

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет
им. Г. И. Носова»
Многопрофильный колледж



**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ДЛЯ ЛАБОРАТОРНО-ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ
УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
ОП.07 Теплотехника**

для обучающихся специальности

22.02.01 Металлургия черных металлов

Магнитогорск, 2022

ОДОБРЕНО

Предметно-цикловой комиссией
«Металлургии и обработки металлов давлением»
Председатель О.В. Шелковникова
Протокол № 10 от 22.06.2022 г.

Методической комиссией МпК

Протокол № 6 от 29.06.2022 г.

Разработчики

Оксана Александровна Миронова,
преподаватель ФГБОУ ВО «МГТУ им Г.И. Носова» МпК

Методические указания по выполнению практических и лабораторных работ разработаны на основе рабочей программы учебной дисциплины «Теплотехника».

Содержание практических и лабораторных работ ориентировано на подготовку обучающихся к освоению профессионального(ых) модуля(ей) программы подготовки специалистов среднего звена по специальности 22.02.01 Металлургия черных металлов и овладению профессиональными компетенциями.

СОДЕРЖАНИЕ

1 Введение	4
2 Методические указания	6
Практическая работа 1	6
Практическая работа 2	10
Практическая работа 3	12
Лабораторная работа 1	17
Практическая работа 4	20
Лабораторная работа 2	21
Практическая работа 5	23
Практическая работа 6	24
Практическая работа 7	31
Практическая работа 8	34
Практическая работа 9	37

1 ВВЕДЕНИЕ

Важную часть теоретической и профессиональной практической подготовки обучающихся составляют практические занятия.

Состав и содержание практических занятий направлены на реализацию Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования.

Ведущей дидактической целью практических занятий является формирование профессиональных практических умений (умений выполнять определенные действия, операции, необходимые в последующем в профессиональной деятельности) или учебных практических умений необходимых в последующей учебной деятельности.

Ведущей дидактической целью является экспериментальное подтверждение и проверка существенных теоретических положений (законов, зависимостей).

В соответствии с рабочей программой учебной дисциплины ОП 06 «Теплотехника» предусмотрено проведение практических занятий.

В результате их выполнения, обучающийся должен:

уметь:

- производить расчеты процессов горения и теплообмена в металлургических печах, (нагревательных и плавильных);

Содержание практических и лабораторных занятий ориентировано на подготовку обучающихся к освоению профессионального модуля программы подготовки специалистов среднего звена по специальности и овладению **профессиональными компетенциями:**

ПК 1.1 Осуществлять технологические операции по производству черным металлов

ПК 1.2 Использовать системы автоматического управления технологическим процессом

ПК 1.4 Анализировать качество сырья и готовой продукции

А также формированию **общих компетенций:**

ОК 01 Выбирать способы решения задач профессиональной деятельности применительно к различным контекстам.

ОК 02 Использовать современные средства поиска, анализа и интерпретации информации и информационные технологии для выполнения задач профессиональной деятельности.

ОК 04 Эффективно взаимодействовать и работать в коллективе и команде.

ОК06 Проявлять гражданско-патриотическую позицию, демонстрировать осознанное поведение на основе традиционных общечеловеческих ценностей, в том числе с учетом гармонизации межнациональных и межрелигиозных отношений, применять стандарты антикоррупционного поведения.

ОК 07 Содействовать сохранению окружающей среды, ресурсосбережению, применять знания об изменении климата, принципы бережливого производства, эффективно действовать в чрезвычайных ситуациях.

ОК 09 Пользоваться профессиональной документацией на государственном и иностранном языках

Выполнение обучающихся практических работ по учебной дисциплине «Теплотехника» направлено на:

- обобщение, систематизацию, углубление, закрепление, развитие и детализацию полученных теоретических знаний по конкретным темам учебной дисциплины;

- формирование умений применять полученные знания на практике, реализацию единства интеллектуальной и практической деятельности;

- формирование и развитие умений: наблюдать, сравнивать, сопоставлять, анализировать, делать выводы и обобщения, самостоятельно вести исследования, пользоваться различными приемами измерений, оформлять результаты в виде таблиц, схем, графиков;

- приобретение навыков работы с различными приборами, аппаратурой, установками и другими техническими средствами для проведения опытов;

- развитие интеллектуальных умений у будущих специалистов: аналитических, проектировочных, конструктивных и др.;

- выработку при решении поставленных задач профессионально значимых качеств, таких как самостоятельность, ответственность, точность, творческая инициатива.

Практические занятия проводятся после соответствующей темы, которая обеспечивает наличие знаний, необходимых для ее выполнения.

2 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Тема 1.2. Теория горения различных видов топлива в печах

Практическая работа № 1

Расчет горения топлива

Цель: с помощью теоретических расчетов по формулам определить необходимое количество воздуха для горения, количество продуктов сгорания и калориметрическую температуру.

Выполнив работу, Вы будете уметь:

- производить расчеты процессов горения и теплообмена в металлургических печах, (нагревательных и плавильных);

Материальное обеспечение: методические указания

Задание:

№ варианта	CH ₄ , %	C ₂ H ₆ , %	C ₃ H ₈ , %	C ₄ H ₁₀ , %	CO ₂ , %	W, г/м ³	n
1	91	1,2	2,0	1,0	0,8	14,5	1,2
2	94	2,5	1,8	0,7	0,4	15	1,1
3	97	1,1	0,9	0,6	0,2	13	1,05
4	94,4	1,4	1,4	-	-	12	1,05
5	87,7	1,4	2,2	1,5	1,3	16	1,05
6	91,8	2,2	0,4	0,6	-	12	1,1
7	83,4	2,5	0,8	1,5	1,8	10	1,15
8	79,9	1,5	1,7	2,1	2,9	14	1,1
9	94,1	1,5	-	3,0	-	10	1,15
10	80	2,1	3,0	4,0	5,0	20	1,05
11	91,1	1,0	1,0	1,0	1,0	18	1,2
12	93,6	2,6	-	-	2,3	16	1,1
13	85,5	4,2	3,7	2,8	2,0	14	1,05
14	91,6	1,6	2,0	1,6	0,6	12	1,15
15	80	2,5	3,5	4,5	5,5	14	1,05
16	91,2	0,8	0,9	1,6	2,4	16	1,1
17	93	1,1	2,1	3,1	-	18	1,05

18	85,5	4,5	2,5	1,5	3,0	20	1,1
19	82,7	-	5,0	3,0	4,0	10	1,15
20	90	2,2	3,3	1,6	-	12	1,15
21	97	0,5	0,5	0,3	0,5	14	1,1
22	87,8	1,7	1,8	2,9	4,1	16	1,05
23	74,8	4,5	3,3	-	3,2	18	1,15
24	77,6	2,4	4,4	1,1	1,1	20	1,1
25	83,3	-	3,9	3,2	-	10	1,2
26	89,7	4,5	-	2,2	2,2	12	1,15
27	92,2	0,9	0,7	1,1	0,8	14	1,2
28	93,3	1,4	-	-	1,4	16	1,15
29	88,8	3,1	1,1	1,1	1,1	18	1,05
30	95,5	-	1,5	1,5	-	20	1,1
31	92,2	2,2	-	1,2	1,2	10	1,2
32	95,7	2,1	1,03	0,47	0,2	15,55	1,1
33	96	2	1,0	0,3	0,3	16	1,15
34	93,2	0,7	0,6	0,6	1,9	15,3	1,05
35	92	0,9	1,0	1,1	0,3	15,5	1,05

Порядок выполнения работы:

Изучить методические указания к данной практической работе.

1. Пересчитать сухой газ на влажный
2. Определить расход кислорода на горение
3. Определить расход воздуха, необходимого для горения
4. Определить состав продуктов сгорания
 5. Рассчитать количество продуктов сгорания по методике, приведенной в разработке.
 6. Определить процентный состав продуктов сгорания.
 7. Определить плотность продуктов сгорания
 8. Рассчитать колориметрическую и действительную температуру

Расчеты выполнить по методике, приведенной в разработке.

Ход работы:

1. Пересчет сухого газа на влажный

$$x^{\text{вл.}} = x^{\text{сух.}} \cdot \frac{100}{100 + 0,1242W};$$

$$x^{\text{вл.}} = x^{\text{сух.}} \cdot \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 15,55};$$

$$X^{\text{БЛ.}} = X^{\text{СУХ.}} \cdot 0,98.$$

2. Расход кислорода на горение при $n=1,0$

$$V_{O_2} = 0,01(0,5(CO+H_2+3H_2S) + \Sigma(m + \frac{n}{4})C_mH_n);$$

$$V_{O_2} = 0,01[(m + \frac{n}{4})CH_4 + (m + \frac{n}{4})C_2H_6 + (m + \frac{n}{4})C_3H_8 + (m + \frac{n}{4})C_4H_{10}];$$

$$V_{O_2} = 0,01[(1 + \frac{4}{4})94 + (2 + \frac{6}{4})2 + (3 + \frac{8}{4})1 + (4 + \frac{10}{4})0,4];$$

$$V_{O_2} = 2,026 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

3. Расход воздуха на горение при $n=1,1$.

$$V_B = n(1+k)V_{O_2};$$

$$V_B = 1,1(1+3,76) \cdot 2,026;$$

$$V_B = 10,61 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

4. Состав продуктов сгорания.

$$V_{CO_2} = 0,01(CO_2 + SO_2 + CO + H_2S + \Sigma m C_m H_n);$$

$$V_{CO_2} = 0,01(CO_2 + CH_4 + m C_2 H_6 + m C_3 H_8 + m C_4 H_{10});$$

$$V_{CO_2} = 0,01(0,2 + 94 + 2 \cdot 2 + 3 \cdot 1 + 4 \cdot 0,4);$$

$$V_{CO_2} = 1,028 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{H_2O} = 0,01(H_2O + H_2 + H_2S + 0,5 \Sigma n C_m H_n);$$

$$V_{H_2O} = 0,01(H_2O + 0,5(n CH_4 + n C_2 H_6 + n C_3 H_8 + n C_4 H_{10}));$$

$$V_{H_2O} = 0,01(1,9 + 0,5(4 \cdot 94 + 6 \cdot 2 + 8 \cdot 1 + 10 \cdot 0,4));$$

$$V_{H_2O} = 2,019 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{N_2} = 0,01 N_2 + nk V_{O_2};$$

$$V_{N_2} = 0,01 \cdot 0,5 + 1,1 \cdot 3,76 \cdot 2,026;$$

$$V_{N_2} = 8,385 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{O_2}' = (n-1) V_{O_2};$$

$$V_{O_2}' = (1,1-1) \cdot 2,026;$$

$$V_{O_2}' = 0,203 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

5. Определение общего количества продуктов сгорания (дыма).

$$V_{n.c.} = V_{RO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2}';$$

$$V_{n.c.} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2}';$$

$$V_{n.c.} = 1,028 + 2,019 + 8,385 + 0,203;$$

$$V_{n.c.} = 11,635 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

6. Определение процентного состава продуктов сгорания.

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_{n.c.}} \cdot 100\%;$$

$$N_2 = \frac{V_{N_2}}{V_{n.c.}} \cdot 100\%;$$

$$\text{CO}_2 = \frac{1,028}{11,635} \cdot 100\%; \quad \text{N}_2 = \frac{8,385}{11,635} \cdot 100\%;$$

$$\text{CO}_2 = 8,83\%; \quad \text{N}_2 = 72,07\%;$$

$$\text{H}_2\text{O} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{n.c.}}} \cdot 100\%; \quad \text{O}_2 = \frac{V'_{\text{O}_2}}{V_{\text{n.c.}}} \cdot 100\%.$$

$$\text{H}_2\text{O} = 17,35\%. \quad \text{O}_2 = 1,75\%.$$

7. Определение плотности продуктов сгорания.

$$\rho_{\text{п.с.}} = \frac{44\text{CO}_2 + 28\text{N}_2 + 18\text{H}_2\text{O} + 32\text{O}_2}{22,4 \cdot 100};$$

где 44;28;18;32 – молекулярная масса;
22,4 – 1 моль;

$$\rho_{\text{п.с.}} = \frac{44 \cdot 8,83 + 28 \cdot 72,07 + 18 \cdot 17,35 + 32 \cdot 1,075}{22,4 \cdot 100};$$

$$\rho_{\text{п.с.}} = 1,24 \text{ кг/м}^3.$$

8. Теплота сгорания газа составит.

$$Q_H^P = 358\text{CH}_4 + 636\text{C}_2\text{H}_6 + 913\text{C}_3\text{H}_8 + 1185\text{C}_4\text{H}_{10};$$

$$Q_H^P = 358 \cdot 94 + 636 \cdot 2 + 913 \cdot 1 + 1185 \cdot 0,4;$$

$$Q_H^P = 36327 \text{ кДж/м}^3.$$

9. Определение calorimetric temperature.

9.1. При горении природного газа в обычном воздухе энтальпия продуктов сгорания определяется:

$$i_0 = \frac{Q_H^P}{V_{\text{n.c.}}};$$

$$i_0 = \frac{36327}{11,635};$$

$$i_0 = 3122,22 \text{ кДж/м}^3.$$

9.2. Для определения calorimetric temperature природного газа зададимся сначала $t'_k = 2000^\circ\text{C}$ и определим при этой calorimetric temperature энтальпию.

$$i_{2000^\circ} = \frac{i_{\text{CO}_2}^{2000^\circ} \cdot V_{\text{CO}_2} + i_{\text{H}_2\text{O}}^{2000^\circ} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}} + i_{\text{N}_2}^{2000^\circ} \cdot V_{\text{N}_2} + i_{\text{O}_2}^{2000^\circ} \cdot V_{\text{O}_2}}{V_{\text{n.c.}}};$$

$$i_{2000^\circ} = 3249,41 \text{ кДж/м}^3,$$

т.к. $i_{2000^{\circ}} > i_0$, принимаем температуру $t_K = 1900^{\circ} \text{C}$ и рассчитаем энтальпию при этой температуре

$$i_{1900^{\circ}} = 3119,88 \text{ кДж/м}^3,$$

т.к. $i_{1900^{\circ}} < i_0$ определим t_K

$$t_K = t_K'' + \frac{i_0 + i_K''}{i_K' - i_K''};$$

$$t_K = 1900 + \frac{3122,22 + 3119,88}{3249,41 - 3119,88};$$

$$t_K = 1949^{\circ} \text{C}.$$

10. Определение действительной температуры в печи.

$$t_D = \eta \cdot t_K,$$

где $\eta = 0,65 \div 0,80$ – коэффициент, зависящий от конструкции печи.

$$t_D = 0,70 \cdot 1949;$$

$$t_D = 1364,3^{\circ} \text{C}.$$

Форма представления результата:

Расчеты выполнить и оформить в рабочей тетради.

Критерии оценки:

Процент положительных оценок	Оценка	
	балл (отметка)	вербальный аналог
90 - 100	5	отлично
80 - 89	4	хорошо
70 - 79	3	удовлетворительно
менее 70	2	не удовлетворительно

Тема 1.2. Теория горения различных видов топлива в печах

Практическая работа № 2

Определение состава рабочего топлива

Цель: с помощью теоретических расчетов по формулам определить химический состав рабочего топлива.

Выполнив работу, Вы будете уметь:

- производить расчеты процессов горения и теплообмена в металлургических печах, (нагревательных и плавильных);

Материальное обеспечение: методические указания к выполнению практической работы

Порядок выполнения работы:

1. Изучить методические указания к данной практической работе.
2. Определить состав рабочей массы челябинского угля марки БЗ
3. Определить состав горючей массы кизеловского угля марки Г
3. Расчет оформить в рабочей тетради.
4. Сдать на проверку преподавателю

Задание:

- состав его горючей массы: $C^Г = 71,1\%$; $H^Г = 5,3\%$; $N^Г = 1,7\%$; $O^Г = 20,0\%$; зольность сухой массы $A^c = 36\%$ и влажность рабочая $W^P = 18,0\%$ (для челябинского угля);

- состав его рабочей массы: $C^P = 48,5\%$; $H^P = 3,6\%$; $S = 6,1\%$; $N^P = 0,8\%$; $O^P = 40\%$; зольность сухой массы $A^c = 33,0\%$ и влажность рабочая $W^P = 6,0\%$. (для кизеловского угля марки Г).

Ход работы:

Твердые и жидкие топлива состоят из горючих (углерода — С, водорода — Н, летучей серы — $S_{л} = S_{ор} + S_{к}$ и негорючих (азота — N и кислорода — O) элементов и балласта (зола — А, влаги — W).

Газообразные топлива состоят из горючих (CO, H_2, CH_4, C_mH_n) и негорючих (N_2, O_2, CO_2) газов и небольшого количества водяного пара (H_2O).

При изучении характеристик твердых и жидких топлив и их состава различают рабочую, горючую и сухую массу. Состав рабочей, горючей и сухой массы обозначается соответственно индексами «р», «г» и «с» и выражается следующими равенствами:

$$C^P + H^P + S + N^P + O^P + A^P + W^P = 100\%;$$

$$C^Г + H^Г + S + N^Г + O^Г = 100\%;$$

$$C^c + H^c + S + N^c + O^c + A^c = 100\%.$$

В формулах содержание элементов дано в процентах на 1 кг топлива. Коэффициенты пересчета состава топлива из одной массы в другую приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Заданная масса топлива	Коэффициенты пересчета на массу		
	рабочую	горючую	сухую
Рабочая	1	$\frac{100}{100 - (A^P + W^P)}$	$\frac{100}{100 - W^P}$
Горючая	$\frac{100 - (A^P + W^P)}{100}$	1	$\frac{100 - A^c}{100}$
Сухая	$\frac{100 - W^P}{100}$	$\frac{100}{100 - A^c}$	1

Пользуясь коэффициентами пересчета (табл. 1.1), определяем зольность рабочей массы топлива и находим состав рабочей массы топлива:

$$A^P = A^c \cdot \frac{100 - W^P}{100} = 36 \cdot \frac{100 - 18}{100} = 29,5\%$$

И находим состав по формулам:

$$H^P = H^c \cdot \frac{100 - (A^P + W^P)}{100} = 5,3 \cdot \frac{100 - (29,5 + 18,0)}{100} = 2,8\%$$

$$C^p = C^z \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = 71,1 \frac{100 - (29,5 + 18,0)}{100} = 37,3\%$$

$$S_A^p = S_A^z \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = 1,9 \frac{100 - (29,5 + 18,0)}{100} = 1,0\%$$

$$N^p = N^z \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = 1,7 \frac{100 - (29,5 + 18,0)}{100} = 0,9\%$$

$$O^p = O^z \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = 20,0 \frac{100 - (29,5 + 18,0)}{100} = 10,5\%$$

Для проверки точности вычислений найдем сумму составляющих элементов рабочей массы топлива: $C^p + H^p + S^p + N^p + O^p + A^p + W^p = 37,3 + 2,8 + 1,0 + 0,9 + 10,5 + 29,5 + 18,0 = 100\%$.

Форма представления результата:

Расчеты выполнить и оформить в рабочей тетради.

Критерии оценки:

Процент положительных оценок	Оценка	
	балл (отметка)	вербальный аналог
90 - 100	5	отлично
80 - 89	4	хорошо
70 - 79	3	удовлетворительно
менее 70	2	не удовлетворительно

Тема 2.1 Статика и динамика газов

Практическая работа №3

Расчет высоты дымовой трубы

Цель работы: научиться применять закон Бернулли при расчетах истечения газа через отверстия и насадки; определять сопротивление дымового тракта; определять разрежение у основания дымовой трубы и высоту дымовой трубы.

Выполнив работу, Вы будете:

уметь:

- производить расчеты процессов горения и теплообмена в металлургических печах, (нагревательных и плавильных);

Материальное обеспечение:

Раздаточный материал.

Задание:

Рассчитать высоту дымовой трубы

Порядок выполнения работы:

1. Повторить теоретический материал.
2. Рассчитать сопротивление дымового тракта у основания дымовой трубы.
3. Рассчитать высоту дымовой трубы

Ход работы:

Истечение газов через отверстия и насадки наблюдается при работе горелок, форсунок, при выбивании газа через отверстия в стенах печи и в других случаях.

Количество истекающей из рассматриваемого отверстия среды ($\text{м}^3/\text{с}$) можно определить по формуле: $V = \omega_2 f_2$, где f_2 — сечение струи, м^2 , ω_2 — скорость истечения газа.

Количество истечения газа через насадки, учитывая, что насадка — это короткий патрубок, присоединённый к отверстию в тонкой стенке, длина последнего обычно составляет 3 — 4 его диаметра, можно определить по формулам:

Для насадки с открытыми кромками:

$$V = 0,85 F_3 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}},$$

где F_3 — площадь выходного сечения;

P_1, P_2 — соответственно давление в сосуде и давление среды;

ρ — плотность газа.

Для насадки с закруглёнными кромками:

$$V = F_3 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}.$$

Данные для расчета:

1. Температура

№ вар.	$t_1, \text{°C}$	$t_2, \text{°C}$	$t_3, \text{°C}$	$t_4, \text{°C}$	$t_5, \text{°C}$	$t_6, \text{°C}$	$t_{1-2}, \text{°C}$	$t_{2-3}, \text{°C}$	$t_{3-4}, \text{°C}$	$t_{4-5}, \text{°C}$	$t_{5-6}, \text{°C}$
1	770	680	380	340	320	300	700	560	360	330	310
2	790	690	390	350	350	330	740	540	380	360	340
3	810	770	600	500	400	305	790	610	550	450	320
4	720	650	490	370	360	310	680	510	400	365	320
5	910	810	550	480	590	300	870	700	420	350	310
6	850	740	400	370	310	280	800	500	350	320	300
7	860	750	390	320	290	270	790	400	340	300	280
8	800	710	390	310	290	230	760	370	340	300	250
9	830	740	400	330	300	260	780	410	350	310	270
10	730	670	390	350	340	320	740	400	360	350	330
11	800	690	410	310	270	240	710	340	300	280	260
12	870	800	600	550	540	530	830	590	560	530	520
13	1200	1100	850	720	660	310	1000	910	730	690	350
14	845	738	297	270	250	230	790	390	290	260	240
15	1350	1200	800	650	470	290	1250	970	700	500	300
16	1110	990	710	600	470	290	1000	860	660	500	280
17	810	690	400	300	280	250	700	450	350	290	270
18	790	670	370	340	310	300	750	550	350	330	310
19	800	710	400	340	300	280	760	500	370	310	290

20	820	730	390	330	300	250	770	400	350	310	280
21	1280	1120	720	610	570	300	1200	750	650	600	350
22	700	600	400	350	350	320	650	500	380	360	330
23	850	750	450	300	300	280	800	500	390	370	310
24	700	650	400	370	370	340	750	530	380	360	350
25	900	800	500	470	470	450	850	670	520	500	400
26	810	710	410	370	370	350	760	560	400	380	360
27	900	810	400	370	320	290	870	420	390	340	200
28	650	600	300	280	240	170	630	330	290	260	200
29	600	570	310	280	210	180	590	330	300	240	200
30	870	790	600	500	400	290	800	650	510	410	300
31	830	700	410	350	330	300	780	430	330	320	305
32	640	600	290	260	210	170	620	300	250	220	180
33	890	700	400	350	310	280	750	500	370	320	300
34	990	830	500	400	370	300	880	600	400	350	250
35	1000	900	700	600	400	280	910	650	360	280	210

2. Длина участков и начальная скорость движения газа

№ варианта	$l_{1-2},$ м	$l_{2-3},$ м	$l_{3-4},$ м	$l_{4-5},$ м	$l_{5-6},$ м	V, м/с
1	4	4	6	3	10	4,5
2	7	6	8	5	12	4,1
3	5	4	6	3	9	4,6
4	3	2	3	1	7	4,5
5	6	5	4	3	12	4,4
6	5	6	5	3	11	4
7	4	5	6	4	12	4,4
8	6	5	4	3	9	4,6
9	5	5	4	4	11	4,4
10	6	5	6	3	11	4,1
11	7	6	6	5	12	4,3
12	7	6	7	5	11	4,5
13	8	6	8	4	12	4,3
14	3,5	4,2	5,2	4	13	4,4
15	7	6	7	5	14	4,5
16	7,5	6	6,8	5	14	5,5
17	7	6	6	5	13	4,2
18	8	6	4	4	11	4,2
19	6	5	3	4	10	4,3
20	5	5	4	3	12	4,6
21	7	5	7	4	12	4,0
22	4	3	4	2	8	5,0
23	7	6	7	5	12	4,5
24	5	4	5	3	10	4,0

25	6	5	6	4	10	5,0
26	6	5	6	4	11	5,5
27	6	5	4	3	11	4,6
28	5	4	2	1	7	3,0
29	4	4	3	2	7	4,4
30	7	7	6	4	13	3,0
31	7	6	5	5	11	5,1
32	5	5	4	3	8	2,9
33	6	5	3	2	10	4,3
34	9,5	9	7	8	12	3,0
35	8	8	6	6	10	4,3

3. Поперечные размеры дымовых каналов

№ варианта	1-2, мм	3-4, мм	4-5, мм	5-6, мм
1	1,3x1,9	1,1x1,6	1,1x1,6	1,1x1,6
2	1,3x1,9	1,1x1,6	1,1x1,6	1,1x1,6
3	1,3x1,9	1,1x1,6	1,1x1,6	1,1x1,6
4	1,3x1,9	1,1x1,6	1,1x1,6	1,1x1,6
5	1,4x2,0	1,2x1,7	1,2x1,7	1,2x1,7
6	1,3x1,9	1,1x1,6	1,1x1,6	1,1x1,6
7	1,2x1,8	1,0x1,5	1,0x1,5	1,0x1,5
8	1,5x2,3	1,4x2,0	1,4x2,0	1,4x2,0
9	1,4x2,0	1,3x1,7	1,3x1,7	1,3x1,7
10	1,2x1,8	1,1x1,6	1,1x1,6	1,1x1,6
11	1,3x2,0	1,2x1,6	1,2x1,6	1,2x1,6
12	1,3x1,9	1,0x1,5	1,0x1,5	1,0x1,5
13	1,4x1,3	1,3x1,1	1,3x1,1	1,3x1,1
14	1,3x1,2	1,1x1,6	1,1x1,6	1,1x1,6
15	1,4x1,9	1,3x1,8	1,3x1,8	1,3x1,8
16	1,5x1,5	1,2x1,4	1,2x1,2	1,2x1,2
17	1,4x2,0	1,2x1,7	1,2x1,7	1,2x1,7
18	1,3x1,9	1,1x1,6	1,1x1,6	1,1x1,6
19	1,4x2,1	1,2x1,7	1,2x1,7	1,2x1,7
20	1,4x2,0	1,2x1,7	1,2x1,7	1,2x1,7
21	1,3x1,25	1,1x0,9	1,1x0,9	1,1x0,9
22	1,2x1,8	1,0x1,5	1,0x1,5	1,0x1,5
23	1,2x1,8	1,0x1,5	1,0x1,5	1,0x1,5
24	1,2x1,8	1,0x1,5	1,0x1,5	1,0x1,5
25	1,2x1,8	1,0x1,5	1,0x1,5	1,0x1,5
26	1,3x1,9	1,1x1,6	1,1x1,6	1,1x1,6
27	1,4x2,0	1,2x1,7	1,2x1,7	1,2x1,7
28	1,1x1,7	0,5x1,0	0,5x1,0	0,5x1,0
29	1,1x1,7	0,5x1,0	0,5x1,0	0,5x1,0

30	1,4x2,0	1,2x1,7	1,2x1,7	1,2x1,7
31	1,4x2,0	1,2x1,7	1,2x1,7	1,2x1,7
32	1,1x1,7	0,5x1,0	0,5x1,0	0,5x1,0
33	1,2x1,8	1,0x1,5	1,0x1,5	1,0x1,5
34	1,4x2,0	1,2x1,7	1,2x1,7	1,2x1,7
35	1,4x2,0	1,2x1,7	1,2x1,7	1,2x1,7

Определение плотности.

$$\rho_t = \rho_0 \frac{1}{(1 + \alpha t)},$$

где $\alpha = 1/273$, град⁻¹ – коэффициент объемного расширения.

Определение местного сопротивления

$$h_M = \xi \frac{\rho_0 w_0^2}{2} (1 + \alpha t),$$

где $w_{01}=2,04$ м/с; $w_{02}=2,04$ м/с; $w_{03}=2,94$ м/с; $w_{04}=2,94$ м/с; $w_{05}=2,94$ м/с; $w_{06}=2,94$ м/с.

Определение сопротивления трению.

$$h_T = \lambda \frac{l w_0^2}{d_s 2} \rho_0 (1 + \alpha t),$$

где $\lambda=0,04$ для металлической трубы, $\lambda=0,05$ для кирпичной трубы.

Определение геометрического напора

$$h_f = gH(\rho_0 - \rho_t),$$

где $g=9,81$ м/с²; $H=1$.

Определение общих потерь напора

$$h_{AB} = \Sigma h_{\Pi} - \Sigma h_{\Gamma};$$

$$h_{AB} = (h_T + h_M) - h_f.$$

$$h_f = gH(\rho_0 - \rho_t),$$

где $g=9,81$ м/с²; $H=1$.

Определить общие потери у основания дымовой трубы

$$h_{AB} = \Sigma h_{\Pi} - \Sigma h_{\Gamma}$$

Сделать вывод с указанием величины разряжения у основания дымовой трубы и общих потерь при движении продуктов сгорания по дымовому тракту.

Изучить методические указания к данной работе.

Определить действительное разряжение у основания дымовой трубы.

Принимаем, что труба с 25% запасом прочности, т.е. действительное разряжение должно быть на 20%--40% больше потерь давления при движении дыма.

$$h_{B, \text{расч.}} = h_{AB} \cdot 1,25;$$

Рассчитать падение температуры в трубе

$$\Delta T = 1,3H$$

Рассчитать диаметр устья трубы

$$d_B = \sqrt{\frac{V_0 \cdot 4}{w_{OB} \cdot \pi}}$$

Рассчитать высоту дымовой трубы по методике, приведенной в данном пособии

$$H = \frac{h_{B,расч.} + \frac{\rho_0 w_{OB}^2}{2} (1 + \alpha t_B)}{(\rho_a - \rho_{4-5})g - 0,5 \frac{\xi}{d_B} \left[\frac{\rho_0 w_{OB}^2}{2} (1 + \alpha t_B) + \frac{\rho_0 w_{OB}^2}{2} (1 + \alpha t_B) \right]}$$

Сделать вывод с указанием высоты дымовой трубы и ее запас прочности.

Форма представления результата:

Расчеты выполнить и оформить в рабочей тетради.

Критерии оценки:

Процент положительных оценок	Оценка	
	балл (отметка)	вербальный аналог
90 - 100	5	отлично
80 - 89	4	хорошо
70 - 79	3	удовлетворительно
менее 70	2	не удовлетворительно

Тема 3.1 Теплопроводность и теплообмен

Практическое занятие №4

Расчет теплового потока и распределение температур в стенках печи

Цель работы: с помощью теоретических расчетов по формулам определить количество переданного тепла через стенку печи

Выполнив работу, Вы будете уметь:

- производить расчеты процессов горения и теплообмена в металлургических печах, (нагревательных и плавильных);

Материальное обеспечение:

Методические указания для расчета количества тепла, переданного через многослойную стенку

Задание:

Рассчитать тепловой поток, переданный через многослойную стенку

Порядок выполнения работы:

1. Изучить методические указания к данной практической работе.
2. Решить задачи теплопроводности при стационарном состоянии
3. Расчеты выполнить по методике, приведенной в разработке.

Ход работы:

Определить потери тепла через стенку печи при стационарном тепловом режиме, если температура внутренней поверхности кладки $t_{кл.}=t_{п.}=1300\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура окружающей среды $t_{ок.}=0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Толщина шамотной кладки $\delta_{ш.}=0,46\text{ м}$, толщина изоляционной кладки из диатомитового кирпича $\delta_{д.}=0,115\text{ м}$ и толщина изоляции из вермикулитовых плит $\delta_{в.}=0,05\text{ м}$. Определить температуры на границах слоев. Температура наружной поверхности кладки $t_{нар.}=100\text{ }^{\circ}\text{C}$

Теплопроводность шамотного кирпича $\lambda_{ш.}=0,88+0,00023t\text{ Вт/(м К)}$; диатомитового кирпича $\lambda_{д.}=0,163+0,00023t\text{ Вт/(м К)}$; вермикулитовых плит $\lambda_{в.}=0,081+0,00023t\text{ Вт/(м К)}$.

1. Принимаем в первом приближении распределение температур по толщине кладки линейным. Найдем температуры на границах раздела слоев.

$$t_{ш-д} = t_{нар.} + (t_{кл.} - t_{нар.}) \frac{\delta_{д.} + \delta_{в.}}{\delta_{ш.} + \delta_{д.} + \delta_{в.}};$$

$$t_{д-в} = t_{нар.} + (t_{кл.} - t_{нар.}) \frac{\delta_{в.}}{\delta_{ш.} + \delta_{д.} + \delta_{в.}};$$

2. Средняя температура слоя шамота

$$t_{ш}^{cp} = \frac{t_{кл.} + t_{ш-д}}{2};$$

3. Коэффициент теплопроводности шамота

$$\lambda_{ш} = 0,88 + 0,00023 \cdot 858,4 = 1,077 \text{ (Вт/(м} \cdot \text{К))}$$

4. Средняя температура слоя диатомита

$$t_{д}^{cp} = \frac{t_{ш-д} + t_{д-в}}{2};$$

5. Коэффициент теплопроводности диатомита

$$\lambda_{д} = 0,163 + 0,00023 \cdot 306,4 = 0,29 \text{ (Вт/(м} \cdot \text{К))}$$

6. Средняя температура слоя вермикулита

$$t_{в}^{cp} = \frac{t_{д-в} + t_{нар.}}{2};$$

7. Коэффициент теплопроводности вермикулита

$$\lambda_{в} = 0,081 + 0,00023 \cdot 148 = 0,115 \text{ (Вт/(м} \cdot \text{К))}$$

8. Плотность теплового потока через трехслойную стенку

$$q = \frac{t_{кл.} - t_{ок.}}{\sum_{i=1}^3 \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

где α_2 - коэффициент теплоотдачи конвекцией от наружной поверхности футеровки в окружающую среду

$$\alpha_2 = 10 + 0,06t_{нар.};$$

$$\alpha_2 = 10 + 0,06 \cdot 100 = 16 \text{ (Вт/м}^2 \cdot \text{К)}$$

тогда

$$q = \frac{1300 - 0}{\frac{0,46}{1,077} + \frac{0,115}{0,29} + \frac{0,05}{0,115} + \frac{1}{16}} = 984,8 \text{ (Вт/м}^2\text{)}$$

9. Найдем уточненные значения температур на границах раздела слоев футеровки

$$t'_{Ш-Д} = t_{КЛ.} - q \frac{\delta_{Ш}}{\lambda_{Ш}};$$

$$t'_{Ш-Д} = 1300 - 984,8 \frac{0,46}{1,077} = 875,3(^{\circ}\text{C})$$

$$t'_{Д-В} = t_{КЛ.} - q \left(\frac{\delta_{Ш}}{\lambda_{Ш}} + \frac{\delta_{Д}}{\lambda_{Д}} \right);$$

$$t'_{Д-В} = 1300 - 984,8 \left(\frac{0,46}{1,077} + \frac{0,115}{0,29} \right) = 484,1(^{\circ}\text{C})$$

$$t'_{НАР} = t_{ОК} + \frac{q}{\alpha_2};$$

$$t'_{НАР} = 0 + \frac{984,8}{16} = 61,7(^{\circ}\text{C})$$

10. Определяем уточненные значения средних температур слоев и коэффициентов теплопроводности

$$\text{при } t_{Ш}^{cp'} = \frac{t_{КЛ.} + t'_{Ш-Д}}{2};$$

$$t_{Ш}^{cp'} = \frac{1300 + 875,3}{2} = 1087,6(^{\circ}\text{C})$$

$$\lambda'_{Ш} = 0,88 + 0,00023 \cdot 1087,6 = 1,13 \text{ (Вт/м} \cdot \text{К)}$$

$$\text{при } t_{Д}^{cp'} = \frac{t'_{Ш-Д} + t'_{Д-В}}{2};$$

$$t_{Д}^{cp'} = \frac{875,3 + 484,1}{2} = 679,7(^{\circ}\text{C})$$

$$\lambda'_{Д} = 0,163 + 0,00023 \cdot 679,7 = 0,45 \text{ (Вт/м} \cdot \text{К)}$$

$$\text{при } t_{В}^{cp'} = \frac{t'_{Д-В} + t'_{НАР}}{2};$$

$$t_{В}^{cp'} = \frac{484,1 + 61,7}{2} = 272,9(^{\circ}\text{C})$$

$$\lambda'_{В} = 0,081 + 0,00023 \cdot 272,9 = 0,144 \text{ (Вт/м} \cdot \text{К)}$$

$$\alpha'_2 = 10 + 0,06 t'_{НАР}$$

$$\alpha'_2 = 10 + 0,06 \cdot 61,7 = 13,7 \text{ (Вт/м}^2 \cdot \text{К)}$$

11. Найдем уточненное значение плотности потока тепла через стенку

$$q' = \frac{t_{КЛ.} - t_{ОК}}{\sum_{i=1}^3 \frac{\delta_i}{\lambda'_i} + \frac{1}{\alpha'_2}};$$

$$q' = \frac{1300 - 0}{\frac{0,46}{1,13} + \frac{0,115}{0,45} + \frac{0,05}{0,144} + \frac{1}{13,7}} = 1214,9 \text{ (Вт/м}^2\text{)}$$

Вывод: распределение температур по толщине стенки будет:

$$t_{\text{кл.}}=1300^{\circ}\text{C}; t_{\text{ш-д}}=875,3^{\circ}\text{C}; t_{\text{д-в}}=484,1^{\circ}\text{C}; t_{\text{НАР}}=61,7^{\circ}\text{C}.$$

Форма представления результата:

Расчеты выполнить в тетради для лабораторных работ.

Критерии оценки:

Процент положительных оценок	Оценка	
	балл (отметка)	вербальный аналог
90 - 100	5	отлично
80 - 89	4	хорошо
70 - 79	3	удовлетворительно
менее 70	2	не удовлетворительно

Тема 3.2 Теплопроводность и теплообмен

Практическое занятие № 5

Расчет коэффициента теплопроводности металла

Цель работы: с помощью теоретических расчетов по формулам определить коэффициент теплоотдачи

Выполнив работу, Вы будете уметь:

- производить расчеты процессов горения и теплообмена в металлургических печах, (нагревательных и плавильных);

Материальное обеспечение:

Раздаточный материал

Задание:

1. Определить количество переданного тепла в печи с конвективным теплообменом при нагреве заготовки размерами 0,1x0,2x0,9м с температуры $t_{\text{нач.}}=25^{\circ}\text{C}$ до температуры $t_{\text{кон.}}=1300^{\circ}\text{C}$ за 12мин. Температура кладки печи $t_{\text{нар.}}=80^{\circ}\text{C}$ (Задачу решать по закону Ньютона.)

2. Определить количество переданного тепла в печи с конвективным теплообменом при нагреве заготовки размерами 0,2x0,3x1,2м с температуры $t_{\text{нач.}}=0^{\circ}\text{C}$ до температуры $t_{\text{кон.}}=1250^{\circ}\text{C}$ за 7мин. Температура кладки печи $t_{\text{нар.}}=120^{\circ}\text{C}$. (Задачу решать по закону Ньютона.)

Порядок выполнения работы:

1. Повторение теоретического материала
2. Решение задач

Ход работы:

1. Средний по длине методической зоны коэффициент теплоотдачи излучением определяется:

$$\alpha_{\text{изл.}} = \frac{C_0 \xi_{\text{пр}} \sqrt{\left[\left(\frac{T_z}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_M^{\text{нач.}}}{100} \right)^4 \right] \left[\left(\frac{T_z}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_M^{\text{кон.}}}{100} \right)^4 \right]}}{\sqrt{(T_z - T_M^{\text{нач.}})(T_z - T_M^{\text{кон.}})}}, \frac{Вт}{(м^2 \cdot К)}$$

2. α_2 - коэффициент теплоотдачи конвекцией от наружной поверхности футеровки в окружающую среду

$$\alpha_2 = 10 + 0.06t_{\text{НАР}};$$

3. Коэффициент теплоотдачи в данном случае будет суммарным $\alpha_{\Sigma} = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{изл.}}$.

Форма представления результата:

Расчеты выполнить в тетради для практических работ.

Критерии оценки:

Процент положительных оценок	Оценка В	
	балл (отметка)	вербальный аналог
90 - 100	5	отлично
80 - 89	4	хорошо
70 - 79	3	удовлетворительно
менее 70	2	не удовлетворительно

Тема 3.2 Теплопроводность и теплообмен

Практическое занятие № 6

Определение приведённого коэффициента излучения в системе «газ-кладка-металл»

Цель работы: с помощью теоретических расчетов по формулам определить коэффициент излучения в системе «газ-кладка-металл».

Выполнив работу, Вы будете уметь:

- производить расчеты процессов горения и теплообмена в металлургических печах, (нагревательных и плавильных);

Материальное обеспечение: методические указания к проведению лабораторной работы

Задание: Вычислить коэффициент излучения по данным.

Таблица 1 - Значения в зависимости от температуры газа

900	0,20	3,33
1000	0,18	3,21
1100	0,16	3,07
1200	0,15	2,99
1300	0,14	2,90

Порядок выполнения работы:

1. Определить геометрические параметры излучения.
2. Определить поверхность кладки.
3. Определить степень черноты газа.
4. Определить приведенный коэффициент излучения «газ-кладка-металл».

Определяем геометрические параметры излучения. Поверхность кладки:

$$F_{\text{кл}} = F_{\text{торцст}} + F_{\text{бокст}} + F_{\text{св}} + F_{\text{под}} = 2Bh_{\text{ср}} + 2Lh + \frac{\pi R \varphi}{180} L + LB = \\ = 2 \cdot 1,5 \cdot 1,3 + 2 \cdot 1,4 \cdot 1,2 + \frac{3,14 \cdot 1,8 \cdot 60}{180} \cdot 1,4 + 1,4 \cdot 1,5 = 11,9 \text{ м}^2$$

Объем рабочего пространства печи:

$$V_{\text{р.п}} = BLh_{\text{ср}} = 1,5 \cdot 1,4 \cdot 1,3 = 2,73 \text{ м}^3$$

Объем металла:

Объем рабочего пространства, заполненного газом:

$$V_{\text{Г}} = V_{\text{р.п}} - V_{\text{М}} = 2,73 - 0,016 = 2,714^3$$

Эффективная толщина газового слоя:

$$S_{\text{эф}} = \frac{3,5V_{\text{Г}}}{F_{\text{кл}} + F_{\text{М}}} = \frac{3,5 \cdot 2,714}{11,9 + 1,264} = 0,721 \text{ м}$$

Приведенный коэффициент излучения «газ-кладка-металл».

$$C_{\text{Г.К.М}} = \frac{5,77 \cdot \varepsilon_{\text{М}} \cdot \varepsilon_{\text{Г}}}{\varepsilon_{\text{Г}} + \varphi_{\text{КМ}}(1 - \varepsilon_{\text{Г}})}, \text{ Вт / м}^2 \text{ К}^4$$

Принимаем:

$$\varphi_{\text{КМ}} = \frac{F_{\text{М}}}{F_{\text{К}} + F_{\text{М}}} = \frac{1,26}{11,9 + 1,26} = 0,0957$$

Тогда, приведенный коэффициент излучения будет равен:

$$C_{\text{ПЕЧ.М}} = \frac{5,77 \cdot \varepsilon_{\text{М}} \cdot \varphi_{\text{М.К}}}{1 - \varphi_{\text{М.М}}(1 - \varepsilon_{\text{М}})}, \text{ Вт / м}^2 \text{ К}^4$$

Форма представления результата:

Расчеты выполнить в тетради для лабораторных работ.

Критерии оценки:

Процент положительных оценок	Оценка	
	балл (отметка)	вербальный аналог
90 - 100	5	отлично
80 - 89	4	хорошо
70 - 79	3	удовлетворительно
менее 70	2	не удовлетворительно

Тема 4.1 Основы рациональной технологии нагрева металла .

Дефекты нагрева металла

Практическое занятие №7

Определение режимов нагрева тонких и массивных тел

Цель работы: научиться определять режимы нагрева тонких и массивных тел

Выполнив работу, Вы будете уметь:

- производить расчеты процессов горения и теплообмена в металлургических печах, (нагревательных и плавильных);

Материальное обеспечение:

Методические указания к проведению практической работы.

Задание:

Решение задач по теме.

Порядок выполнения работы:

1. Повторение теоретического материала.
2. Решение задач для тонких тел
3. Решение задач для массивных тел

Ход работы:

1. Физический смысл и роль критерия Bi становятся ясными, если его значение записать в таком виде:

$$Bi = \frac{\alpha s}{\lambda} = \frac{s/\lambda}{1/\alpha}.$$

2. Большую роль играет критерий Bi . С теплотехнической точки зрения весь металл подразделяется на «тонкий» и «массивный». Если критерий $Bi > 0,25$, тело «массивное», если $Bi < 0,25$ – тело «тонкое».

3. Методы расчета «тонкого» и «массивного» металла различны, поэтому в первую очередь необходимо определить значение критерия Bi . Наиболее простым методом расчета времени нагрева металла является графо - аналитический метод с применением номограмм Будрина.

Задачи:

1. Определить температурный критерий поверхности пластины толщиной 150 мм, если известно, что критерий Bi равен 6, коэффициент теплопроводности равен $5,56 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, время нагрева 1 час.

2. Определить температурный критерий центра цилиндра, если известно, что $Fo=8$, $Bi=0,7$; $Fo=12$, $Bi=0,14$.

Определить температурный критерий поверхности пластины, если известно, что $Fo=8$, $Bi=0,2$; $Fo=6$, $Bi=0,3$.

3. Определить критерий Bi для поверхности пластины, если известно, что температурный критерий поверхности равен 0,1, а критерий Фурье

4. Рассчитать время нагрева массивного тела, если известно:

температура газа 1125°C ; начальная температура металла 20°C ; толщина металла 0,066м; $\lambda=40,8 \text{ Вт}/(\text{м К})$; $\alpha_{\text{изл}}=122,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$; конечная температура металла 450°C .

Определение температурного критерия θ и критерия Bi

$$\Theta = \frac{t_2 - t_{\text{итов.}}^{\text{кон}}}{t_2 - t_{\text{ит}}^{\text{нач.}}} ; \quad \text{Bi} = \frac{\alpha_{\text{изл}} \cdot S}{\lambda} ;$$

$$\Theta = \frac{1125 - 450}{1125 - 20} ; \quad \text{Bi} = \frac{122,3 \cdot 0,066}{40,8} ;$$

$$\Theta = 0,61. \quad \text{Bi} = 0,198.$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м К)

Так же находится коэффициент температуропроводности $a = 8,05 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

По номограммам в находится критерий Фурье $\text{Fo}=2,5$

Время нагрева массивного тела определяется:

$$\tau_{\text{м}} = \text{Fo} \frac{S^2}{a} ;$$

$$\tau_{\text{м}} = 2,5 \frac{0,066^2}{8,05 \cdot 10^{-6}} ;$$

$$\tau_{\text{м}} = 3822,4 \text{ с (1,1 ч)}$$

Форма представления результата:

Расчеты выполнить в тетради для практических работ.

Критерии оценки:

Процент положительных оценок	Оценка	
	балл (отметка)	вербальный аналог
90 - 100	5	отлично
80 - 89	4	хорошо
70 - 79	3	удовлетворительно
менее 70	2	не удовлетворительно

Тема 4.1 Основы рациональной технологии нагрева металла .

Дефекты нагрева металла

Практическое занятие № 8

Расчет времени нагрева металла в металлургической печи

Цель работы: с помощью теоретических расчетов по формулам научиться определять время нагрева металла в методической зоне нагревательной печи.

Выполнив работу, Вы будете уметь:

- производить расчеты процессов горения и теплообмена в металлургических печах, (нагревательных и плавильных);

Материальное обеспечение:

Методическая разработка по выполнению расчета времени нагрева металла в методической печи, справочная литература, номограммы для определения степени черноты газов, номограммы Д.В. Будрина для расчета времени нагрева пластины

Задание: Данные для расчетов:

№ варианта	P, T	δ , мм	b, мм	l, мм	$t_{\text{кон. Me}}$, C ⁰	$t_{\text{окр. ср}}$, C ⁰	Материал металла
1	72	210	1400	10500	1250	30	Ст 35
2	83	250	250	11000	1200	20	08 кп
3	80	230	1450	11500	1200	0	Ст 0
4	85	240	1350	10000	1150	10	Ст 45
5	73	220	220	10500	1200	10	Ст 55
6	75	190	1150	9000	1100	0	Ст 1
7	75	195	1150	9500	1150	15	Ст 15
8	85	300	1500	11000	1300	25	Ст 45
9	82	210	210	10500	1250	30	Ст 5
10	70	185	1100	9000	1150	10	08 пс(ж)
11	77	240	1400	12000	1300	20	08 Ю
12	90	255	1500	12000	1300	15	Ст 20
13	87	245	1450	11500	1250	10	Ст 3
14	85	230	230	10000	1200	0	09 Г 2С
15	67	180	1000	8500	1150	10	08 кп
16	82	220	220	9500	1250	15	20 ХНА
17	72	200	200	9000	1200	20	Ст 0
18	85	195	1100	10000	1250	30	Ст 2
19	75	240	1000	9500	1250	15	Ст 65
20	73	240	240	10500	1200	25	Ст 70
21	87	250	1250	5600	1250	0	Ст 65 Г
22	83	250	1300	7000	1250	5	18 ЮА
23	86	250	1580	8500	1200	10	08 пс(ж)
24	70	250	1080	7600	1250	10	Ст 2
25	80	250	1500	7500	1250	15	Ст 45
26	90	250	1850	8800	1350	5	Ст 50
27	75	250	1350	9000	1200	20	Ст 20
28	73	250	250	10000	1200	25	09 Г 2 С
29	83	250	1380	5700	1250	30	08 кп
30	85	250	1800	6500	1300	35	Ст 15
31	72	230	1080	8000	1250	0	Ст 65
32	82	200	200	8500	1300	15	Ст 70
33	87	240	240	9500	1250	5	Ст 0
34	86	250	1500	7000	1200	40	18 ЮА
35	90	195	1000	10500	1350	50	20 ХНА

Порядок выполнения работы:

Изучить методические указания к данной работе.

1. Определить ориентировочные размеры методической печи
2. Рассчитать степень развития кладки методической печи
3. Определить эффективную длину луча в методической печи
4. Определить время нагрева металла в методической печи используя номограммы Д.В. Будрина

$$\tau_M = Fo \frac{S^2}{a}$$

Ход работы:

Температура уходящих из печи дымовых газов принимаем равной $t_{yx}=1050\text{ }^{\circ}\text{C}$; температура в печи в томильной зоне на $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше температуры нагрева металла, т.е. $t_k+50\text{ }^{\circ}$, значит $1150+50=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. В методической зоне и при переходе из нее в сварочную зону температура в центре металла должна быть порядка $400 - 500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Разность температур между поверхностью и серединой заготовки для методической зоны

$$\Delta t = t_{\text{пов.}} - t_{\text{ц}} = (700 \div 800)S,$$

где $S = \mu \delta$ – расчетная толщина изделия,

$\mu = 0,55$ – коэффициент несимметричности нагрева, определяется по таблице

$$S = 0,55 \cdot 0,12;$$

$$S = 0,066 \text{ м},$$

тогда

$$\Delta t = 700 \cdot 0,066;$$

$$\Delta t = 46,2\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_{\text{пов.}} = \Delta t + t_{\text{ц}};$$

$$t_{\text{пов.}} = 46,2 + 400;$$

$$t_{\text{пов.}} = 446,2\text{ }^{\circ}\text{C} \approx 450\text{ }^{\circ}\text{C},$$

следовательно, температура поверхности сляба в конце методической зоны равна $450\text{ }^{\circ}\text{C}$

Ориентировочные размеры печи

При однорядном расположении заготовок ширина печи будет:

$$B = l + 2a;$$

$$B = 2,0 + 2 \cdot 0,2;$$

$$B = 2,4 \text{ м},$$

где $a = 0,2 \text{ м}$ – зазор между слябами и стенками печи.

В соответствии с рекомендациями высоту печи принимаем равной:

в томильной зоне $H_T = 1,5 \text{ м}$;

в сварочной зоне $H_{\text{св.}} = 2,6 \text{ м}$;

в методической зоне $H_M = 2,2 \text{ м}$.

Степень развития кладки (на 1 м длины печи) для:

методической зоны

$$\omega_M = (2H_M + B)/l;$$

$$\omega_M = (2 \cdot 2,2 + 2,4)/2;$$

$$\omega_M = 3,4;$$

сварочной зоне:

$$\omega_{\text{св.}} = (2H_{\text{св.}} + B)/l;$$

$$\omega_{\text{св.}} = (2 \cdot 2,6 + 2,4)/2;$$

$$\omega_{св.}=3,8$$

томильной зоне:

$$\omega_{т.}=(2H_{т.}+B)/l;$$

$$\omega_{т.}=(2 \cdot 1,5+2,4)/2;$$

$$\omega_{т.}=2,7.$$

Определение эффективной длины луча.

$$S_{эф.}=3,6 \frac{V}{F} \text{ - формула А.С.Невского}$$

$$S_{эф.}=3,6 \frac{B \cdot H}{2B + 2H};$$

методическая зона:

$$S_{эф.}^m = 3,6 \frac{2,4 \cdot 2,2}{2 \cdot 2,4 + 2 \cdot 2,2};$$

$$S_{эф.}^m = 0,57 \text{ м};$$

сварочная зона:

$$S_{эф.}^{св.} = 3,6 \frac{2,4 \cdot 2,6}{2 \cdot 2,4 + 2 \cdot 2,2};$$

$$S_{эф.}^{св.} = 0,62 \text{ м};$$

томильная зона:

$$S_{эф.}^m = 3,6 \frac{2,4 \cdot 1,5}{2 \cdot 2,4 + 2 \cdot 1,5};$$

$$S_{эф.}^m = 0,46 \text{ м}$$

Определение времени нагрева в методической зоне

Степень черноты дымовых газов ξ_2^m при средней температуре $t_r=0,5(1200^0+1050^0)=1125^0\text{C}$

Парциальное давление CO_2 и H_2O :

$$p_{\text{CO}_2} = 98,1 \cdot 0,088;$$

$$p_{\text{CO}_2} = 8,66 \text{ кПа};$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = 98,1 \cdot 0,174;$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = 17,07 \text{ кПа},$$

где - 98,1-абсолютное давление смеси;

0,088 и 0,174 соответственно берется из расчета горения топлива при определении процентного состава продуктов сгорания (CO_2 8,83%; H_2O 17,35%)

и делится на 100%.

Определяем $p_{\text{CO}_2} \cdot S_{эф.} = 8,66 \cdot 0,57 = 4,9 \text{ кПа} \cdot \text{м};$

$p_{\text{H}_2\text{O}} \cdot S_{эф.} = 17,07 \cdot 0,57 = 9,7 \text{ кПа} \cdot \text{м}.$

$$\xi_{\text{CO}_2} = 0,07, \xi_{\text{H}_2\text{O}} = 0,09, \beta = 1,09,$$

тогда

$$\xi_2^m = \xi_{\text{CO}_2} + \beta \xi_{\text{H}_2\text{O}};$$

$$\xi_2^m = 0,07 + 1,09 \cdot 0,09;$$

$$\xi_2^m = 0,168.$$

Определение приведенная степень черноты

$$\xi_{пр} = \xi_M \frac{\omega_M + 1 - \xi_z^M}{[\xi_{ме} + \xi_z^M (1 - \xi_{ме})] \frac{1 - \xi_z^M}{\xi_z^M} + \omega_M},$$

где $\xi_{ме}$ – степень черноты металла $\xi_{ме}=0,8$

$$\xi_{пр} = 0,8 \frac{3,4 + 1 - 0,168}{[0,8 + 0,168(1 - 0,8)] \frac{1 - 0,168}{0,168} + 3,4};$$

$$\xi_{пр} = 0,44.$$

Средний по длине методической зоны коэффициент теплоотдачи излучением определяется:

$$\alpha_{изл.} = \frac{C_0 \xi_{пр} \sqrt{\left[\left(\frac{T_z}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_M^{нач.}}{100} \right)^4 \right] \left[\left(\frac{T_z}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_M^{кон.}}{100} \right)^4 \right]}}{\sqrt{(T_z - T_M^{нач.})(T_z - T_M^{кон.})}}$$

где $C_0=5,7$ Вт/(м²К) - константа излучения черного тела.

Принимаем $t_M^{нач.}=20^0$ С; $t_M^{кон.}=450^0$ С – считали в 1) пункте.

$$\alpha_{изл.}=122,3 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}.$$

Определение температурного критерия Θ и критерия Bi

$$\Theta = \frac{t_z - t_{мнов.}^{кон.}}{t_z - t_M^{нач.}}; \quad Bi = \frac{\alpha_{изл.} \cdot S}{\lambda};$$

$$\Theta = \frac{1125 - 450}{1125 - 20}; \quad Bi = \frac{122,3 \cdot 0,066}{40,8};$$

$$\Theta = 0,61.$$

$$Bi = 0,198.$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м К)

Так же находится коэффициент температуропроводности

$$a = 8,05 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

По номограммам находится критерий Фурье $Fo=2,5$

Время нагрева металла в методической зоне печи определяется:

$$\tau_M = Fo \frac{S^2}{a};$$

$$\tau_M = 2,5 \frac{0,066^2}{8,05 \cdot 10^{-6}};$$

$$\tau_M = 3822,4 \text{ с (1,1 ч)}$$

Время нагрева металла в сварочной зоне.

Найдем степень черноты дымовых газов при $t_r = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$

$$p_{CO_2} = 8,66 \text{ кПа}; \quad p_{H_2O} = 17,07 \text{ кПа};$$

$$p_{CO_2} S_{\text{эф.}} = 8,66 \cdot 0,62;$$

$$p_{CO_2} S_{\text{эф.}} = 5,4 \text{ кПа} \cdot \text{м};$$

$$p_{H_2O} S_{\text{эф.}} = 17,07 \cdot 0,62;$$

$$p_{H_2O} S_{\text{эф.}} = 10,6 \text{ кПа} \cdot \text{м}.$$

По номограммам находим

$$\xi_{CO_2} = 0,07; \quad \xi_{H_2O} = 0,09; \quad \beta = 1,08.$$

Из этого следует

$$\xi_2^{св} = 0,07 + 1,08 \cdot 0,09$$

$$\xi_2^{св} = 0,17$$

Принимаем температуру поверхности металла в конце сварочной зоны $950 \text{ }^\circ\text{C}$

Приведенная степень черноты определяется по формуле

$$\xi_{np}^{св} = 0,8 \frac{3,8 + 1 - 0,17}{[0,8 + 0,17(1 - 0,8)] \frac{1 - 0,17}{0,17} + 3,8}$$

$$\xi_{np}^{св} = 0,59$$

По формуле определим $\alpha_{изл}^{св}$

$$\alpha_{изл}^{св} = 76,4 \text{ (Вт/(м}^2 \cdot \text{К))}$$

Находим среднюю по сечению температуру металла в начале сварочной зоны (в конце методической зоны)

$$t_{св}^{ср.нач.} = t_{нов} - \frac{2}{3} (t_{нов} - t_{ц});$$

$$t_{св}^{ср.нач.} = 450 - \frac{2}{3} (450 - 351);$$

$$t_{св}^{ср.нач.} = 384 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Находим температурный критерий для поверхности заготовки

$$\Theta_{пов} = \frac{1200 - 950}{1200 - 384};$$

$$\Theta_{пов} = 0,31$$

Примем температуру в центре заготовки в конце зоны 800°C , тогда средняя температура металла в сварочной зоне будет:

$$t_{св}^{cp} = 0,25(t_{м}^{кон} + t_{ц}^{кон} + t_{ног}^{св} + t_{ц}^{св});$$

$$t_{св}^{cp} = 0,25(450+384+950+800);$$

$$t_{св}^{cp} = 646^{\circ}\text{C}.$$

находим: $\lambda=37,1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $a=6,39\cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, далее следует

$$Bi = \frac{76,4 \cdot 0,066}{37,1};$$

$$Bi = 0,14.$$

По номограмме находим критерий Fo

$$Fo = 8,1$$

Время нагрева в сварочной зоне

$$\tau_{св} = Fo \frac{S^2}{a};$$

$$\tau_{св} = 8,1 \frac{0,066^2}{6,39 \cdot 10^{-6}};$$

$$\tau_{св} = 7236,0 \text{ с (2,01 час.)}$$

Время нагрева в томильной зоне.

Перепад температур по толщине в начале томильной зоны

$$\Delta t_{нач.} = 1200 - 914,4;$$

$$\Delta t_{нач.} = 285,6^{\circ}\text{C}.$$

Допустимый перепад температур в конце нагрева $\Delta t_{кон.} = 50^{\circ}\text{C}$

Степень выравнивания температур

$$\delta_{выр.} = \frac{\Delta t_{кон.}}{\Delta t_{нач.}};$$

$$\delta_{выр.} = \frac{50}{285,6};$$

$$\delta_{выр.} = 0,18$$

При коэффициенте несимметричности нагрева, равном $\mu=0,55$ критерий Fo для томильной зоны согласно номограмме равен $Fo=2,5$

При средней температуре металла в томильной зоне

$$t_T^{cp} = 0,25(t_{г} + t_{ц}^{св} + t_{м}^{ног} + t_{м}^{кон});$$

$$t_T^{cp} = 0,25(1200+914,4+950+1200);$$

$$t_T^{cp.} = 1066,1 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$\lambda = 28,5 \text{ Вт/(М}\cdot\text{К)}; a = 83 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Время томления

$$\tau_T = Fo \frac{S^2}{a};$$

$$\tau_T = 2,5 \frac{0,066^2}{83 \cdot 10^{-6}};$$

$$\tau_T = 1964,25 \text{ с (0,55 ч)}.$$

Полное время пребывания металла в печи равно

$$\tau = \tau_M + \tau_{CB} + \tau_T;$$

$$\tau = 3822,4 + 7236,0 + 1964,25;$$

$$\tau = 13022,65 \text{ с (3,6 ч)}.$$

Вывод: время нагрева металла в трехзонной методической печи садкой 74 т составляет 13022,65с или 3,6 часа.

Форма представления результата:

Расчеты выполнить и оформить в тетради для практических работ.

Критерии оценки:

Процент положительных оценок	Оценка	
	балл (отметка)	вербальный аналог
90 - 100	5	отлично
80 - 89	4	хорошо
70 - 79	3	удовлетворительно
менее 70	2	не удовлетворительно

Тема 4.1 Основы рациональной технологии нагрева металла

Дефекты нагрева металла

Практическое занятие №9

Расчет продолжительности нагрева «тонкого» и «массивного» тел при постоянной температуре печи

Цель работы: научиться рассчитывать продолжительность нагрева «тонкого» и «массивного» тел при постоянной температуре печи

Выполнив работу, Вы будете уметь:

- производить расчеты процессов горения и теплообмена в металлургических печах, (нагревательных и плавильных);

Материальное обеспечение:

Методическая указания для проведения практической работы.

Задание:

Определить время нагрева сляба размером 1800x240x4000мм³ из высокоуглеродистой стали при двухстороннем нагреве. Металл нагревается от 20⁰С до 500⁰С в печи с температурой 1000⁰С и коэффициентом теплоотдачи $\alpha = 50 \text{ Вт/м}^3 \cdot \text{К}$.

№ варианта	Сталь
1,11,21	Малоуглеродистая
2,12,22	Среднеуглеродистая
3,13,23	Хромованадиевая
4,14,24	Хромистая
5,15,25	Марганцовистая
6,16,26	Хромокремнистая
7,17,27	Кремнемарганцовистая
8,18,28	Хромомолибденовая
9,19,29	Трансформаторная
10,20,30	Хромоникелевая

Порядок выполнения работы:

1) Определяем безразмерный температурный критерий Θ :

$$\Theta = (t_n - t_{\text{кон}}^{\text{М}}) / (t_n - t_{\text{нач}}^{\text{М}})$$

$$\Theta = (1000 - 500) / (1000 - 20) = 0,51$$

2) Определяем критерий Био Bi :

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

где $S = \mu \cdot \delta = 0,5 \cdot 0,240 = 0,12 \text{ м}$ при двухстороннем нагреве

$$\lambda = 40,9 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$$

$$Bi = 50 \cdot 0,12 / 40,9 = 0,15$$

3) Определяем критерий Фурье Fo для поверхности и центра сляба по рисунку A21, A2 приложения.

$$Fo_{\text{пов.}} = 4,2$$

$$Fo_{\text{центр.}} = 4,8$$

$$\tau = Fo \cdot S^2 / a,$$

Отсюда,

$$\text{где } a = 9,44 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

$$\tau_{\text{пов.}} = 4,2 \cdot 0,12^2 / 9,44 \cdot 10^{-6} = 3,434 \cdot 10^3 = 1,78 \text{ ч}$$

$$\tau_{\text{центр.}} = 4,8 \cdot 0,12^2 / 9,44 \cdot 10^{-6} = 6,127 \cdot 10^3 = 2,04 \text{ ч}$$

$$[\tau] = [\text{м}^2 \cdot \text{с} / \text{м}^2] = [\text{с}]$$

$$\tau_{\text{пов.}} = 1,78 \text{ ч}$$

$$\tau_{\text{центр.}} = 2,04 \text{ ч}$$

Таблица А1 – Тепловые эффекты реакций окисления

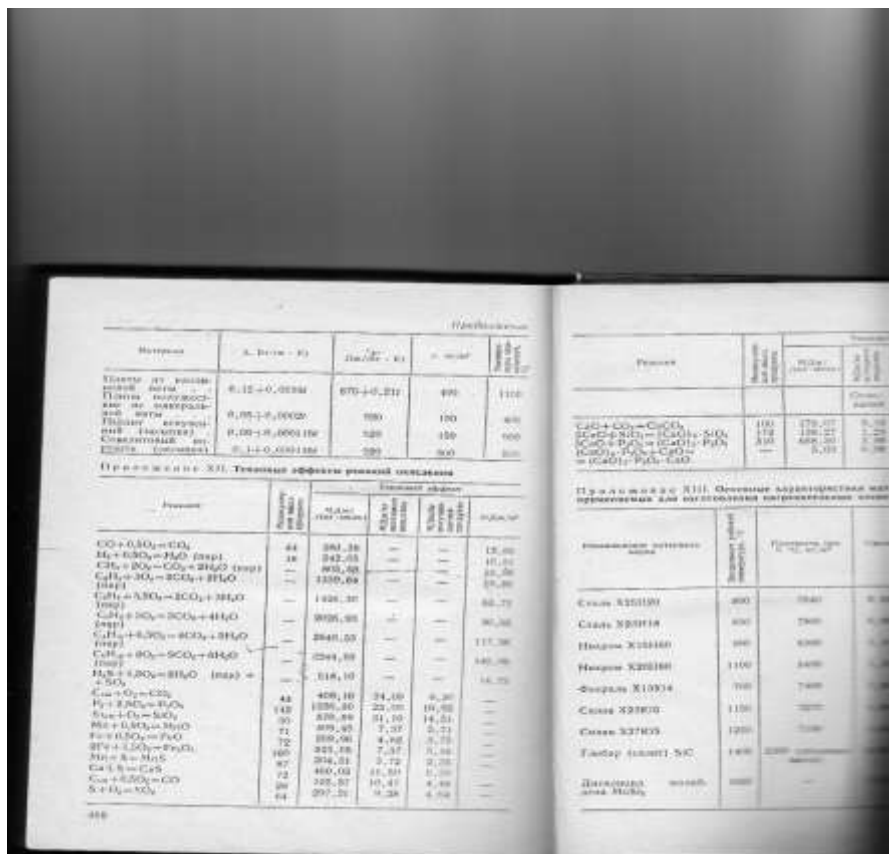


Таблица А2 – Энтальпия кДж/ воздуха и газов при различных температурах и постоянном давлении 101,3 кПа

Температура, К (°C)	CO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O	Воздух сухой	CO	H ₂	H ₂ S	CH ₄
373 (100)	172,00	130,13	131,93	150,18	130,51	130,21	128,96	154,08	165,39
473 (200)	361,67	260,60	267,38	303,47	261,94	262,10	259,59	314,86	353,38
573 (300)	564,24	392,41	407,48	461,36	395,42	395,67	390,65	482,34	567,75
673 (400)	777,44	526,89	551,85	623,69	532,08	532,58	520,86	658,19	808,93
773 (500)	1001,78	664,58	700,17	791,55	672,01	672,01	653,17	841,59	984,78
873 (600)	1236,76	805,06	851,64	964,68	814,96	816,46	786,41	1032,51	1071,84
973 (700)	1475,41	940,36	1005,24	1143,64	960,75	961,33	920,30	1230,98	1667,68
1073 (800)	1718,95	1094,65	1162,32	1328,11	1109,05	1112,06	1055,12	1436,98	1996,36
1173 (900)	1972,43	1243,55	1319,67	1517,87	1259,36	1262,38	1190,78	1646,75	2336,35
1273 (1000)	2226,75	1393,86	1480,11	1713,32	1411,86	1415,20	1327,28	1863,21	2696,43
1373 (1100)	2485,34	1546,14	1641,02	1913,67	1565,94	1570,54	1469,22	2081,77	3062,79
1473 (1200)	2746,44	1699,76	1802,76	2118,78	1721,36	1728,39	1612,83	2306,20	3446,74
1573 (1300)	3010,58	1857,74	1966,05	2328,01	1879,27	1883,31	1758,12	2531,04	—
1673 (1400)	3276,75	2012,36	2129,93	2540,25	2036,87	2045,76	1905,08	2760,91	—
1773 (1500)	3545,34	2170,55	2296,78	2758,39	2196,19	2200,26	2011,85	2995,80	—
1873 (1600)	3815,86	2328,65	2463,97	2979,13	2356,68	2364,82	2204,04	—	—
1973 (1700)	4087,10	2486,28	2632,09	3203,05	2517,60	2526,85	2356,02	—	—
2073 (1800)	4360,67	2646,74	2800,48	3429,90	2680,01	2690,56	2509,69	—	—
2173 (1900)	4634,76	2808,22	2971,30	3657,85	2841,43	2848,00	2657,07	—	—
2273 (2000)	4910,51	2970,25	3142,76	3889,72	3006,26	3014,64	2813,66	—	—
2373 (2100)	5186,81	3131,96	3314,85	4121,79	3169,77	3174,16	2971,93	—	—
2473 (2200)	5464,20	3295,84	3487,44	4358,83	3338,21	3343,73	3131,88	—	—
2573 (2300)	5746,39	3457,20	3662,33	4485,34	3500,54	3505,36	3293,49	—	—
2673 (2400)	6023,25	3620,58	3837,64	4724,37	3665,80	3666,82	3456,79	—	—
2773 (2500)	6303,53	3786,09	4014,29	5076,74	3835,29	3840,58	3620,76	—	—

Таблица А3 – коэффициенты местных сопротивлений

Форма представления результата:

Расчеты выполнить и оформить в тетради для практических работ.

Критерии оценки:

Процент положительных оценок	Оценка	
	балл (отметка)	вербальный аналог
90 - 100	5	отлично
80 - 89	4	хорошо
70 - 79	3	удовлетворительно
менее 70	2	не удовлетворительно

Тема 6.1 Устройства для утилизации тепла в печах. Способы очистки газов

Практическое занятие №10

Расчет теплообменника

Цель работы: научиться применять расчетные соотношения теплообменников

Выполнив работу, Вы будете уметь:

- производить расчеты процессов горения и теплообмена в металлургических печах, (нагревательных и плавильных);

Материальное обеспечение:

Методическая разработка по выполнению расчета регенератора,

Задание:

1. Определить КПД теплообменника плавильной печи, если состав дымового газа: 13,3%CO₂; 9,87%N₂O; 1,81%O₂; 75,02%N₂ и его температура t_r=2100⁰ С. Температура подогрева воздуха t_в=1200⁰ С.

2. Определить степень утилизации тепла дымового газа составом 14%CO₂; 9,91%N₂O; 1,73%O₂; 74,36%N₂, выходящего из печи с температурой t_r=2000⁰ С. Температура подогрева воздуха t_в=1300⁰ С.

3. Определить процент экономии топлива плавильной печи, если температура горения топлива 1900°C , температура дыма 1800°C , состав дымовых газов: $13\%\text{CO}_2$; $9,1\%\text{H}_2\text{O}$; $2\%\text{O}_2$; $75,9\%\text{N}_2$, температура подогрева воздуха $t_{\text{в}}=1200^{\circ}\text{C}$.

4. Определить процент экономии топлива плавильной печи, если температура горения топлива 1800°C , температура дыма 1700°C , состав дымовых газов $14,4\%\text{CO}_2$; $9,5\%\text{H}_2\text{O}$; $1,7\%\text{O}_2$; $74,4\%\text{N}_2$, температура подогрева воздуха $t_{\text{в}}=1100^{\circ}\text{C}$.

№ варианта	Садка печи, т	Теплов. нагрузка, Q_{max} , 10^8 кДж/ч	Темп-ра дыма, входящего в регенератор $t_{\text{д}}^{\text{н}}, ^{\circ}\text{C}$	Темп-ра подогрева воздуха, $t_{\text{в}}^{\text{к}}, ^{\circ}\text{C}$	Начальная темп-ра воздуха, $t_{\text{в}}^{\text{н}}, ^{\circ}\text{C}$	Скорость воздуха в регенераторе, $w_{\text{в}}$ м/с
1	400	2	1400	750	0	0,6
2	600	3	1700	850	0	0,7
3	300	2	1450	700	0	0,6
4	200	3	1500	800	0	0,6
5	200	2	1450	780	0	0,7
6	900	3	1650	900	10	0,7
7	850	3	1700	900	10	0,6
8	400	2	1400	800	5	0,6
9	300	2	1600	800	0	0,7
10	600	3	1600	650	5	0,6
11	400	3	1550	800	10	0,7
12	900	4	1800	900	10	0,8
13	300	2	1500	600	5	0,5
14	200	2	1400	600	0	0,5
15	600	3	1750	700	0	0,7
16	300	2	1600	750	5	0,7
17	900	2	1500	850	0	0,6
18	200	3	1200	500	0	0,5
19	300	2	1100	510	0	0,5
20	400	2	800	200	5	0,4
21	600	3	1300	400	10	0,5
22	400	2	1200	400	0	0,5
23	900	3	1600	850	10	0,7
24	600	3	1500	800	5	0,6
25	900	5	1350	900	0	0,7
26	600	4	1250	850	10	0,6
27	600	3	1200	700	0	0,6
28	400	3	1200	800	5	0,7
29	300	2	1300	700	5	0,6
30	400	3	1400	600	0	0,6
31	900	4	1700	870	10	0,8

32	200	2	1210	630	0	0,5
33	300	2	1330	740	5	0,6
34	600	3	1550	750	0	0,6
35	900	5	1800	900	10	0,8

Для всех вариантов: тип насадки "Сименс";
топливо – природный газ.

Порядок выполнения работы:

1. Повторение теоретического материала.
2. Решение задач
3. Расчет размеров теплообменника

Ход работы:

Определение тепловой нагрузки теплообменника. Для нормальной работы печи надо обеспечить требуемую тепловую нагрузку, т.е. ежечасную подачу определенного количества тепла в печь.

В это количество пепла входят:

- Химически связанное тепло топлива (Q_x) – это тепло от сгорания топлива.
- Тепло подогретого газа и воздуха ($Q_{физ.}$).

$$Q_{\Sigma} = Q_x + Q_{физ.} \text{ – общее (суммарное) тепло.}$$

Из уравнения ясно, что при $Q_{\Sigma} = \text{const}$ увеличение $Q_{физ.}$ Позволит уменьшить Q_x .

Иными словами, утилизация тепла отходящих дымовых газов позволяет экономить топливо.

Степень утилизации тепла дымовых газов определяется:

$$R = \frac{I_e}{I_o}$$

Надо помнить, что $R < 1$, т.е. утилизация не может быть 100%.

I_v (i_v) – теплосодержание (энтальпия) подогретого воздуха (берется по таблице)

I_d (i_d) – теплосодержание (энтальпия) отходящих дымовых газов.

КПД (η) теплообменника:

$$\eta = \frac{I_e}{I_o} 100\%$$

Определить экономию топлива в %

$$\varepsilon = R \frac{I_o / I'_o}{1 - I_o / I'_o (1 - R)} 100\%$$

I_d – теплосодержание (энтальпия) дымовых газов покидающих печь;

I'_o - теплосодержание (энтальпия) дымовых газов при температуре горения.

Снижение расхода топлива при утилизации тепла отходящих дымовых газов является одним из путей снижения стоимости нагрева металла.

Определить объем решетки регенератора

$$V_{\text{регр}} = \frac{F_{\text{регр}}}{13}$$

Определить коэффициент стройности

$$K = \frac{H}{\sqrt{F_{\text{сеч}}}}$$

Форма представления результата:

Расчеты выполнить и оформить в тетради для практических работ.

Критерии оценки:

Процент положительных оценок	Оценка	
	балл (отметка)	вербальный аналог
90 - 100	5	отлично
80 - 89	4	хорошо
70 - 79	3	удовлетворительно
менее 70	2	не удовлетворительно

Тема 7.2 Металлургические печи и конвертеры

Практическое занятие №11

Расчет статей теплового баланса печи

Цель работы: научиться рассчитывать тепловой баланс металлургической печи.

Выполнив работу, Вы будете уметь:

- производить расчеты процессов горения и теплообмена в металлургических печах, (нагревательных и плавильных);

Материальное обеспечение:

Методические указания для проведения практической работы.

Задание: рассчитать приходную часть баланса камерной печи

1. Тепло, получаемое при сжигании топлива

$$Q_{\text{топл}} = 0,278 \cdot V \cdot Q_{\text{н}}^{\text{п}}, \text{ Вт}$$

где V – часовой расход топлива, м³/ч – неизвестная искомая величина, определяемая из теплового баланса;

$Q_{\text{н}}^{\text{п}}$ – низшая теплота сгорания топлива в кДж/м³. Определяется при расчете горения топлива.

2. Тепло, вносимое прогретым воздухом (физическое тепло воздуха). Эта статья учитывается при составлении теплового баланса рекуперативных печей.

$$Q_{\text{возд}} = 0,278 \cdot V \cdot L_{\text{г}} \cdot C_{\text{в}} \cdot t_{\text{в}}, \text{ Вт}$$

где - действительный расход воздуха, необходимый для сжигания 1 м³ газа или 1 кг мазута с учетом коэффициента избытка воздуха (из расчета горения топлива), м³/м³ или м³/кг;

- средняя теплоемкость воздуха в интервале температур от 0° до t_в, кДж/м³·град;

t_b – температура подогрева воздуха, °С. Определяется условиями работы рекуператора. Для термических печей обычно принимается в пределах 200-300 °С.

3. Физическое тепло, вносимое подогретым топливом, как правило, - газообразное топливо, подается к термическим печам без подогрева, поэтому эта статья при использовании газообразного топлива в балансе не учитывается. При работе печей на мазуте последний подогревается на 70-80 °С, тогда

$$Q_{\text{возд}} = 0,278 \cdot V \cdot C_T \cdot t_T, \text{ Вт}$$

где C_T – средняя теплоемкость мазута, кДж/кг·град;

t_T – температура подогрева мазута, °С.

4. Тепло экзотермических реакций при окислении нагреваемого металла, кДж/кг

$$Q_{\text{экз}} = 0,278 \cdot 5652 \cdot (P_M + P_{\text{тар}}) \cdot a, \text{ Вт}$$

где 5652 – тепловой эффект реакции окисления 1 кг нагреваемого металла, кДж/кг;

$(P_M + P_{\text{тар}})$ – часовая производительность печи по металлу и таре, кг/ч, (см. статьи 1 и 2 расходной части баланса);

a – относительное количество окислившегося металла (угар металла), кг/кг.

Например, если угар равен 2 %, то $a = 0,02$. Для термических печей можно принимать $a = 0,02 - 0,05$ %, для нагревательных $a = 0,01 - 0,025$ %.

Если применяется защитная атмосфера, то статья 4 не учитывается (окисление отсутствует)

Расходная часть теплового баланса

Статья 1. Полезное тепло, расходуемое на нагрев металла. Если металл поступает в печь:

$$\text{холодным } Q_M = 0,278 \cdot P \cdot C_M \cdot t_{M,K}, \text{ Вт}$$

$$\text{подогретым } Q_M = 0,278 \cdot P \cdot (C_M \cdot t_{M,K} - C_M' \cdot t_{M,H}), \text{ Вт}$$

где P – часовая производительность печи по нагреву, кг/ч. Определяется исходя из величины садки и времени нагрева:

$t_{M,K}$ – конечная температура нагрева металла, °С. Определяется маркой стали и характером технологического процесса.

$t_{M,H}$ – начальная температура металла, °С;

C_M – средняя теплоемкость металла в интервале температур от 0° до $t_{M,K}$, кДж/(кг·град);

C_M' – также для интервала температур от 0° до $t_{M,K}$, кДж/(кг·град).

Статья 2.

$$Q_{\text{тар}} = 0,278 \cdot P_{\text{тар}} \cdot C_{\text{тар}}(t_{\text{тар},K} - t_{\text{тар},H}), \text{ Вт}$$

где $P_{\text{тар}}$ – производительность печи по таре, кг/ч

$G_{\text{тар}}$ – масса тары, одновременно находящейся в печи, кг, (поддоны, башмаки, конвейер, муфель копаковой печи и др.)

$C_{\text{тар}}$ – средняя теплоемкость тары в интервале температур от 0° до $t_{\text{тар},K}$, кДж/(кг·град)

$$t_{\text{тар},K} = t_{M,K}$$

$t_{\text{тар.к}}, t_{\text{тар.н}}$ – соответственно конечная и начальная температуры тары, °С.

Статья 3. Тепло, теряемое уходящими продуктами сгорания (дымом)

$$Q_{\text{дыма}} = 0,278 \cdot B \cdot V_{\text{д}} \cdot C_{\text{д}} \cdot t_{\text{д}}, \text{ Bm}$$

где $V_{\text{д}}$ – объем дымовых газов, получаемых при сжигании 1 м³ газа или жидкого (твердого топлива) при нормальных условиях с учетом избытка воздуха, м³/кг или м³/м³) из расчета горения топлива;

$C_{\text{д}}$ – средняя теплоемкость дымовых газов при температуре $t_{\text{д}}$ кДж/(м³·град),
 $t_{\text{д}}$ – температура отходящего дыма, °С. Может быть принята: для камерных печей - $t_{\text{д}} = t_{\text{м.к.}} + (50 \div 100)$, для методических - $t_{\text{д}} = t_{\text{м.к.}} + (100 \div 300)$.

Статья 4. Потеря тепла от химической неполноты сгорания топлива.

При беспламенном сжигании топлива потери тепла вследствие химической неполноты сгорания топлива отсутствуют. При пламенном сжигании в дымовых газах обычно содержится 0,5-3 % несгоревших газов. Если принять, что на 1 % СО приходится 0,5 % Н₂, то теплота сгорания такой смеси при нормальных условиях составляет 12142 кДж/м³. Если в уходящих продуктах сгорания долю несгоревшего газа СО принять равной $P_{\text{со}}$, то потеря тепла составит

$$Q_{\text{хим}} = 0,278 \cdot B \cdot V_{\text{д}} \cdot P_{\text{со}} 12142, \text{ Bm}$$

где $V_{\text{д}}$ - количество уходящего дыма м³/м³ или м³/кг. Для хорошо работающих печей $P_{\text{со}}$ можно принять 0,005 – 0,015.

Статья 5. Потери тепла от механической неполноты сгорания топлива. Под механической неполнотой сгорания понимают различные потери топлива, введенного в печь, но не принимающие участия в горении. Эти потери могут быть определены так

$$Q_{\text{мех}} = A \cdot 0,278 \cdot B \cdot Q_{\text{н}}^{\text{п}}, \text{ Bm}$$

Где A – величина тепловых потерь от механической неполноты сгорания. Так при сжигании:

1. Твердого топлива $A = 0,03 \div 0,05$;
2. Газообразного топлива $A = 0,02 \div 0,05$;
3. Жидкого топлива $A = 0,01$.

Для газообразного и жидкого топлива эта величина незначительна и может не учитываться. Для твердого топлива она достигает 2-5% от $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$. Поскольку современные термические печи, как правило, на твердом топливе не работают, то статья 5 из теплового баланса выпадает.

Статья 6. Тепло, теряемое в результате теплопроводности через кладку. Если известна наружная температура кладки, то потеря тепла путем теплопроводности через свод и стены определяется:

$$Q_{\text{кл}} = \alpha_{\Sigma}'' \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{в}}) \cdot F_{\text{н}}, \text{ Bm}$$

где α_{Σ}'' - суммарный коэффициент конвективной теплопроводности от наружной стенки к окружающему воздуху, Вт/м²град. Например, при $t_{\text{ст}}=90^{\circ}\text{C}$, $\alpha_{\Sigma}''=14,0$, Вт/м²град для вертикальной стенки: 16,0 – для свода и 11,4 – для пода.

Форма представления результата:

Расчеты выполнить и оформить в тетради для практических работ.

Критерии оценки:

Процент положительных оценок	Оценка	
	балл (отметка)	вербальный аналог
90 - 100	5	отлично
80 - 89	4	хорошо
70 - 79	3	удовлетворительно
менее 70	2	не удовлетворительно