избыточного O_2 в продуктах сгорания при L_0

$$V_{O_2}^{изб.} = (\alpha - 1) \cdot V_{O_2}^{f.op.} \frac{M^3}{кг}; \quad V_{O_2}^{изб.} = 0.15 \cdot 2.22 = 0.32 \frac{M^3}{кг};$$

9. Объем водяных паров в продуктах сгорания при L_0

$$V_{H_2O}^O = 0.01 \cdot (11.2 \cdot H^P + 1.241 \cdot (W^P + W_{\phi})) + 0.00124 \cdot q_{H_2O}^{c.B.} \cdot L_0;$$

W_{ϕ} (кг) — пар, используемый для распыливания мазута. В данном примере для распыливания мазута применяется воздух, причем расход распылителя входит в $\alpha = 1.25$, т.е. $W_{\phi} = 0$.

$$V_{H_2O}^O = 0.01(11.2 \cdot 11 + 1.244 \cdot 2) + 0.00124 \cdot 21.5 \cdot 10.5 = 1.53 \frac{M^3}{кг}$$

10. Объем водяных паров в продуктах сгорания при действительном расходе влажного воздуха

$$V_{H_2O}^{\alpha} = V_{H_2O}^O + 0.00124 q_{H_2O}^{c.B.} (\alpha - 1) L_0 \frac{M^3}{кг};$$

$$V_{H_2O}^{\alpha} = 1.53 + 0.00124 \cdot 21.5 \cdot 0.15 \cdot 10.5 = 1.574 \frac{M^3}{кг};$$

11. Объем продуктов сгорания

$$V_{\alpha}^{B.D.} = V_{RO_2} + V_{N_2}^{\alpha} + V_{H_2O}^{\alpha} + V_{O_2}^{изб.} \frac{M^3}{кг}; \quad V_{\alpha}^{B.D.} = 1.603 + 9.6 + 1.574 + 0.32 = 13.1 \frac{M^3}{кг};$$

Состав продуктов сгорания и материальный баланс определяется подобно примеру 1. Материальный баланс составляется на 100 кг мазута. Определение Q_H^P для твердого и жидкого топлива производится по формуле Д. И. Менделеева:

$$Q_H^P = 81 C^P + 246 H^P - 26(O^P - S^P) - 6 W^P \frac{\text{ккал}}{\text{кг}_\text{газа}};$$

$$Q_H^P = 81 \cdot 85.53 + 246 \cdot 11 - 26 \cdot (0.29 - 0.49) - 62 = 9620 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}_\text{газа}}.$$

Далее методика расчета подобна примеру 1.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА МЕТАЛЛА И РАЗМЕРОВ ПЕЧИ

При проведении расчётов нагрева обычно известны геометрические размеры и форма нагреваемого металла, его марка, начальная и конечная температура, конечная разность температур по сечению. Остальные величины вычисляются. Наряду с теоретическими методами определения продолжительности нагрева на заводах часто используют эмпирические формулы, в основу которых положены опытные данные или данные заводской практики.

Для камерных печей наиболее распространена формула Н.Н. Доброхотова

$$\tau = KD\sqrt{D}, \text{ час}$$

где τ - время нагрева от 0 до 1200° С,

D- толщина металла, м

K- коэффициент (для железа и мягкой стали K=10, для высоколегированной стали K=20).

Для методических печей пользуются формулой, выведенной Н. Ю. Тайцем:

$$\tau = (7 + 0.05 X_0) X_0, \text{ мин}$$

где X_0 - толщина слитков, см

Определив ориентировочное время нагрева деталей, и зная производительность печи, можно рассчитать вес садки и количество деталей в печи. Выбрав расположение изделий на поду печи, и выполнив эскиз, определяют основные размеры - длину, ширину и высоту рабочего пространства печи.

В практических расчётах высоту *камерных пламенных* печей определяют по формуле:

$$H = (A + 0.05 \cdot B)t \cdot 10^{-3} + h, \text{ м}$$

где H — высота печи, м;

h — толщина металла, м;

A — коэффициент, равный 0.5 - 0.6; меньшее значение для температуры 500–800° С, большее для 1300–1500° С;

B — ширина печи, м;

t — температура печи, °С.

Для *методических пламенных* печей начало (место посадки металла) имеет высоту 1.2 - 1.5 м; высота сварочной зоны 2.2 - 2.4 м; высота томильной зоны 1.3 - 1.7 м.

Для **проходных электрических** печей обычно принимают, что при ширине печи $D_{\text{печ.}}=0.5 - 0.6$ м высота рабочего пространства $H_{\text{печ.}}=0.4 - 0.45$ м. При $D_{\text{печ.}}=0.8 - 1.2$ м, $H_{\text{печ.}}=0.5 - 0.55$ м. При увеличении $D_{\text{печ.}}$ до $1.4 - 1.5$ м высота печи может быть принята равной 0.6 м.

В конце расчёта строится температурный график нагрева металла, по горизонтальной оси откладывается время, а по вертикальной — температура в $^{\circ}\text{C}$.

ПРИМЕР

Определить время нагрева заготовок из стали 50 размером $200 \times 200 \times 4000$ мм до температуры 1200°C . Производительность 50 т/час.

Расчет ведем по методике, описанной в / 1 /.

Температуру уходящих газов из печи примем $t_{\text{ух.}} = 800^{\circ}\text{C}$, а температуру в томильной зоне на 50°C выше, чем конечная температура нагрева металла (1200°C) — 1250°C .

Исходя из практических рекомендаций (1 мм металла прогревается за 1 минуту), при однорядном расположении заготовок (рис. 2) и при двухстороннем нагреве (т.е. толщина нагреваемого металла $S=0.1$ м), общее ориентировочное время нагрева составит 100 минут или 1.7 часа. Зная производительность и ориентировочное время нагрева, можно определить вес металла, одновременно находящегося в печи:

$$G = P \cdot \tau, \text{ кг}$$

Вес одной заготовки:

$$g = \rho \cdot V, \text{ кг}$$

где $\rho = 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ — плотность стали 50 / 10 /;

$V = 0.2 \cdot 0.2 \cdot 4 = 0.16 \text{ м}^3$ - объём заготовки.

$$g = 7800 \cdot 0.16 \approx 1248 \text{ кг}$$

Выберем температурный график нагрева (рис. 1).

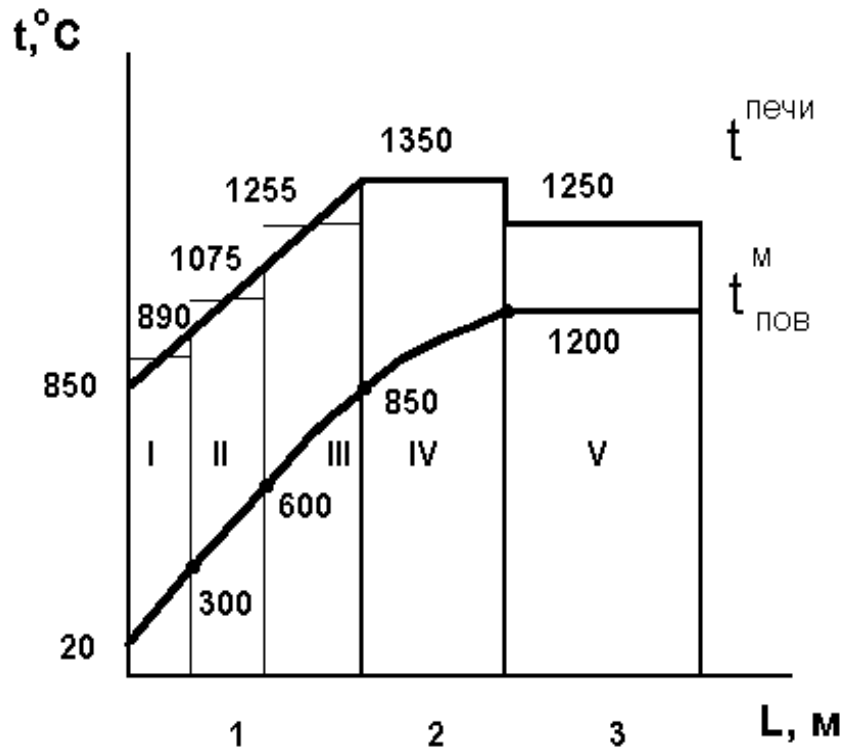


Рис. 1. Температурный график нагрева

I, II, III участки	— методическая зона	20 - 850° С
IV участок	— сварочная зона	850 - 1200° С
V участок	— томильная зона	1200° С

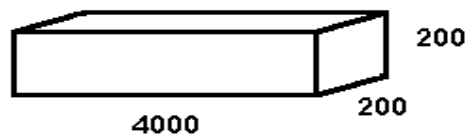


Рис. 2. Эскиз детали

Определим количество заготовок в печи:

$$h = \frac{G}{g} = \frac{85000}{1248} = 68 \text{ шт.}$$

Таким образом, ширина печи $B = 4 + 2 \cdot 0.25 = 4.5$ м (ширина заготовки плюс два зазора до стен по 0.25 м). Высоту методической зоны примем $h_M = 1.5$ м, сварочной- $h_{св} = 2.2$ м, томильной- $h_T = 1.3$ м (рис. 3).

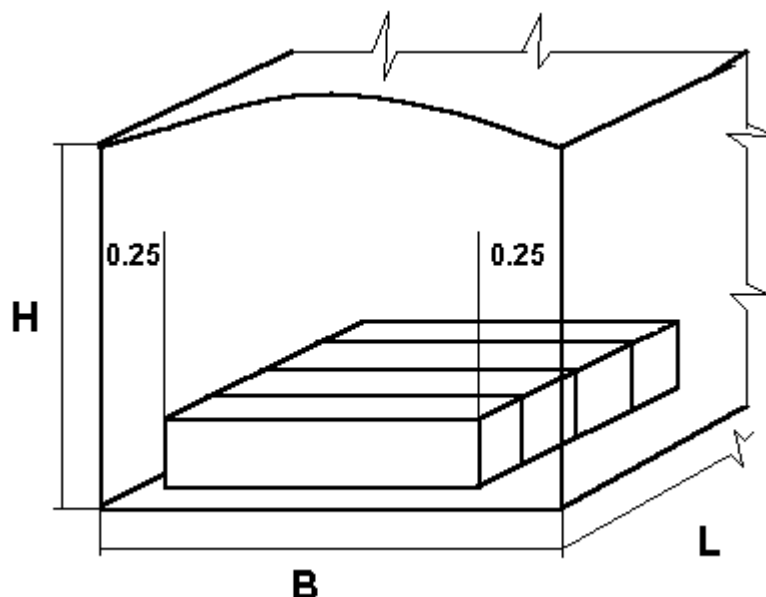


Рис. 3. Схема расположения заготовок в печи

Определим степень развития кладки $w = F_{\text{кл}} / F_M$,

где $F_{\text{кл}}$ - теплоизлучающая поверхность кладки, м^2 ;

F_M - тепловоспринимающая поверхность металла, м^2 .

$$F_{\text{кл}} = 2 \cdot H \cdot L_M + B \cdot L_M$$

Две боковые стены и свод, под закрыт металлом и поэтому не принимает участия в излучении.

$$F_M = B \cdot L_M$$

основная тепловоспринимающая поверхность металла (боковой поверхностью пренебрегаем)

$$F_{\text{кл}} = 2 \cdot 1.5 \cdot L_M + 4 \cdot L_M = L_M (2 \cdot 1.5 + 4) = 7 L_M$$

$$F_M = 4 L_M$$

$$w_M = \frac{7 L_M}{4 L_M} = 1.87 ;$$

$$w_{CB} = \frac{(2 \cdot 2.2 + 4.5) L_{CB}}{4 L_{CB}} = 2.23; \quad w_T = \frac{(2 \cdot 1.3 + 4.5) L_T}{4 L_T} = 1.78$$

Эффективная толщина газового слоя для определённой зоны печи может быть найдена из выражения:

$$S_{\text{эф}} = \eta \frac{4V}{F}, \text{ м}$$

где V - объём зоны, м^3 ;

F - суммарная площадь стен свода и пода зоны, м^2 ;

η - поправочный коэффициент, равный 0.9.

Для методической зоны:

$$S_{\text{эф}}^{\text{МЕТ}} = \frac{4(1.5 \cdot 4.5) L_M}{(2 \cdot 1.5 + 2 \cdot 4.5) L_M} \cdot 0.9 = 2.21 \text{ м}$$

$$V = B \cdot h_M \cdot L_M = 4.5 \cdot 1.5 \cdot L_M;$$

$$F = 2 \cdot h_M \cdot L_M + 2 \cdot B \cdot L_M = (2 \cdot h_M + 2 \cdot B) L_M.$$

Аналогично

$$S_{\text{эф}}^{\text{СВ}} = 0.9 \frac{(4 \cdot 2.2 \cdot 4.5) L_{\text{СВ}}}{(2 \cdot 2.2 + 2 \cdot 4.5) L_{\text{СВ}}} = 2.65 \text{ м}$$

$$S_{\text{эф}}^{\text{ТОМ}} = 0.9 \frac{(4 \cdot 1.3 \cdot 4.5) L_T}{(2 \cdot 1.3 + 2 \cdot 4.5) L_T} = 1.81 \text{ м}$$

1. Определим время нагрева на первом участке методической зоны.

Найдём степень черноты газов ε_{Γ} при $t_{\Gamma}^{\text{сп}} = 890 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$T_{\Gamma} = 890 + 273 = 1163^{\circ} \text{ К}.$$

Парциальное давление газов при этой температуре:

$$P_{\text{CO}_2} = 0.146 \text{ ат} = 14,3 \text{ кН/м}^2$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.138 \text{ ат} = 13,5 \text{ кН/м}^2$$

$$\left(1 \text{ кН/м}^2 = 0,01 \text{ ат} \right)$$

$$S_{\text{эф}} \cdot P_{\text{CO}_2} = 2.2 \cdot 14.3 = 31.46 \text{ кН/м}; \quad S_{\text{эф}} \cdot P_{\text{H}_2\text{O}} = 2.2 \cdot 13.5 = 27.9 \text{ кН/м}$$

По номограммам / 5 / находим $\varepsilon_{\text{CO}_2} = 0.15$; $\varepsilon'_{\text{H}_2\text{O}} = 0.19$.

$$\varepsilon_{\Gamma} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \varepsilon'_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \beta = 0.15 + 0.19 \cdot 1.08 = 0.355$$

где $\beta = 1.08$

Принимая степень черноты металла $\varepsilon_M = 0.8$, определим приведённый коэффициент излучения газов и кладки на металл:

$$C_{Г.К.М.} = C_o \varepsilon_M \frac{W+1-\varepsilon_\Gamma}{\left[\varepsilon_M + \varepsilon_\Gamma(1-\varepsilon_M)\right] \frac{1-\varepsilon_\Gamma}{\varepsilon_\Gamma} + W} \text{Вт} / \text{м}^2 \text{К}^4$$

$C_o = 5,7 \text{ Вт} / \text{м}^2 \text{К}^4$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела

$$C_{Г.К.М.} = 5,7 \cdot 0,8 \frac{1,87+1-0,355}{\left[0,8+0,355(1-0,8)\right] \frac{1-0,355}{0,355} + 1,87} = 3,22 \text{ Вт} / \text{м}^2 \text{К}^4$$

Коэффициент теплоотдачи излучением на 1 участке методической зоны будет равен:

$$\alpha'_L = C_{Г.К.М.} \frac{\left(\frac{T_\Gamma}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_M}{100}\right)^4}{T_\Gamma - T_M} \text{Вт} / \text{м}^2 \text{К}$$

где T_Γ - температура газа в печи, $^\circ\text{C}$

T_M - температура металла, $^\circ\text{C}$

(берутся средние значения для данного участка, т. е. $t_\Gamma = 890^\circ\text{C}$, $t_M = 160^\circ\text{C}$)

$$\alpha'_L = 3,22 \frac{\left(\frac{1163}{100}\right)^4 - \left(\frac{433}{100}\right)^4}{1163 - 433} = 78,3 \text{ Вт} / \text{м}^2 \text{К}$$

Находим критерий Био:

$$Bi = \alpha \cdot S / \lambda,$$

где S - толщина нагреваемого металла, м ($S = 0,1 \text{ м}$);

λ - коэффициент теплопроводности, $\text{Вт} / \text{мК}$;

При $t_M = 160^\circ\text{C}$, $\lambda = 48,4 \text{ Вт} / \text{мК} / 10 \%$.

$$Bi = \frac{78,3 \cdot 0,1}{48,4} = 0,162 < 0,25$$

Следовательно, на данном участке тело греется как термически тонкое и время нагрева определяется по формуле Старка:

$$\tau = \frac{G \cdot c}{\alpha \cdot F} \ln \frac{t_\Pi - t_M^H}{t_\Pi - t_M^K}, \text{ час}$$

где G - вес металла, кг ($G = V \cdot \rho = 0,2 \cdot 0,2 \cdot 4 \cdot 7800 = 1248 \text{ кг}$);

c - теплоёмкость, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \text{ } ^\circ\text{C}$, для данной марки стали $c = 0,524 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \text{ } ^\circ\text{C}$

/ 10 /, но т.к. α_L измеряется $\text{Вт}/\text{м}^2 \text{К}$, то $c = \frac{0.524 \cdot 10^3}{3600} \text{Вт}/\text{кг} \text{ } ^\circ \text{С}; \left(\text{Вт} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \right)$.

$$\tau_M^1 = \frac{(0.2 \cdot 0.2 \cdot 4 \cdot 7800) 0.524 \cdot 10^3}{78.3 \cdot 2 \cdot 0.2 \cdot 4 \cdot 3600} \ln \frac{890 - 20}{890 - 300} = 0.55 \text{ час}$$

Поскольку тонкое тело греется без перепада температур по сечению, средняя температура к концу 1 участка методической зоны составит 300°С .

2. Определим время нагрева для 2-го участка методической зоны.

Средняя температура печи- $t_{\text{п}} = 1075^\circ \text{С}$; металла – $t_M = \frac{300 + 600}{2} = 450^\circ \text{С}$.

$$S_{\text{эф}} \cdot P_{\text{CO}_2} = 31 \text{ кВт}/\text{м}; \quad S_{\text{эф}} \cdot P_{\text{H}_2\text{O}} = 29,7 \text{ кВт}/\text{м}$$

$$\varepsilon_{\Gamma} = 0.13 + 0.165 \cdot 1.08 = 0.31$$

$$C_{\text{Г.К.М.}} = 5.7 \cdot 0.8 \frac{1.87 + 1 - 0.31}{\left[0.8 + 0.31(1 - 0.8) \right] \frac{1 - 0.31}{0.31} + 1.87} = 3.13 \text{ Вт}/\text{м}^2 \text{ К}^4$$

$$\alpha_L = 3.13 \frac{\left(\frac{1075 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{450 + 273}{100} \right)^4}{1075 - 450} = 151 \text{ Вт}/\text{м}^2 \text{ К}$$

$$\lambda = 35 \text{ Вт}/\text{мК}; \quad c = \frac{0.687 \cdot 10^3}{3600} \text{ Вт}/\text{кг} \text{ } ^\circ \text{С}; / 10 /$$

$$Bi = \frac{151 \cdot 0.1}{35} = 0.43 \triangleright 0.25$$

Следовательно, на этом участке тело греется как термически массивное.

Определим величину температурного критерия / 5 / для поверхности металла:

$$\Theta_{\text{пов.}} = \frac{t_{\text{п}} - t_M^K}{t_{\text{п}} - t_M^H};$$

$$\Theta_{\text{пов.}} = \frac{1075 - 600}{1075 - 300} = 0,613$$

По номограмме по значениям Bi и Θ_{II} находим величину критерия Фурье, $F_o = 1.1 / 5$.

Коэффициент теплопроводности

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}, \text{ м}^2/\text{с}$$

$$a = \frac{35}{0,687 \cdot 10^3 \cdot 7800} \cdot 3600 = 0,024 \text{ м}^2/\text{с}$$

$$\tau_M^2 = \frac{F_o S^2}{a}, \text{ с}; \quad \tau_M^2 = \frac{1.1 \cdot 0.1^2}{0.024} = 0.505 \text{ с}$$

Определим температуру центра металла к концу нагрева на 2-ом участке методической зоны, для чего по значениям $F_o = 1.1$ и $Bi = 0.43$, пользуясь номограммой / 5 / для центра пластины найдём безразмерный температурный критерий для центра

$$\Theta_{II} = 0.67$$

Следовательно

$$\Theta_{II} = \frac{t_{II}^K - t_{II}^H}{t_{II}^K - t_{II}^H};$$

$$t_{II}^K = t_{II} - \Theta_{II} (t_{II} - t_{II}^H)$$

$$t_{II}^K = 1075 - 0.67(1075 - 300) = 555^\circ \text{C}$$

3. Определим время нагрева для 3-го участка методической зоны.

$$t_{II} = 1255^\circ \text{C}$$

$$t_M^H = 600^\circ \text{C}$$

$$t_{II}^H = 555^\circ \text{C}$$

$$t_M^{CP} = \frac{850 + 600}{2} = 725^\circ \text{C}$$

$$t_M^K = 850^\circ \text{C}$$

Аналогично предыдущей зоне получим:

$$\varepsilon_r = 0.12 + 0.14 \cdot 1.08 = 0.27$$

$$C_{г.к.м.} = 2.78 \text{ Вт}/\text{м}^2 \text{ К}^4;$$

$$\alpha_L = 232 \text{ Вт}/\text{м}^2 \text{ К}$$

При $t_M^{CP} = \frac{850 + 600}{2} = 725^\circ \text{C}$ — $\lambda = 30.2 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$; $c = 0,637 \text{ кДж}/\text{кг} \cdot \text{К}$

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} = \frac{30,2 \cdot 3600}{0,637 \cdot 7800 \cdot 10^3} = 0,022 \text{ м}^2/\text{с}$$

$$Bi = \frac{\alpha \cdot S}{\lambda} = \frac{232 \cdot 0.1}{30.2} = 0.77 > 0.25$$

Следовательно, на данном участке тело греется как термически массивное

$$\Theta_{II}^3 = \frac{1255 - 850}{1255 - 600} = 0,62; \quad F_0 = 0.7$$

$$\tau_M^3 = \frac{F_0 \cdot S^2}{a} = \frac{0.7 \cdot 0.1^2}{0.022} = 0.32 \text{ Г}$$

По номограмме и значениям $Bi=0.77$ и $F_0=0.7$ определим

$$t_{II}^3 = t_H - \Theta_{II}^3 (t_H - t_{II}^H); \quad t_{II}^3 = 1255 - 0,68(1255 - 555) = 780^\circ \text{ C}$$

Таким образом, полное время нагрева металла в методической зоне печи составит:

$$\tau_M = \tau_M^1 + \tau_M^2 + \tau_M^3 = 0.55 + 0.505 + 0.32 = 1.375 \text{ Г}.$$

4. Определим время нагрева в сварочной зоне.

$$P_{CO_2} = 14.3 \text{ кН/м}^2; \quad P_{H_2O} = 13.5 \text{ кН/м}^2$$

$$S_{эф} \cdot P_{CO_2} = 2.65 \cdot 14.3 = 37,9 \text{ кН/м}; \quad S_{эф} \cdot P_{H_2O} = 2.65 \cdot 13.5 = 35,7 \text{ кН/м}$$

$$t_{II} = 1350^\circ \text{ C}; \quad t_M^{CP} = \frac{1200 + 850}{2} = 1025^\circ \text{ C}$$

$$(t_M^H = 850^\circ \text{ C}; \quad t_M^K = 1200^\circ \text{ C}; \quad t_{II}^H = 780^\circ \text{ C})$$

$$\varepsilon_{Г} = 0.12 + 0.16 \cdot 1.07 = 0.29$$

$$C_{Г.К.М.} = 3.01 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4; \quad \alpha_{Л} = 383 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$$

$$\text{При } t_M^{CP} = \frac{1200 + 850}{2} = 1025^\circ \text{ C}; \quad \lambda = 26.7 \text{ Вт/м}^\circ \text{ C}; \quad c = 0.69 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}^\circ \text{ C}}$$

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} = 0.018 \text{ м}^2/\text{Г}; \quad Bi = 1.06 > 0.25$$

$$\Theta_{II}^{CB} = \frac{1350 - 1200}{1350 - 850} = 0,3 \Rightarrow F_0 = 1.1;$$

$$\tau_{CB} = \frac{1,1 \cdot 0,1^2}{0,018} = 0,61 \Gamma$$

Температурный критерий для центра пластины при $F_0 = 0,7$ и $Bi = 1,06$ будет равен $\Theta_{Ц} = 0,5$.

$$\text{Отсюда } t_{Ц}^{CB} = 1350 - 0,5(1350 - 780) = 1070^{\circ} C$$

5. Определим время выдержки (томления).

Разность температур по сечению металла в начале выдержки составит

$$\Delta t_H = t_H - t_{Ц} = 1200 - 1070 = 130^{\circ} C$$

Примем допустимую разность температур в конце выдержки $\Delta t_K = 50^{\circ} C$.

$$\text{Тогда величина } \Theta_{Ц} = \frac{\Delta t_K}{\Delta t_H} = 0,385.$$

Соответственно критерий Фурье составит $F_0 = 1,2$ ($Bi = 1,06$).

Средняя температура металла в зоне выдержки составит

$$t_{CP} = \frac{\frac{t_H + t_{Ц}^H}{2} + \frac{t_H + t_{Ц}^K}{2}}{2} = \frac{\frac{1200 + 1070}{2} + \frac{1200 + 1150}{2}}{2} = 1155^{\circ} C$$

Для этой температуры $\lambda = 29,5 \frac{Вт}{М^{\circ} C}$; $c = 0,68 \frac{кДж}{кг^{\circ} C}$

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} = \frac{25,9 \cdot 3600}{0,68 \cdot 10^3 \cdot 7800} = 0,02 \frac{М^2}{Г}$$

Время выдержки будет равно

$$\tau_T = \frac{1,2 \cdot 0,1^2}{0,02} = 0,6 \Gamma$$

Таким образом время пребывания металла в печи составит

$$\tau = \tau_M + \tau_{CB} + \tau_T = 1,375 + 0,61 + 0,6 = 2,58 \Gamma$$

В конце расчета построим температурный график нагрева металла (рис. 4)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ПЕЧИ

Для обеспечения заданной производительности $P = 50 \text{ т/ч}$ в печи постоянно должно находиться следующее количество металла:

$$G = 50 \cdot 2.58 = 129 \text{ т}$$

вес одной заготовки:

$$g = V \cdot \rho = 0.2 \cdot 0.2 \cdot 4 \cdot 7.8 = 1.2 \text{ т}$$

Найдём число заготовок в печи

$$n = \frac{G}{g} = \frac{129}{1.2} = 107 \text{ шт}$$

При однорядном расположении заготовок длина печи $L = 0.2 \cdot 107 = 21.5 \text{ м}$; ширина печи $B = 4 + 2 \cdot 0.25 = 4.5 \text{ м}$; площадь активного пода $F_A = 21.5 \cdot 4 = 86 \text{ м}^2$;

площадь габаритного пода $F_G = 21.5 \cdot 4.5 = 97 \text{ м}^2$. Высоту печи принимаем ту, что была принята при предварительном расчёте.

Всю длину делим на зоны пропорционального нагрева:

длина методической зоны $L_M = \frac{21.5}{2.58} \cdot 1.375 = 11.4 \text{ м}$;

длина сварочной зоны $L_{CB} = \frac{21.5}{2.58} \cdot 0.61 = 5.1 \text{ м}$;

длина томильной зоны $L_T = \frac{21.5}{2.58} \cdot 0.6 = 5 \text{ м}$.

Напряжённость габаритного пода $H_G = \frac{50000}{97} = 515 \text{ кг/м}^2 \text{ Г}$.

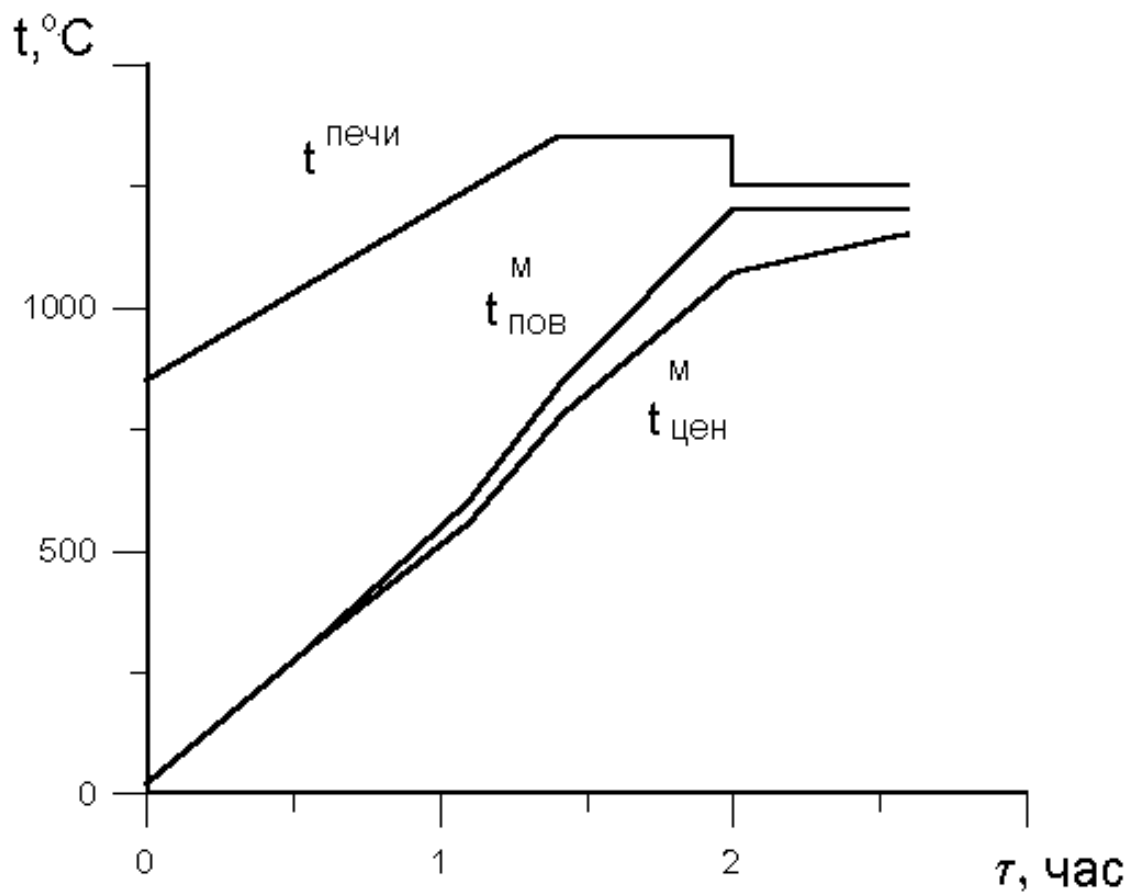


Рис. 4. Уточненный график нагрева

3. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПЕЧИ

Перед расчётом теплового баланса необходимо выполнить эскиз рассчитываемой печи с указанием размеров кладки и выбранных материалов для её изготовления.

Толщину печных стенок принимают с учётом требований строительной прочности и температуры в рабочем пространстве печи. С точки зрения строительной прочности необходимо принимать во внимание высоту вертикальных стен и ширину пролёта, перекрываемого лучковым сводом, а также кривизну последнего, характеризуемую центральным углом. В таблице 3 даны рекомендации для нагревательных печей / 4 /.

Таблица 3
Рекомендуемые толщины кладки нагревательных печей

Элементы кладки	Температура внутренней поверхности кладки, °С	Толщина огнеупорного слоя, мм	Толщина теплоизоляционного слоя, мм
Стены высотой до 1 м	1000-1200	232	232
	выше 1200	232	348
Стены высотой 1-2 м	до 1200	232	232
	выше 1200	232-348	348
Стены высотой 3 м	1000-1200	348	232
Своды лучковые пролетом до 1 м и центральным углом 60°	до 1200	116	65-230
	выше 1200	232	65-230
Своды лучковые пролетом до 3.5 м и центральным углом 60°	до 1200	232	65-230
	выше 1200	300	65-230
Своды лучковые пролетом более 5 м и центральным углом 60°	до 1200 и выше	300	65-230

В зависимости от температуры внутренней поверхности кладки стенки нагревательных печей могут быть выложены из различных материалов. При температуре внутренней поверхности свода до 1000°C его можно выкладывать из шамотного кирпича классов А и Б. При более высоких температурах - из шамотного кирпича класса А или из динасового кирпича.

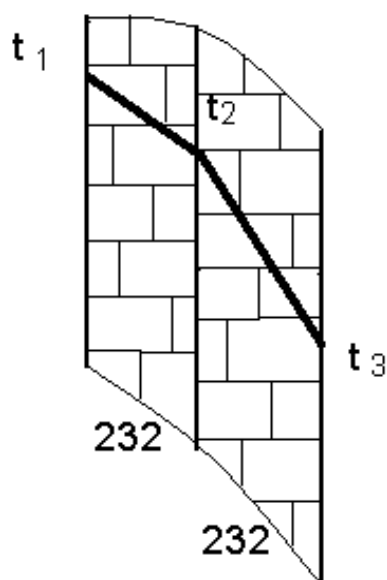
Тепловую изоляцию стен в ряде случаев можно проектировать из диатомитового кирпича, вермикулитовых плит, минерального войлока, асбестового картона. При расчёте кладки необходимо помнить, что температура на поверхности кожуха печи не должна превышать 60°C в соответствии с нормами по технике безопасности.

Рассмотрим расчёт кладки на примере:

Исходные данные: температура внутренней поверхности кладки печи составляет $t_{II} = 900^{\circ}\text{C}$; температура окружающего воздуха $t_B = 20^{\circ}\text{C}$.

Расчет ведем по методике, описанной в / 2 /.

В расчёте принимаем двухслойную кладку, огнеупорный слой которой будет сделан из шамота Б толщиной 232 мм , $\rho = 1900\text{ кг/м}^3$, $t_{раб} = 1400^{\circ}\text{C}$, а изоляционный - из диатомита толщиной 232 мм , $\rho = 500\text{ кг/м}^3$, $t_{раб} = 900^{\circ}\text{C}$ (рис. 5).



При расчёте потерь кладкой трудно определить коэффициент теплопроводности слоёв кладки, зависящий от температуры. Поэтому его рассчитывают, исходя из средней температуры слоя. Определим температуру на границе слоя:

$$t_2 = \frac{(t_{II} + t_B)}{2}, \quad ^{\circ}\text{C}$$

где t_{II} - температура внутренней поверхности кладки, $^{\circ}\text{C}$;

t_B - температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$.

$$t_2 = \frac{(900 + 20)}{2} = 460^{\circ}\text{C}$$

Рис. 5. Распределение температуры по толщине кладки

Средняя температура слоя шамота:

$$t_{ш} = (t_1 + t_2) / 2, \text{ } ^\circ C; \quad t_{ш} = (900 + 460) / 2 = 680^\circ C$$

Средняя температура слоя диатомита:

$$t_{д} = (t_1 + t_2) / 2, \text{ } ^\circ C; \quad t_{д} = (460 + 20) / 2 = 240^\circ C$$

Коэффициент теплопроводности шамота и диатомита определяют из следующих выражений (приложение 3):

$$\lambda_{ш} = 1.041 + 1.512 \cdot 10^{-4} \cdot t, \text{ } Bm / M^\circ C;$$

$$\lambda_{д} = 0.1046 + 2.33 \cdot 10^{-4} \cdot t, \text{ } Bm / M^\circ C$$

$$\lambda_{ш} = 1.041 + 0.0001512 \cdot 680 = 1.144 \text{ } Bm / M^\circ C;$$

$$\lambda_{д} = 0.1046 + 0.000233 \cdot 240 = 0.160 \text{ } Bm / M^\circ C$$

Определим количество тепла, передаваемого теплопроводностью через 1 м² кладки, по формуле:

$$Q = \frac{t_{кл} - t_B}{\frac{S_{ш}}{\lambda_{ш}} + \frac{S_{д}}{\lambda_{д}} + 1/\alpha}, \text{ } Bm / M^2$$

где $t_{кл}$ - температура кладки печи, $^\circ C$;

t_B - температура окружающего воздуха, $^\circ C$;

$S_{ш}, S_{д}$ - толщина шамотного и диатомитового слоёв, м;

$\lambda_{ш}, \lambda_{д}$ - коэффициенты теплопроводности шамота и диатомита, $Bm / M^\circ C$;

α - коэффициент теплопередачи от стенки к воздуху, равный $19.8 \text{ } Bm / M^\circ C$,

тогда $1/\alpha = 0.052 \text{ } M^\circ C / Bm$.

$$Q = \frac{900 - 20}{\frac{0.232}{1.144} + \frac{0.232}{0.160} + 0.052} = 516 \text{ } Bm / M^2$$

С другой стороны, на основании закона Фурье (для граничных условий 1-го рода)

$$Q = \lambda / S (T_1 - T_2), \text{ } Bm / M^2$$

Отсюда

$$t_2 = t_1 - Q \frac{S}{\lambda}, \text{ } ^\circ \text{C}$$

Используя это выражение, найдём температуру на границе огнеупорного и изоляционного слоёв:

$$t_2 = t_1 - Q \frac{S_{ин}}{\lambda_{ин}}, \text{ } ^\circ \text{C}; \quad t_2 = 900 - 516 \frac{0.232}{1.144} = 795^\circ \text{C}$$

Температура на поверхности кладки:

$$t_3 = 795 - 516 \frac{0.232}{0.160} \approx 47^\circ \text{C}$$

Таким образом, температура на границе слоев (795°C) не превышает предельной рабочей температуры слоя диатомита (900°C) и учитывая, что температура на поверхности кожуха печи будет ещё ниже, делаем вывод, что толщина огнеупорного слоя и слоя изоляции выбрана верно.

При значительном отклонении температуры поверхности кладки от 60°C необходимо уточнить толщину слоёв и снова выполнить расчёт.

Выбор материала кладки печей и её расчёт можно выполнить на ПЭВМ, по программе, разработанной на кафедре ММС / 7 /.

Тепловой баланс печи состоит из приходной и расходной частей, которые необходимо рассчитать, чтобы определить потребное количество теплоносителя (топлива или электроэнергии).

Статьи *приходной* части теплового баланса:

- химическое тепло топлива (для электрических печей - тепло, выделяемое на нагревателях);
- тепло подогретого воздуха;
- тепло подогретого топлива;
- тепло экзотермических реакций.

Статьи *расходной* части:

- полезное тепло, затраченное на нагрев изделий;
- потери тепла с уходящими газами;
- потери тепла теплопроводностью через кладку печи;
- потери тепла на нагрев приспособлений и транспортирующих устройств;
- потери тепла, обусловленные «тепловыми короткими замыканиями»;
- потери тепла с охлаждающей водой;
- аккумуляция тепла кладкой.

После расчёта отдельных статей баланса, их вносят в сводную таблицу. Затем определяют удельный расход условного топлива или электроэнергии, вычисляют коэффициент использования тепла, к.п.д. печи.

Коэффициент полезного теплоиспользования ($\eta_{к.п.т.}$) может быть найден из следующего выражения:

$$\eta_{к.п.т.} = \frac{Q_x - \sum Q_{пот.}}{Q_x}, \%$$

где Q_x - количество тепла, получаемое от теплоносителя, *Вт*

$Q_{пот.}$ - тепловые потери, *Вт*

Для современных печей $\eta_{к.п.т.} = 20 \div 50 \%$, для электрических $\eta_{к.п.т.} \geq 70 \%$.

К.п.д. печи определяют из следующего выражения:

$$\eta = \frac{Q_{пол}}{Q_x} \cdot 100, \%$$

где $Q_{пол}$ - полезное тепло, затраченное на нагрев металла, *Вт*

Мощность (тепловую или электрическую) рассчитывают по формуле:

$$N = K \frac{Q_x}{\tau}, \text{ кВт} / \text{Г}$$

где K - коэффициент запаса, учитывающий форсированный режим работы печи, понижение напряжения в сети, ухудшение тепловой изоляции; для камерных печей $K=1,3 \div 5,0$; для проходных печей $K=1, 2 \div 1,3$.

τ - продолжительность нагрева, *ч*.

Следует отметить, что для электрических печей сопротивления, расчётную мощность следует увеличить на 25-50% , по этой увеличенной мощности и следует рассчитывать электронагреватели.

4. ВЫБОР И РАСЧЁТ ТОПЛИВОСЖИГАЮЩИХ УСТРОЙСТВ (ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ).

Устройства для сжигания топлива предназначены для того, чтобы обеспечить превращение химической энергии топлива в тепловую. Устройства для сжигания газообразного топлива называют горелками, жидкого (мазута) - форсунками. Расчёт горелок и форсунок сводится к определению диаметров воздушного и газового (мазутного) сопла и выбору стандартного устройства, близкого по параметрам к расчётным. Причём расчёт горелок можно вести по двум вариантам.

1 вариант.

1. Выбирают стандартную горелку, то есть задаются диаметром носика горелки ($d_{н.г.}$).
2. Определяют расход газа через горелку (B_r).
3. Определяют количество горелок (n).

$$n = \frac{B}{B_r}, \text{шт}$$

где B - расход топлива, $\text{м}^3/\text{г}$

2 вариант.

1. Задаются числом горелок (n).
2. Определяют расход газа через одну горелку (B_r).
3. Зная расход газа через одну горелку, определяют диаметр носика горелки ($d_{н.г.}$).

По известному $d_{н.г.}$ находят все остальные конструктивные размеры из справочника.

Расчёт электронагревателей.

Электрические нагревательные элементы сопротивления промышленных нагревательных устройств изготавливаются из металлических и неметаллических материалов. Для установок с рабочей температурой до 1000°C применяют металлические нагреватели, а для высокотемпературных установок (рабочая температура более 1100°C) керамические нагревательные элементы, обычно из карбида кремния SiC , карбида циркония ZrC , карбида гафния HfC и металлические нагреватели из W , Mo при работе в вакууме. Основные требования к материалу нагревателей сводятся к высокой жаростойкости, прочности при высоких температурах, невысокому коэффициенту линейного расширения, высокому удельному электросопротивлению, отсутствию фазовых превращений, низкой стоимости материала и простоте изготовления. Обычно в качестве материала для металлических нагревателей используют сплавы типа «нихром», ферритные

высокохромистые стали ($Cr \approx 25\%$) с добавками алюминия. Лучшими сплавами являются никель-хромовые композиции — нихромы, но они дорогие, так как содержат много никеля. Хромоалюминиевые сплавы сравнительно дешёвы, но они склонны к старению, росту зерна при нагреве и потере пластичности, что приводит к их механическому разрушению. Основные характеристики сплавов сопротивления приведены в табл. 4.

Таблица 4

Характеристики сплавов

Название	Марка сплава	Максимально допустимая температура нагревателя, °C	Удельное электрическое сопротивление $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$	Удельный вес $\text{г} / \text{см}^3$	Выпускаемые типоразмеры (или сечение), мм
Хромо-никелевые сплавы (нихромы)	X20H80	1100 °C	1.15	8.4	Проволока $\varnothing 1 \div 10 \text{ мм}$ или лента $a \times b$; $a = 1 \div 3 \text{ мм}$, $b = 8 \div 40 \text{ мм}$
	X20H80T	1150 °C	1.10	8.4	
	X15H60	1000 °C	1.10	8.4	
	XH7OЮ	1200 °C	1.10	8.2	
	XH6OЮЗ	1150 °C	1.10	8.2	
Хромоалюминиевые сплавы (фехрали)	X27Ю5Т	1300 °C	1.40	7.5	Проволока $\varnothing 1 \div 10 \text{ мм}$ или лента $a \times b$; $a = 1 \div 3 \text{ мм}$, $b = 8 \div 40 \text{ мм}$
	X23Ю5	1300 °C	1.35	7.3	
	X23Ю5Т	1400 °C	1.35	7.2	
	X37Ю3ТЛ	1400 °C	1.40	7.3	

При расчёте электрических нагревателей необходимо помнить, что для более точного регулирования температуры большие электропечи разделяют на самостоятельно регулируемые тепловые зоны, число которых выбирают в зависимости от соотношения длины L печи к её ширине B или диаметру D .

Наилучшая равномерность распределения температуры при

$$L_{\text{зоны}} = (1.0 \div 1.5) B \text{ и } L = (1.0 \div 1.5) D$$

Распределение мощности:

1. трёхзонные печи $0.5 N_{\text{уст}}$; $0.3 N_{\text{уст}}$; $0.2 N_{\text{уст}}$;
2. двухзонные печи $(0.65 \div 0.75) N_{\text{уст}}$; $(0.25 \div 0.35) N_{\text{уст}}$.
3. в шахтных печах мощность верхней тепловой зоны на 20-40% больше мощности остальных тепловых зон.

Мощность одного нагревателя каждой зоны должна быть не более 25 кВт. Рабочая температура нагревателей принимается на 50 – 200°С выше

температуры печи. Для печей с принудительной циркуляцией эта разница может быть и выше.

При расчёте нагревателей определяют диаметр, длину, массу и сечение; нагреватели могут быть проволочными и ленточными.

I проволочные	II ленточные
$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 10^5 \cdot P^2 \rho_t}{\pi^2 U^2 \nu}}$	$a = \sqrt[3]{\frac{5 \cdot 10^4 \cdot P^2 \rho_t}{m(m+1) U^2 \nu}}$
$l = \sqrt[3]{\frac{10 P U^2}{4 \pi \rho_t \nu^2}}$	$l = \sqrt[3]{\frac{2.5 P U^2 m}{(m+1)^2 \rho_t \nu^2}}$
$g = \gamma \sqrt[3]{\frac{0.63 \cdot 4 \rho_t \cdot P^5}{U^2 \nu^4}}$	$g = \gamma \sqrt[3]{\frac{0.625 \cdot m \rho_t \cdot P^5}{(m+1)^4 U^2 \nu^4}}$

где d - диаметр, мм; a - толщина, мм; l - длина, м; g - масса, кг; ν - поверхностная нагрузка нагревателя, Вт/см²; γ - плотность, кг/м³; P - мощность, кВт; U - напряжение на нагревателе, В; ρ_t - удельное электросопротивление, Ом·мм²/м

для нихрома $\rho_t = \rho_o (1 + \beta t) = (1.0 \div 1.2)(1 + 0.0001t)$; m - соотношение сторон ленты (обычно $m=10$)

Поверхностная нагрузка нагревателя ν зависит от температуры, так например для нихрома при $t = 600^\circ \text{C}$ $\nu = 2.6 \div 3.2 \text{ Вт/см}^2$; при $t = 900^\circ \text{C}$ $\nu = 1.1 \div 1.5 \text{ Вт/см}^2$; при $t = 1100^\circ \text{C}$ $\nu = 0.5 \div 0.7 \text{ Вт/см}^2$.

По вычисленной длине l и сечению нагревателей определяют его конструктивные особенности

5. РАСЧЁТ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Лучшим методом повышения термического к.п.д. печей, а следовательно, и экономии топлива, является возврат в печь части тепла, содержащегося в отходящих дымовых газах, путём подогрева в рекуператорах воздуха, используемого для горения топлива, а также путём подогрева горючего газа. В промышленности применяют керамические и металлические рекуператоры, причём последние внедряют в промышленность всё в больших масштабах. При расчёте рекуператоров определяют число труб, секций и ходов. Рассмотрим расчёт рекуператора на примере / 2 /.

ПРИМЕР

Рассчитать игольчатый рекуператор для двухзонной методической печи, отапливаемой смесью коксового и доменного газов $Q_H^p = 8380 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$, в которой расход топлива (при работе рекуператора) составляет $2160 \frac{\text{м}^3}{\text{г}}$; температура подогрева воздуха 300°C ; $t_o^H = 850^\circ \text{C}$; $t_B^H = 0^\circ \text{C}$; состав дымовых газов 15% CO_2 , 15% H_2O ; 70% N_2 ;

из расчёта горения топлива $V_{\text{возд.}} = 4300 \frac{\text{м}^3}{\text{г}}$;

$$V_{\text{т.опл}} = 6050 \frac{\text{м}^3}{\text{г}}$$

Решение:

1. Выберем трубы с иглами, только на воздушной стороне, длиной 880 мм. Примем скорость движения воздуха $u_B = 6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, дыма — $u_D = 3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

2. Составим тепловой баланс рекуператора. Для выбора теплоёмкости дымовых газов предположим, что $t_D^K = 600^\circ \text{C}$.

Теплоёмкость дымовых газов при

$$t_D^K = 600^\circ \text{C}$$

$$t_D^H = 850^\circ \text{C}$$

$$C_{\text{N}_2} = 1.34 \cdot 0.7 = 0.938 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ \text{C}}$$

$$C_{\text{N}_2} = 1.37 \cdot 0.7 = 0.96 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ \text{C}}$$

$$C_{\text{CO}_2} = 2.06 \cdot 0.15 = 0.309 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ \text{C}}$$

$$C_{\text{CO}_2} = 2.17 \cdot 0.15 = 0.325 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ \text{C}}$$

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = 1.61 \cdot 0.15 = 0.241 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ \text{C}}$$

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = 1.67 \cdot 0.15 = 0.25 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ \text{C}}$$

$$C_\Sigma = 1.488 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ \text{C}}$$

$$C_\Sigma = 1.535 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ \text{C}}$$

Потери тепла в окружающую среду 10%.

Уравнение теплового баланса:

$$0.9 \cdot B_{\text{топл}} \cdot (C_{\Sigma} t_{\text{Д}}^{\text{н}} - C_{\Sigma} t_{\text{Д}}^{\text{к}}) = C_{\text{В}} \cdot t_{\text{В}}^{\text{к}} \cdot B_{\text{возд}};$$

$$0.9 \cdot 6050 \cdot (1.535 \cdot 850 - 1.488 \cdot t_{\text{Д}}^{\text{к}}) = 1.32 \cdot 300 \cdot 4300 \approx 1720000 \text{ кДж/Г}$$

откуда $t_{\text{Д}}^{\text{к}} \approx 660^{\circ} \text{C}$

3. Определим Δt_{CP} (считаем, что движение газа происходит по схеме перекрёстного противотока). Пренебрегая поправкой на перекрёстный ток $\Delta t_{\text{CP}} = f \Delta t_{\text{CP.ПРОТИВОТОКА}}$ определим Δt_{CP} .

Определим, по какому закону изменяется температура

$$\frac{\Delta t_{\text{К}}}{\Delta t_{\text{Н}}} = \frac{(850 - 300)}{(660 - 0)} = 0.833, \text{ т.к. } \frac{\Delta t_{\text{К}}}{\Delta t_{\text{Н}}} > 0.5$$

$$\Delta t_{\text{CP}} = \frac{(850 - 300) + (660 - 0)}{2} = 605^{\circ} \text{C}$$

4. Определим K , применяя график / 9 / При $V_{\text{Д}} = 3.0 \text{ М/с}$ и $V_{\text{В}} = 6 \text{ М/с}$

$$K = 36 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \text{ } ^{\circ} \text{C}.$$

5. Определим общую поверхность нагрева и размеры рекуператора из выражения:

$$F = \frac{Q}{K \Delta t_{\text{CP}}}, \text{ м}^2$$

$$F = \frac{1720000 \cdot 10^3}{36 \cdot 605 \cdot 3600} = 22 \text{ м}^2$$

Условная поверхность нагрева каждой трубы длиной 880 мм без наружных игл (определяется по таблице) составляет 0.25 м². Следовательно, общее число труб рекуператора составит

$$n = \frac{22}{0.25} = 87.5 = 88 \text{ труб}$$

Необходимое общее сечение для прохода воздуха:

$$f_{\text{В}} = \frac{4300}{3600 \cdot 6} = 0.199 = 0.2 \text{ м}^2$$

Необходимое сечение для прохода дыма:

$$f_{\text{Д}} = \frac{6050}{3600 \cdot 3.5} = 0.48 \text{ м}^2$$

Ориентировочно должно быть труб на пути воздуха:

$$m = \frac{0.2}{0.008} = 25$$

На пути движения дыма:

$$T = \frac{0.48}{0.06} = 8$$

Сечение для прохода воздуха 0.008 м и сечение для прохода дыма 0.060 м берутся из таблицы / 9 /. Следовательно, 88 труб должны быть распределены так на секции, чтобы по воздуху на каждую секцию приходилось 25 труб.

Таким образом, в рассчитываемом рекуператоре должно быть предусмотрено $88/25 = 3.6$ секций (хода) по 25 труб в каждой. Принимаем, что воздух последовательно проходит 4 секции по 24-м трубам в каждой. В секции 24 трубы располагаются в 3 ряда, в ряду 8 труб.

6. РАСЧЕТ ДЫМООТВОДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ

При расчёте дымоотводящей системы (дымовых каналов, боровов), определяется необходимое разрежение для удаления продуктов горения из печи, размеры дымовой трубы и каркаса печи.

ПРИМЕР

Расчет будем вести согласно методике представленной в / 4 /.

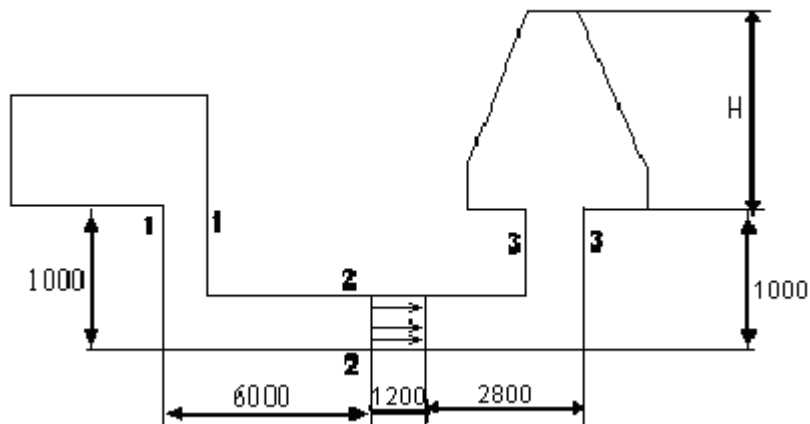


Рис.6. Дымовой тракт.

Таблица 6

Коэффициенты расхода воздуха и температуры в соответствующих точках

точки	1	2	3
α	1.2	1.3	1.6
$t, ^\circ\text{C}$	800	730	649

Количество продуктов сгорания в определенных сечениях:

$$V_d = \frac{B \cdot V_\alpha}{3600}, \text{ м}^3/\text{с}; \quad V_\partial = \frac{23.12 \cdot V_\alpha}{3600} = 0.0064 \cdot V_\alpha \text{ м}^3/\text{с};$$

Площади поперечных сечений дымового канала и борова:

$$F_1 = 0.97 \text{ м}^2; \quad F_2 = 1 \text{ м}^2.$$

Таблица 7

Параметры, характеризующие дымовые газы в соответствующих точках

Величины	Точки			Формулы для расчета
	1	2	3	
$\acute{\alpha}$	1.2	1.3	1.6	
$L_0, \frac{M^3}{M^3}$	1.38	1.38	1.38	
$L_{\acute{\alpha}}, \frac{M^3}{M^3}$	1.656	1.794	2.208	$L_{\acute{\alpha}} = L_0 \acute{\alpha}$
$V_{\acute{\alpha}}, \frac{M^3}{M^3}$	2.61	2.61	2.61	
$V_D, \frac{M^3}{M^3}$	0.159	0.159	0.159	$V_D = 0.0061 V_{\acute{\alpha}}$
F, M^2	0.97	1	1	
$v_0, \frac{M}{c}$	2	2.07	2.48	$v_0 = \frac{V_D}{\omega}$

Потери давления на местных сопротивлениях рассчитаем исходя из формулы[4]:

$$\Delta P = \left(\lambda_{mp} \cdot \frac{L}{d_{\text{э}}} \right) \cdot \left(\rho_0 \cdot \frac{\omega_0^2}{2} \right) \cdot \left(1 + \frac{T}{273} \right) \frac{H}{M};$$

$$\text{сечение 1-1} \quad \Delta P_1 = 0.5 \cdot \frac{2^2}{2} \cdot 1.31 \cdot \left(1 + \frac{800}{273} \right) = 5.16 \frac{H}{M^2};$$

$$\text{сечение 2-2} \quad \Delta P_2 = 1 \cdot \frac{2.07^2}{2} \cdot 1.31 \cdot \left(1 + \frac{730}{273} \right) = 10.33 \frac{H}{M^2};$$

$$\text{сечение 3-3} \quad \Delta P_3 = 1 \cdot \frac{2.48^2}{2} \cdot 1.31 \cdot \left(1 + \frac{649}{273} \right) = 6.79 \frac{H}{M^2};$$

Потери на трение:

$$\Delta P_7 = \lambda_{TP} \cdot \frac{l}{d_{\text{э}}} \cdot \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \rho_0 \cdot (1 + \beta \cdot t), \frac{H}{M^2};$$

$$\text{в вертикальном канале} \quad \Delta P_7 = 0.05 \cdot \frac{3.5^2}{0.92} \cdot \frac{2^2}{2} \cdot 1.31 \cdot \left(1 + \frac{730}{273} \right) = 4.6 \frac{H}{M^2};$$

$$\text{в борове} \quad \Delta P_8 = 0.05 \cdot \frac{6}{0.64} \cdot \frac{2.48^2}{2} \cdot 1.31 \cdot \left(1 + \frac{649}{273} \right) = 10.15 \frac{H}{M^2};$$

Потери на геометрическое давление в вертикальном канале:

$$\Delta P_9 = H \cdot g \cdot (\rho_a - \rho_r), \text{ H/м}^2;$$

$$\Delta P_9 = 9.8 \cdot 2.6 \cdot \left(\frac{1.29}{1 + \frac{20}{273}} - \frac{1.31}{1 + \frac{730}{273}} \right) = 21.55 \text{ H/м}^2;$$

Сопротивление рекуператора: $\Delta P_{10} = 30 \text{ H/м}^2;$

Суммарное сопротивление системы:

$$\Delta P_{\text{сумм}} = 4 \cdot \sum \Delta P_{1-6} + \Delta P_7 + \Delta P_8 + \Delta P_9 + \Delta P_{10}, \text{ H/м}^2;$$

$$\Delta P_{\text{сумм}} = 4 \cdot 22.72 + 10.15 + 21.55 + 50 + 4.6 = 171.18 \text{ H/м}^2;$$

Расчет дымовой трубы

Суммарные сопротивления или потери давления по трассе в процессе эксплуатации печи, как правило, увеличиваются вследствие заноса дымовых каналов пылью, увеличения подсоса воздуха через несплошности либо вследствие форсированной работы. По этим причинам величину суммарных потерь давления при расчете дымовой трубы принимают на 15-20% больше рассчитанной.

$$\sum \Delta P_p = 1.25 \cdot \Delta P_{\text{сумм}};$$

$$\sum \Delta P_p = 1.25 \cdot 171.18 = 214.475 \text{ H/м}^2;$$

Скорость дымовых газов на выходе из трубы

$$\omega_{0 \text{ вых}} = 2.0 \text{ м/с};$$

При $V_D=0.159$ диаметр устья:

$$D_y = \sqrt{\frac{0.159}{0.785 \cdot 2.0}} = 0.318 \text{ м.}$$

Тогда диаметр основания трубы

$$D_o = D_y \cdot 1.5, \text{ м};$$

$$D_o = 0.318 \cdot 1.5 = 0.447 \text{ м.}$$

Примем высоту трубы $H=20$ м. Тогда:
температура дымовых газов в устье:

$$t_y = t_K - 1.3 \cdot H', \text{ } ^\circ \text{C};$$

$$t_y = 649 - 1.3 \cdot 20 = 623 \text{ } ^\circ \text{C};$$

средняя температура по высоте трубы:

$$t_D = \frac{t_K - t_y}{2}, \text{ } ^\circ \text{C};$$

$$t_D = \frac{649 + 623}{2} = 636 \text{ } ^\circ \text{C};$$

Найдем действительную высоту трубы по формуле [4]:

$$H = \frac{\sum \Delta P_p + \zeta \cdot \frac{\omega_{Oy}^2}{2} \cdot \rho_{до} \cdot (1 + \beta \cdot t_y)}{g \cdot \left(\frac{\rho_{BO}}{1 + \beta \cdot t_B} - \frac{\rho_{ДО}}{1 + \beta \cdot t_D} \right) - \frac{\lambda}{3 \cdot D_y} \cdot \frac{\omega_{Oy}^2}{2} \cdot \rho_{yO} \cdot (1 + \beta \cdot t_D)}, \text{ } \text{м},$$

где ζ - коэффициент местного сопротивления на выходе дымовых газов из трубы в атмосферу равный 1.06;

λ - коэффициент трения о стенки трубы равный 0.05;

ρ_{BO} и $\rho_{ДО}$ - приведенные плотности воздуха и дымовых газов, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

Тогда, действительная высота трубы, составит:

$$H = \frac{221.475 - 1.06 \cdot \frac{2^2}{2} \cdot 1.31 \cdot \left(1 + \frac{623}{273} \right)}{9.8 \cdot \left(\frac{1.29}{1 + \frac{20}{273}} - \frac{1.31}{1 + \frac{636}{273}} \right) - \frac{0.05}{3 \cdot 0.318} \cdot \frac{2^2}{2} \cdot 1.31 \cdot \left(1 + \frac{636}{273} \right)} = 28 \text{ м}.$$

7. ОХРАНА ТРУДА И ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Приводят данные о комплексе проектных решений социального характера с целью создания в проектируемом объекте наиболее благоприятных условий труда, защиты окружающей среды, санитарно-бытового обеспечения трудящихся и промышленной эстетики на основе установленных норм и правил, а также разработку ряда мероприятий по технике безопасности на агрегате.

В конце пояснительной записки должен быть указан список использованной литературы.

СОДЕРЖАНИЕ ГРАФИЧЕСКОЙ ЧАСТИ

Графическая часть включает:

1. Чертёж печи с размерами;
2. Чертёж топливосжигающего устройства или нагревательных элементов;
3. Чертёж рекуператора;
4. Аксонометрию дымового тракта.

ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ПРОЕКТА

Курсовой проект состоит из расчётно-пояснительной записки и графической части. Расчётно-пояснительная записка должна быть изложена технически грамотно, чётко, сжато.

Структура записки включает:

- титульный лист (приложение 4)
- задание (приложение 5)
- содержание;
- введение;
- основную часть с соответствующими разделами;
- заключение;
- список литературы.

Все схемы, эскизы, рисунки должны иметь сквозную нумерацию и подписи, а таблицы - название и номер. Формулы записываются в отдельную строчку в общем виде, а затем в том же порядке подставляются численные значения. Ссылку на использованные литературные источники следует давать цифрой, заключённой в скобки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теплотехника (часть 1): Метод. указания по выполнению курс. проекта для студентов направления 150600 – Материаловедение и технология новых материалов. Томск: Изд. ТПУ. 1997. – 28 С. Составитель: доцент, к.т.н. Б.Б. Овечкин.
2. Теплотехника (часть 2): Метод. указания по выполнению курс. проекта для студентов направления 150600 – Материаловедение и технология новых материалов. Томск: Изд. ТПУ. 1997. – 16 С. Составитель: доцент, к.т.н. Б.Б. Овечкин.
3. Китаев Б.И., Зобнин Б.Ф., Ратников В.Ф., Телегин А.С., Лисиенко В.Г., Братчиков С.Г., Казяев М.Д., Маркин В.П., Суханов Е.Л., Сучков В.Д. «Теплотехнические расчеты металлургических печей». – М.: Металлургия, 1970. – С. 515 – 517.
4. Телегин А. С. Теплотехнические расчёты металлургических печей. - М.: Металлургия, 1987. – 528 с.
5. Кривандин В. А. Металлургическая теплотехника. - М.: Металлургия, 1986. – 424 с.
6. Глинков М.А. Металлургические печи. - М.: Металлургия, 1978. – 482 с.
7. Глухов Е.Б. Расчет кладки печи на ПЭВМ: Метод.указания к выполн. курс. проекта. Томск: Изд. ТПУ, 1996. – 8 с.
8. Альтгаузен А. П. Электротермическое оборудование.- М.: Энергия, 1980. – 488 с.
9. Тебеньков Б. П. Рекуператоры для промышленных печей. - М.: Металлургия, 1985. – 404 с.
10. Соколов К.Н., Коротич И.К. «Технология термической обработки металлов и проектирование термических цехов»: Учебник для вузов М.: Металлургия, 1988. – 384 С.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Задание 1.

Спроектировать шахтную печь с для нагрева до температуры 820°С заготовок из стали 45. Производительность 3000 кг/ч.

Размер заготовок: $\varnothing_{НАР}=800$ мм; $\varnothing_{ВН}=650$ мм; $h=80$ мм.

Топливо—доменный газ состава:

CO^{cr}	H_2^{cr}	CH_4^{cr}	CO_2^{cr}	N_2^{cr}	$q_{H_2O}^{cr}$
38.2	4.25	0.22	11	46.33	15 г/м ³

Воздух и газ подогреваются в рекуператоре до температуры 300°С.

Задание 2.

Спроектировать камерную печь с неподвижным подом для нагрева до температуры 820°С заготовок из стали ШХ15. Производительность 400 кг/ч.

Размер заготовок: $\varnothing=110$ мм; $h=100$ мм.

Топливо—полукоксовый газ состава:

CO^{cr}	H_2^{cr}	CH_4^{cr}	$C_2H_4^{cr}$	H_2S^{cr}	CO_2^{cr}	N_2^{cr}	$q_{H_2O}^{cr}$
16.4	18.0	39.8	1.4	1.7	16.7	6.0	30 г/м ³

Воздух подогревается в рекуператоре до температуры 400°С.

Задание 3.

Спроектировать камерную печь с выдвижным подом для нагрева до температуры 780°С заготовок из стали У12. Величина садки 30000 кг.

Топливо—полукоксовый газ состава:

CO^{cr}	H_2^{cr}	CH_4^{cr}	$C_2H_4^{cr}$	O_2^{cr}	CO_2^{cr}	N_2^{cr}	$q_{H_2O}^{cr}$
6.3	6.0	21.2	1.4	0.8	2.6	7.7	25 г/м ³

Воздух подогревается в рекуператоре до температуры 300°С.

Задание 4.

Спроектировать методическую печь для нагрева под ковку до температуры 1200°С заготовок из стали 40Х. Производительность 20000 кг/ч.

Размер заготовок: 100 × 100 × 1200 мм.

Топливо—мазут состава:

C^p	H^p	O^p	N^p	S^p	W^p
85	8.9	2.5	2.9	1.7	4.0

Воздух и газ подогреваются в рекуператоре до температуры 600°С.

Задание 5.

Спроектировать кольцевую печь для нагрева до температуры 840°С заготовок из стали ШХ15. Производительность 700 кг/ч.

Размер заготовок: $\varnothing_{НАР}=600$ мм; $\varnothing_{ВН}=550$ мм ; $h=120$ мм.

Топливо—полукоксовый газ состава:

CO^{cr}	H_2^{cr}	CH_4^{cr}	$C_2H_4^{cr}$	O_2^{cr}	CO_2^{cr}	N_2^{cr}	$q_{H_2O}^{cr}$
5.7	56.5	25.3	2.6	0.7	2.8	6.4	$30 \frac{г}{м^3}$

Воздух подогрывается в рекуператоре до температуры $400^\circ C$.

Задание 6.

Спроектировать печь с пульсирующим подом для нагрева до температуры $840^\circ C$ заготовок из стали ШХ15. Производительность 600 кг/ч.

Размер заготовок: $\varnothing_{НАР}=100$ мм; $\varnothing_{ВН}=80$ мм ; $h=30$ мм.

Топливо—генераторный газ состава:

CO^{cr}	H_2^{cr}	CH_4^{cr}	O_2^{cr}	CO_2^{cr}	N_2^{cr}	$q_{H_2O}^{cr}$
27.3	18.6	3.3	0.25	5.05	45.5	$30 \frac{г}{м^3}$

Воздух подогрывается в рекуператоре до температуры $300^\circ C$.

Задание 7.

Спроектировать печь с роликовым подом для нагрева до температуры $1000^\circ C$ колец из стали ШХ15СГ. Производительность 1000 кг/ч.

Размер заготовок: $\varnothing_{НАР}=400$ мм; $\varnothing_{ВН}=100$ мм ; $h=60$ мм.

Топливо—генераторный газ состава:

CO^{cr}	H_2^{cr}	CH_4^{cr}	H_2S^{cr}	O_2^{cr}	CO_2^{cr}	N_2^{cr}	$q_{H_2O}^{cr}$
25.4	16.3	3.4	0.2	0.1	6.65	47.95	$20 \frac{г}{м^3}$

Воздух подогрывается в рекуператоре до температуры $350^\circ C$.

Задание 8.

Спроектировать колпаковую печь для нагрева до температуры $700^\circ C$ рулонов листовой стали марки 08КП. Толщина листа 2 мм, высота рулона 1000 мм. Производительность 3000 кг/ч.

Топливо—генераторный газ состава:

CO^{cr}	H_2^{cr}	CH_4^{cr}	H_2S^{cr}	O_2^{cr}	CO_2^{cr}	N_2^{cr}	$q_{H_2O}^{cr}$
28.5	15.0	0.5	0.15	0.2	5.0	50.65	$25 \frac{г}{м^3}$

Воздух подогрывается в рекуператоре до температуры $250^\circ C$.

Задание 9

Спроектировать толкательную печь для получения ковкого чугуна ($t_{НАГР} = 950^\circ C$). Производительность 1500 кг/ч.

Размер заготовок: $\varnothing=20$ мм; $l=300$ мм.

Топливо—мазут состава:

C^p	H^p	O^p	N^p	W^p
-------	-------	-------	-------	-------

85.5	11.5	0.4	0.2	2.4
------	------	-----	-----	-----

Воздух и газ подогреваются в рекуператоре до температуры 600°С.

Задание 10.

Спроектировать конвейерную печь для нагрева до температуры 820°С заготовок из стали ШХ15. Производительность 600 кг/ч.

Размер заготовок: $\varnothing=10$ мм; $h=50$ мм.

Топливо—генераторный газ состава:

CO^{cr}	H_2^{cr}	CH_4^{cr}	O_2^{cr}	CO_2^{cr}	N_2^{cr}	$q_{H_2O}^{cr}$
29.4	16.0	3.0	0.7	6.5	44.9	30 г/м ³

Воздух подогревается в рекуператоре до температуры 250°С.

Задание 11.

Спроектировать шахтную печь для нагрева до температуры 920°С заготовок из стали ШХ15. Производительность 500 кг/ч.

Размер заготовок: $\varnothing_{НАР}=500$ мм; $\varnothing_{ВН}=400$ мм ; $h=600$ мм.

Топливо—мазут состава:

C^p	H^p	O^p	N^p	W^p
85.0	12.5	0.2	0.5	1.8

Воздух и газ подогреваются в рекуператоре до температуры 500°С.

Задание 12.

Спроектировать камерную печь с неподвижным подом для нагрева до температуры 810°С заготовок из стали ШХ15. Производительность 400 кг/ч.

Размер заготовок: $\varnothing=60$ мм; $h=50$ мм.

Топливо—мазут состава:

C^p	H^p	O^p	N^p	W^p
84.0	11.4	0.4	1.0	3.2

Воздух и газ подогреваются в рекуператоре до температуры 400°С.

Задание 13.

Спроектировать камерную печь с выдвижным подом для нагрева до температуры 860°С слитков из стали Р18. Производительность 50000 кг за одну садку.

Размер слитков: 200 × 400 × 1200 мм.

Топливо—мазут состава:

C^p	H^p	O^p	N^p	W^p
83.4	12.8	0.3	0.5	3.0

Воздух и газ подогреваются в рекуператоре до температуры 450°С.

Задание 14.

Спроектировать методическую печь с наклонным подом для нагрева до температуры 1200°С заготовок из стали 45. Производительность 2000 кг/ч.

Размер заготовок: $\varnothing=100$ мм; $l=1000$ мм.

Топливо—мазут состава:

C^r	H^r	S^r	N^r	A^p	W^p
87.0	12.0	0.4	0.6	0.5	5.0

Воздух и газ подогреваются в рекуператоре до температуры 600°С.

Задание 15.

Спроектировать кольцевую печь для нагрева до температуры 1200°С заготовок из стали 20Х. Производительность 10000 кг/ч.

Размер заготовок: $\varnothing=200$ мм; $h=150$ мм.

Топливо—мазут состава:

C^r	H^r	O^r	S^r	N^r	A^p	W^p
88.0	10.0	0.2	1.5	0.3	0.5	2.0

Воздух и газ подогреваются в рекуператоре до температуры 600°С.

Задание 16.

Спроектировать методическую печь с наклоном для нагрева под ковку до температуры 1200°С заготовок из стали 10. Производительность 30000 кг/ч.

Размер заготовок: $\varnothing=100$ мм; $l=1200$ мм

Топливо—мазут состава:

C^r	H^p	O^p	N^p	S^p	W^p
83.1	2.7	4.1	4.7	1.9	3.5

Воздух и газ подогреваются в рекуператоре до температуры 600°С.

Задание 17.

Спроектировать печь с пульсирующим подом для нагрева до температуры 820°С заготовок из стали ШХ15. Производительность 600 кг/ч.

Размер заготовок: $\varnothing=32$ мм; $h=40$ мм

Топливо—генераторный газ состава:

CO^{cr}	H_2^{cr}	CH_4^{cr}	H_2S^{cr}	O_2^{cr}	CO_2^{cr}	N_2^{cr}	$C_2H_6^{cr}$	$q_{H_2O}^{cr}$
26.5	13.5	2.5	0.1	0.2	5.0	51.9	0.3	25 г/м ³

Воздух подогревается в рекуператоре до температуры 300°С.

Задание 18.

Спроектировать печь с роликовым подом для нагрева до температуры 820°С заготовок из стали 50. Производительность 2000 кг/ч.

Размер заготовок: $8 \times 100 \times 1200$ мм.

Топливо—полукоксовый газ состава:

CO^{cr}	H_2^{cr}	CH_4^{cr}	$C_2H_4^{cr}$	O_2^{cr}	CO_2^{cr}	N_2^{cr}	$q_{H_2O}^{cr}$
25.0	16.0	2.2	1.2	0.2	6.5	48.9	$25 \frac{г}{м^3}$

Воздух подогревается в рекуператоре до температуры $300^\circ C$.

Задание 19.

Спроектировать колпаковую печь с для нагрева до температуры $650^\circ C$ листа из стали 10. Величина садки 5000 кг.

Размер листа: $3 \times 1000 \times 2000$ мм.

Топливо—доменный газ состава:

CO^{cr}	H_2^{cr}	CH_4^{cr}	CO_2^{cr}	N_2^{cr}	$q_{H_2O}^{cr}$
38.2	4.25	0.22	11.0	46.33	$15 \frac{г}{м^3}$

Воздух и газ подогреваются в рекуператоре до температуры $300^\circ C$.

Задание 20.

Спроектировать толкательную печь для нагрева до температуры $1050^\circ C$ заготовок из стали ШХ15. Производительность 2500 кг/ч.

Размер заготовок: $\varnothing_{НАР}=120$ мм; $\varnothing_{ВН}=60$ мм ; $h=80$ мм.

Топливо—мазут состава:

C^p	H^p	O^p	N^p	W^p
84.8	10.6	0.4	0.4	3.8

Воздух и газ подогреваются в рекуператоре до температуры $700^\circ C$.

Примечание: Если шифр студента больше 20, то номер задания повторяется с первого номера. Например, 24 соответствует 4 заданию, а 37—17 заданию.

ЭНТАЛЬПИИ ГОРЮЧИХ И ТОПОЧНЫХ ГАЗОВ

$$(i = C_o^t \cdot t, \frac{\text{ккал}}{\text{нм}^3})$$

t, C	CO ₂	SO ₂	H ₂ S	H ₂ O	H ₂	CO	N ₂ (атмосф.)	O ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	Воздух сухой	Продукты сгорания при d=1 (приближенные данные)
500	237.50	247.0	199.5	189.85	155.85	160.35	158.55	166.95	255.60	341.95	160.35	174.71
600	292.50	303.0	244.8	231.42	187.44	194.52	192.06	203.04	324.00	433.62	194.41	212.56
700	349.16	359.8	291.9	274.40	219.38	299.37	226.31	239.82	397.39	529.97	229.18	251.39
800	407.20	416.8	340.8	318.72	251.60	264.88	261.20	277.04	476.56	632.08	264.48	291.04
900	466.29	476.1	390.6	364.50	284.31	300.87	296.55	314.82	559.44	737.64	300.42	331.35
1000	526.30	534.0	442.0	411.50	317.40	337.40	332.40	352.90	644.70	847.20	336.70	372.30
1100	587.18	594.0	495.0	459.80	351.01	374.33	368.72	391.27	732.05	960.41	373.45	413.86
1200	648.84	652.8	547.2	509.28	384.96	411.60	405.36	430.08	820.56	1075.56	410.64	455.93
1300	710.97	—	—	559.78	419.51	449.15	442.52	469.04	—	—	448.11	499.64
1400	773.64	—	—	611.24	454.44	487.06	479.78	508.34	—	—	485.80	541.41
1500	836.70	—	—	663.75	489.90	525.15	517.35	547.95	—	—	523.80	584.69
1600	900.16	—	—	716.96	525.60	563.52	555.20	587.68	—	—	562.08	628.30
1700	964.07	—	—	771.29	561.68	601.97	593.30	627.81	—	—	600.44	672.28
1800	1028.16	—	—	826.02	598.32	640.62	631.44	668.16	—	—	639.18	716.36
1900	1092.50	—	—	881.41	635.17	679.44	669.75	708.70	—	—	677.92	760.67
2000	1157.00	—	—	937.60	672.40	718.40	708.20	749.60	—	—	717.00	805.20
2100	1221.78	—	—	994.35	709.80	757.47	746.97	790.44	—	—	756.00	850.05
2200	1286.56	—	—	1051.38	747.56	796.62	785.62	831.82	—	—	795.30	894.85
2300	1351.48	—	—	1109.06	785.68	835.82	824.55	873.31	—	—	834.67	939.04
2400	1416.48	—	—	1167.36	823.92	875.28	863.52	915.12	—	—	874.32	985.15
2500	1481.50	—	—	1225.75	862.75	914.75	902.50	957.00	—	—	913.75	1030.37

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ОГНЕУПОРНЫХ И ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Материалы	Плотность $\rho, \text{кг/м}^3$	Предельная температура применения, $t, ^\circ\text{C}$	Коэффициент теплопроводности, $\lambda, \text{Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$
Шамотные	1900-2150	1350-1400	$1.041+1.512 t \cdot 10^4$
Динасовые	1900-2100	1700	$1.581+3.84 t \cdot 10^4$
Магнезитовые	2600-2800	1650-1700	$7.21- 4.19 t \cdot 10^3$
Шамотные легковесные	1300	1300	$0.5+1.63 t \cdot 10^4$
Пеношамотные	600	1300	$0.1046+1.45 t \cdot 10^4$
Шамотные ультралегковесные	300	1100	$0.0582+1.745 t \cdot 10^4$
Диатомитовые	500	900	$0.1046+2.33 t \cdot 10^4$
Пенодиатомитовые	400	900	$0.0778+3.14 t \cdot 10^4$
Вермикулитовые плиты	350-400	700	$0.0814+1.51 t \cdot 10^4$

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Физики высоких технологий

Кафедра Материаловедение в машиностроении

Группа 4Б....

РАСЧЁТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

к курсовому проекту по курсу

«Перенос энергии и массы, основы теплотехники»

Руководитель: Овечкин Б.Б.

" ___ " _____ 201_ г.

Исполнитель: Иванов И.И.

" ___ " _____ 201_ г.

Томск 201_

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра ММС

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой ММС _____ Панин В.Е.

" ____ " _____ 201_ г.

ЗАДАНИЕ

по курсовому проектированию студенту 3-го курса Института физики высоких технологий группы 4Б80 Иванову Ивану Ивановичу

Тема проекта: спроектировать методическую печь с роликовым подом для нагрева до температуры 820°C заготовок из стали 50. Размер заготовок: 8×100×1200 мм.

Срок начала проектирования: 01.09.201 г.

Срок сдачи студентом законченного проекта: 20.12.201 г.

Исходные данные к проекту: производительность 2000 кг/ч. Топливо-полукоксовый газ, воздух подогревается в рекуператоре до $t = 300^{\circ}\text{C}$.

Содержание расчётно-пояснительной записки: расчет горения топлива, времени нагрева металла и размеров печи, тепловой баланс печи, расчет топливосжигающих устройств (горелок), воздухоподогревательных устройств (рекуператора) и дымового тракта печи.

Перечень графического материала: чертеж методической печи, топливосжигающего устройства, рекуператора, аксонометрия дымового тракта.

Дата выдачи задания: 01.09.201 г.

Руководитель: доц. Овечкин Б.Б. _____ (подпись)

Задание к исполнению принял: студ. Иванов И.И. _____ (подпись)