

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»
Высшая школа технологии и энергетики
Кафедра промышленной теплоэнергетики**

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УСТАНОВОК

Выполнение контрольных работ

Методические указания для студентов заочной формы обучения
по направлению подготовки
13.04.01 — Теплоэнергетика и теплотехника

Составитель
Е. Н. Громова

Санкт-Петербург
2023

Утверждено
на заседании кафедры ПТЭ
01.09.2023 г., протокол № 1

Рецензент О. В. Федорова

Методические указания соответствуют программам и учебным планам дисциплины «Проектирование и эксплуатация высокотемпературных установок» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника». В указаниях представлен порядок выполнения и оформления контрольных работ. Приведены исходные данные для выполнения работ по вариантам, методики расчетов и справочная информация.

Методические указания предназначены для магистров заочной формы обучения.

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД в качестве
методических указаний

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю.
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 19.09.2023 г. Рег.№ 5242/23

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 1. РАСЧЕТ КАМЕРНОЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ	5
КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 2. МАТЕРИАЛЬНЫЙ И ТЕПЛОВОЙ БАЛАНСЫ ИЗВЕСТЕРЕГЕНЕРАЦИОННОЙ ПЕЧИ	12
КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 3. МАТЕРИАЛЬНЫЙ И ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ГАЗОГЕНЕРАТОРА.....	18
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	22
ПРИЛОЖЕНИЯ	23

ВВЕДЕНИЕ

Цель дисциплины: приобретение навыков проектирования и эксплуатации печных установок, теплотехнологических аппаратов целлюлозно-бумажной промышленности, другого высокотемпературного оборудования, а также разработки способов экономии топливно-энергетических ресурсов в высокотемпературных технологических процессах и определять возможные пути модернизации высокотемпературных установок.

В результате изучения дисциплины обучающийся должен:

Знать: конструктивные и тепловые схемы и элементы высокотемпературных теплотехнологических установок; типовые методики расчета высокотемпературных установок промышленных предприятий; особенности эксплуатации и показатели работы высокотемпературных установок, применяемых в промышленности; пути повышения эффективности использования топлива, регенерации тепловых отходов и использования вторичных энергоресурсов в высокотемпературных теплотехнологических установках.

Уметь: составлять материальные, тепловые балансы технологических процессов; выполнять конструктивные и поверочные расчеты высокотемпературных установок; осуществлять сбор, обработку и систематизацию технологической информации по высокотемпературным теплотехнологическим установкам; анализировать параметры работы высокотемпературных установок; осуществлять контроль и анализ режимов работы высокотемпературных установок.

Владеть: навыками разработки мероприятий по повышению энергетической эффективности работы высокотемпературных установок различного назначения; методологией типовых расчетов высокотемпературных установок промышленных предприятий.

Контрольные работы выполняются по мере изучения теоретического материала. Задания для контрольных работ и методики расчетов представлены в настоящих методических указаниях. Необходимая для расчетов справочная информация находится в Приложениях. Исходные данные для выполнения контрольных работ приводятся в соответствующих таблицах. Номер варианта выбирается по последней цифре номера зачетной книжки (индивидуального шифра) студента. Работы, выполненные не по установленному варианту, рассматриваться не будут, они возвращаются студенту без проверки. Размерности исходных данных и вычисленных величин обязательно приводятся в соответствии с международной системой единиц измерения СИ.

Контрольные работы оформляются в рукописном или в печатном виде, на титульном листе обязательно указываются: ФИО студента, шифр, кафедра, наименование изучаемой дисциплины и номер варианта контрольного задания (см. приложение 8).

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 1. РАСЧЕТ КАМЕРНОЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

Требуется рассчитать камерную печь для нагрева заготовок из углеродистой стали (топливо для печи мазут). Нагрев заготовок производится при постоянной температуре печи партиями – садками, предусматривая регенерацию теплоты отходящих газов за счет подогрева воздуха, идущего на горение топлива. Исходные данные выбираются из таблицы.

Расчет горения топлива

Для расчета горения должны быть известны вид и химический состав топлива (приложение 1), способ его сжигания и тип печи. Должны быть также известны или приняты температуры топлива и воздуха, поступающего на горение. Целью расчета горения является определение расхода воздуха и выход продуктов горения при сжигании 1 кг мазута, процентного содержания компонентов в продуктах горения, температуры горения и плотности дымовых газов. Расчет горения топлива ведется по следующим формулам:

- теплота сгорания топлива:

$$Q_H^p = 339C^p + 1256H^p - 109(O^p - S^p) - 25(W^p + 9H^p);$$

- теоретически необходимое количество воздуха:

$$L_0 = 0,0476[1,867C^p + 5,6H^p + 0,7(O^p - S^p)];$$

- действительное количество воздуха:

$$L_\alpha = \alpha L_0(1 + 1,24x_B);$$

- количество продуктов полного горения топлива:

$$V_{CO_2} = 0,01 \cdot 1,867C^p,$$

$$V_{H_2O} = 0,01 \cdot (11,2H^p + 1,24W^p) + 1,24(W_\phi + x_B \alpha L_0),$$

$$V_{SO_2} = 0,01 \cdot 0,7S^p,$$

$$V_{O_2} = 0,21(\alpha - 1)L_0,$$

$$V_{N_2} = 0,01 \cdot 0,8N^p + 0,79\alpha L_0,$$

$$V_\alpha = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_{O_2} + V_{N_2};$$

- процентное содержание компонентов в дымовых газах:

$$CO_2 = \left(\frac{V_{CO_2}}{V_\alpha}\right) \cdot 100, H_2O = \left(\frac{V_{H_2O}}{V_\alpha}\right) \cdot 100,$$

$$SO_2 = \left(\frac{V_{SO_2}}{V_\alpha}\right) \cdot 100, O_2 = \left(\frac{V_{O_2}}{V_\alpha}\right) \cdot 100,$$

$$N_2 = \left(\frac{V_{N_2}}{V_\alpha}\right) \cdot 100,$$

- теоретическая температура горения топлива:

$$t_{\text{теор}} = \frac{Q_H^p + L_\alpha c_B t_B + c_T t_T}{V_\alpha c_\Gamma};$$

- действительная температура горения:

$$t_d = \eta_{\text{пир}} t_{\text{теор}};$$

- плотность продуктов горения:

$$\rho_\Gamma = \frac{44CO_2 + 18H_2O + 64SO_2 + 32O_2 + 28N_2}{22,4 \cdot 100}.$$

Здесь: C^p, H^p, O^p, S^p, W^p – процентное содержание в топливе (по массе) углерода, водорода, кислорода, серы и влаги;

x_B – влагосодержание сухого воздуха (кг/м³);

α – коэффициент избытка воздуха ($\alpha \cong 1,10$);

V_{CO_2}, V_{H_2O} – объем компонентов в продуктах горения;

V_α – полный объем продуктов горения;

$CO_2, H_2O, SO_2, O_2, N_2$ – процентное содержание компонентов в продуктах горения;

t_T – температура топлива (для мазута обычно $t_T \cong 100^\circ\text{C}$);

c_T – средняя удельная теплоемкость топлива при температуре $t_T \cong 100^\circ\text{C}$, $c_T \cong 2,1$ кДж/(кг · К);

c_B, c_Γ – средние удельные теплоемкости воздуха и продуктов горения, кДж/(м³·К) (приложение 2);

$\eta_{\text{пир}}$ – пирометрический коэффициент ($\eta_{\text{пир}} \approx 0,70$).

Расчет внешнего теплообмена

Поскольку температура печи выше 1000 °С, то основным видом внешнего теплообмена в рабочем пространстве печи будет радиационный. Задачей его расчета является нахождение приведенного коэффициента излучения системы газ – кладка – металл для возможных значений температуры газа (продуктов горения топлива) в рабочем пространстве печи, а также нахождение приведенного коэффициента излучения системы печь – металл.

Степень черного газа может находиться либо с помощью графиков, приведенных в литератур, либо по формулам:

$$\varepsilon_\Gamma = K_{\text{саж}} [1 - \exp(-k_\lambda p S_{\text{эф}})],$$

где $K_{\text{саж}}$ – коэффициент, учитывающий увеличение излучательной способности факела за счет сажистых частиц, $K_{\text{саж}}=1,4-1,5$;

k_λ – спектральный коэффициент ослабления, отнесенный к суммарному излучению углекислоты и водяного пара, м⁻¹;

p – суммарное парциальное давление излучающих газов, доли единицы ($p = p_{CO_2} + p_{H_2O}$);

$S_{\text{эф}}$ – эффективная толщина излучающего слоя газов, м.

Спектральный коэффициент ослабления излучения определяется по формуле Гурвича А. М.:

$$k_{\lambda} = \frac{(0,8+1,6p_{H_2O})(1-0,00038T)}{(pS_{\text{эф}})^{0,5}},$$

где p_{H_2O} – парциальное давление водяных паров;

T – температура газа, К.

Эффективная толщина излучающего слоя газов находится:

$$S_{\text{эф}} = \frac{4V_{\Gamma}}{F_{\text{кл}} + F_{\text{м}}},$$

где V_{Γ} – объем излучающего газа, м³;

$F_{\text{кл}}$ и $F_{\text{м}}$ – площадь поверхности кладки и металла, ограничивающих газовый объем, м².

Так как температура газа может превышать температуру печи примерно на 100–150 °С (в начальный момент нагрева), то степень черноты газа рекомендуется определять для трех-четырех значений температур, охватывающих возможный диапазон изменения температуры газа. Например, если температура печи 1200 °С, то степень черноты газа рекомендуется определять при температурах 1200, 1300 и 1400 °С. Приведенный коэффициент излучения газ – кладка – металл определяется для этих же значений температур газа (при $\varphi_{\text{мм}} \neq 0$ и $\varphi_{\text{кк}} \neq 0$):

$$C_{\Gamma \text{ км}} = C_0 \frac{\varepsilon_{\Gamma} \varepsilon_{\text{м}}}{\varepsilon_{\Gamma} + \varphi_{\text{км}} \varepsilon_{\text{м}} (1 - \varepsilon_{\Gamma})},$$

где $\varphi_{\text{км}} = F_{\text{м}}/F_{\text{к}}$.

Приведенный коэффициент излучения системы печь – металл

$$C_{\text{печ}} = C_0 \frac{\varepsilon_{\text{м}} \varphi_{\text{МК}}}{1 - \varphi_{\text{мм}} (1 - \varepsilon_{\text{м}})},$$

где $\varphi_{\text{МК}} = F_{\text{к}}/(F_{\text{м}} + F_{\text{к}})$; $\varphi_{\text{мм}} = F_{\text{м}}/(F_{\text{м}} + F_{\text{к}})$.

Здесь: C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $C_0 = 5,75$ Вт/(м² · К⁴);

$\varphi_{\text{мм}}$, $\varphi_{\text{кк}}$, $\varphi_{\text{МК}}$, $\varphi_{\text{км}}$ – угловые коэффициенты металла на металл, кладки на кладку и т. д.;

$\varepsilon_{\text{м}}$ – степень черноты поверхности металла, $\varepsilon_{\text{м}} \approx 0,8$.

Расчет нагрева металла

Целью расчета нагрева металла является определение следующих параметров: времени нагрева, изменения температуры поверхности и центра заготовки, разности температур между поверхностью и центром заготовки, температуры газов и теплового потока на поверхности заготовки.

Рассмотрим расчет нагрева металла по методу тепловой диаграммы. Весь диапазон температур нагрева рекомендуется разбивать на несколько интервалов.

Обычно принимают три интервала. Границу интервалов температур определяют, исходя из возможности получения близких значений времени нагрева для этих интервалов. По окончании расчетов строятся температурная и тепловая диаграммы нагрева металла.

На температурной диаграмме указывается изменение за время нагрева температуры газа, печи, поверхности и середины (центра) заготовки. На тепловой диаграмме дается изменение удельного теплового потока на поверхности заготовки во времени.

Рекомендуется последовательность расчета нагрева металла приведена ниже.

Тепловой поток в начале интервала:

$$q^{HI} = C_{\text{печ}} \left[\left(\frac{T_{\text{печ}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{п}}^{HI}}{100} \right)^4 \right]$$

Тепловой поток в конце интервала:

$$q^{KI} = C_{\text{печ}} \left[\left(\frac{T_{\text{печ}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{п}}^{KI}}{100} \right)^4 \right]$$

Средний тепловой поток в интервале:

$$q^{-I} = \frac{q^{HI} - q^{KI}}{\ln \left(\frac{q^{HI}}{q^{KI}} \right)}$$

Ориентировочное значение разности температур между поверхностью и центром заготовки в конце интервала:

$$\Delta t^{KI*} = \frac{q^{KI} R}{k_2 \lambda_{\text{п}}^{KI}}$$

Ориентировочное значение разности температур между поверхностью и центром заготовки в конце интервала:

$$t_{\text{ц}}^{KI*} = t_{\text{п}}^{KI} - \Delta t^{KI*}$$

Уточнение значений:

- коэффициента теплопроводности металла:

$$\bar{\lambda}^{KI} = \frac{(\lambda_{\text{п}}^{KI} + \lambda_{\text{ц}}^{KI})}{2};$$

- разности температур по сечению заготовки:

$$\Delta t^{KI} = \frac{q^{KI} R}{k_2 \bar{\lambda}^{KI}};$$

- температуры центра заготовки:

$$\bar{t}_{\text{ц}}^{KI} = t_{\text{п}}^{KI} - \Delta t^{KI};$$

- средней температуры металла по массе в интервале:

$$\bar{t}^{KI} = t_{\text{ц}}^{KI} + (\Delta t^{KI}/k_3).$$

Коэффициент:

$$k_3 = \frac{(k_1 + 2)}{k_1}.$$

Приращение энтальпии заготовки за интервал:

$$\Delta h^I = h^{KI} - h^{HI}.$$

Время нагрева первого интервала:

$$\tau^I = \frac{\Delta h^I \rho_M R}{k_1 \bar{q}^I}.$$

Температура газа в начале интервала:

$$t_{\text{г}}^{HI} = 100 \left[\left(\frac{q^{HI}}{c_{\text{г}}^{HI}} \right) + \left(\frac{T_{\text{п}}^{HI}}{100} \right)^4 \right]^{0,25} - 273.$$

Температура газа в конце интервала:

$$t_{\text{г}}^{KI} = 100 \left[\left(\frac{q^{KI}}{c_{\text{г}}^{KI}} \right) + \left(\frac{T_{\text{п}}^{KI}}{100} \right)^4 \right]^{0,25} - 273.$$

Приведем порядок расчета начального участка нагрева.

Инерционное время $\tau' = \frac{R^2}{ka^{HI}}$.

Коэффициент $k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$.

Коэффициент теплоотдачи в начале интервала $\alpha^{HI} = \frac{q^{HI}}{(t_{\text{печ}} - t_{\text{п}}^{HI})}$.

Число Био $Bi' = \frac{\alpha^{HI} R}{\lambda^{HI}}$.

Число Фурье $Fo' = \frac{a^{HI} \tau'}{R^2}$.

Относительная разность температур поверхности и центра цилиндрической заготовки в конце начального участка нагрева может быть определена при $Fo=0,125$ из приложения 3.

Температура поверхности заготовки:

$$t'_{\text{п}} = t_{\text{печ}} - \theta'_{\text{п}}(t_{\text{печ}} - \bar{t}^{HI}).$$

Температура центра заготовки в конце начального участка нагрева:

$$t'_{\text{ц}} = t_{\text{печ}} - \theta'_{\text{ц}}(t_{\text{печ}} - \bar{t}^{HI}).$$

Разность температур между поверхностью и центром заготовки:

$$\Delta t' = t'_{\text{п}} - t'_{\text{ц}}.$$

Расчет 2-го интервала проводится аналогично, но расчета начального участка нагрева для него выполнять не нужно, так как при $\tau > \tau'$ наступает область регулярного режима нагрева.

Полное время нагрева заготовки:

$$\tau = \tau^I + \tau^{II} + \tau^{III}.$$

Здесь приняты обозначения:

R – радиус заготовки, м;

k_1 – коэффициент формы тела (для цилиндра $k_1 = 2$);

k_2 – коэффициент усреднения теплового потока по толщине тела;

k_3 – коэффициент усреднения температуры по толщине заготовки;

$T_{\text{печ}}, T_{\text{п}}^{\text{HI}}, T_{\text{п}}^{\text{KI}}$ – температура печи, поверхности заготовки в начале и конце первого интервала, К;

$t_{\text{печ}}, t_{\text{п}}^{\text{KI}}, t_{\text{ц}}^{\text{KI}}, \bar{t}^{\text{KI}}, \bar{t}^{\text{HI}}, t_{\text{п}}^{\text{HI}}$ – температура печи, поверхности заготовки в конце первого интервала, центра в конце первого интервала, средняя температура по сечению заготовки в конце первого интервала, средняя температура по сечению заготовки в начале первого интервала, поверхности в начале первого интервала, °С;

$\lambda_{\text{п}}^{\text{KI}}, \lambda_{\text{ц}}^{\text{KI}}, \bar{\lambda}^{\text{KI}}$ – коэффициент теплопроводности материала заготовки (приложение 4) соответственно при температурах $t_{\text{п}}^{\text{KI}}, t_{\text{ц}}^{\text{KI}}, \bar{t}^{\text{KI}}, h^{\text{HI}}, h^{\text{KI}}$ – энтальпия материала заготовки при температурах \bar{t}^{HI} и \bar{t}^{KI} ;

$\rho_{\text{м}}$ – плотность материала заготовки (см. приложение 4);

$c_{\text{Г КМ}}^{\text{HI}}, c_{\text{Г КМ}}^{\text{KI}}$ – приведенный коэффициент излучения «газ – кладка – металл» при температуре соответственно $t_{\text{Г}}^{\text{HI}}$ и $t_{\text{Г}}^{\text{KI}}$; a^{HI} – коэффициент температуропроводности материала заготовки в начале первого интервала, м²/с (см. приложение 4).

Исходные данные для контрольной работы № 1

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Размеры заготовок, м:										
- диаметр	0,50	0,42	0,44	0,46	0,48	0,30	0,75	0,60	0,45	0,36
- длина	2,0	1,6	1,8	2,0	2,2	1,5	1,1	2,1	2,5	2,0
Количество заготовок в печи, шт.	5	3	3	4	2	8	5	4	3	2
Температуры заготовки, °С										
- начальная	20	10	16	20	20	18	18	25	22	21
- конечная (поверхности)	1210	1300	1218	1228	1250	1225	1238	1300	1300	1250
Температура печи, °С	1225	1310	1240	1230	1261	1280	1280	1325	1310	1275

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 2. МАТЕРИАЛЬНЫЙ И ТЕПЛОВОЙ БАЛАНСЫ ИЗВЕСТЕРЕГЕНЕРАЦИОННОЙ ПЕЧИ

Рассчитать процесс горения топлива, составить материальный и тепловой балансы известерегенерационной печи, определить ее геометрические размеры.

Начертить технологическую схему известерегенерационной печной установки.

Процесс обжига известкового шлама производится в известерегенерационной вращающейся печи, в которую подается исходный материал и продукты сгорания по схеме противотока. Отработавшие в печной установке дымовые газы через циклон удаляются в атмосферу, обожженная известь из печи поступает в холодильник, где отдает часть своей теплоты на нагрев дутьевого воздуха.

Обозначения, принятые в тепловом расчете известерегенерационной печи:

G_u – производительность печи по обожженной извести, т/ч;

$W_{ш}$ – влажность шлама при поступлении в печь, %;

$t_{ш}$ – температура шлама на входе в печь, °С;

t_{ou}, t'_{ou} – соответственно температура извести на выходе из печи и из холодильника, °С;

$a_{пл}$ – потери извести при прокаливании, %;

y – потери извести в результате уноса, %;

η_n – пирометрический коэффициент, $\eta_n = 0,8$;

t_r^{max} – максимальная температура газов при обжиге, °С;

t_m – температура мазута, °С;

$t_b, t_{yx,г}$ – соответственно температура воздуха и уходящих газов, °С;

ρ_b, ρ_r – соответственно плотность воздуха и газа, кг/м³;

L_b – массовый расход воздуха, кг/ч;

V^o_r – теоретический объем продуктов сгорания, м³/кг;

$i_b, i_{RO_2}, i_{N_2}, i_{H_2O}$ – соответственно энтальпии воздуха, трехатомных газов, азота и водяных паров, кДж/кг;

$C_b, C_{RO_2}, C_{N_2}, C_{H_2O}$ – соответственно объемные теплоемкости воздуха, трехатомных газов, азота и водяных паров, кДж/м³°С;

$I_{bx}, I_{вых}$ – соответственно энтальпия холодного и нагретого воздуха, кДж/кг°С;

φ_{oc} – коэффициент использования теплоты, $\varphi_{oc} = 0,95 - 0,98$;

$C_w, C_{п}$ – соответственно теплоемкость воды и пара, кДж/кг°С;

C_m – удельная теплоемкость мазута, кДж/кг°С;

u – начальное влагосодержание шлама, кг/кг;

$C_{с.с.}, C_{ou}$ – соответственно удельная теплоемкость сухого сырья и обожженной извести, кДж/кг;

g – разность энтальпий пара и влаги, кДж/кг;

$q_{дг}^l$ – удельный расход теплоты на дегидратацию глинистых веществ и перегрев пара до $t_{ух.г}$, отнесенный к одному кг Al_2O_3 , $q_{дг}^l = 2000$ кДж/кг;

$q_{дк}^l$ – удельный расход теплоты на разложение карбонатов, $q_{дк}^l = 3150$ кДж/кг;

α – коэффициент теплоотдачи от стенки печи к окружающему воздуху, Вт/м²°С;

H – боковая поверхность печи, м²;

$\Delta t = t_{ст} \bar{t}_в$ – разность температур между стенкой печи и воздухом, °С;

σ_o – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $\sigma_o = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²К.

Расчет процесса горения

Топливо – мазут марки М100, сернистый. Рабочая масса топлива (см. приложение 1): C^P ; H^P ; $S^P_{ор+k}$; $N^P + O^P$; A^P ; W^P , %

1. Теплота сгорания мазута:

$$Q_H^P = 339 \cdot C^P + 1030 \cdot H^P - 109 \cdot (O^P - S^P_{ор+k}) - 25,1 \cdot W^P, \text{ кДж/кг.}$$

2. Теоретический расход воздуха:

$$V_B^o = 0,0889 \cdot (C^P + 0,375 \cdot S^P_{ор+k}) + 0,265 \cdot H^P - 0,0333 \cdot O^P, \text{ м}^3/\text{кг.}$$

3. Теоретический объем продуктов сгорания:

$$V_T^o = V_{RO_2}^o + V_{N_2}^o + V_{H_2O}^o, \text{ м}^3/\text{кг},$$

где

- теоретический объем сухих трехатомных газов:

$$V_{RO}^o = V_{CO_2}^o + V_{SO_2}^o = 0,01866 \cdot (C^P + 0,375 \cdot S^P_{ор+k}), \text{ м}^3/\text{кг},$$

- теоретический объем азота:

$$V_{N_2}^o = 0,79 \cdot V_B^o = 0,8 \frac{N_2^P}{100}, \text{ м}^3/\text{кг},$$

- теоретический объем водяных паров:

$$V_{H_2O}^o = 0,111 \cdot H^P + 0,0124 \cdot W^H + 0,0161 \cdot V_B^o, \text{ м}^3/\text{кг}.$$

4. Адиабатическая температура горения мазута:

$$t_a = \frac{t_2^{\max}}{\eta_n}, \text{ } ^\circ\text{C}, \text{ где } \eta_n = 0,8.$$

5. Энтальпия при адиабатической температуре горения:

- воздуха: $I_B^o = i_B \cdot V_B^o = C_B \cdot t_a \cdot V_B^o$, кДж/кг;

- продуктов сгорания топлива:

$$I_{г.г}^0 = i_{RO_2} \cdot V_{RO_2}^0 + i_{N_2} \cdot V_{N_2}^0 + i_{H_2O} \cdot V_{H_2O}^0 \text{ кДж/кг.}$$

6. Теплоемкость извести определяется по уравнению:

$$C_u = \frac{4,16}{56} \cdot (11,86 + 1,08 \cdot 10^{-3} \cdot T_u - 1,66 \cdot 10^{-5} \cdot T_u^{-2}), \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C.}$$

7. Количество теплоты, вносимой нагретым воздухом, при охлаждении извести в холодильнике от t_{ou} до t_{ou}^l , определяется по балансу тепла в нем:

$$q_B = L_B \cdot (I_{ввых} - I_{вх}) = C_u \cdot (t_{ou} - t_{ou}^l) \cdot \varphi_{ou}, \text{ кДж/кг.изв.}$$

8. Предварительно задаются удельным расходом топлива:

$$\beta = (0,18 - 0,23), \text{ кг.т/кг.изв.}$$

и определяют теплоту нагрева воздуха:

$$\alpha \cdot I_B^0 = \frac{q_B}{\beta}, \text{ кДж/кг.топл.}$$

9. Удельная теплоемкость мазута:

$$C_M = 4,19 \cdot (0,415 + 0,0006 \cdot t_M), \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C.}$$

10. Тепловой баланс печи и определение коэффициента избытка воздуха:

$$(1 - a_m) \cdot Q_H^P + C_M \cdot t_M + \alpha \cdot I_B^0 = I_{гг}^0 + (\alpha - 1) \cdot I_{вг}^0.$$

11. Действительный объем продуктов сгорания при расчетном значении коэффициента избытка воздуха α :

$$V_r = V_r^0 + (\alpha - 1) \cdot V_B^0, \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Материальный баланс печи

Приходные и расходные статьи материального баланса печи рассчитываются на $g_{ou} = 1$ кг обожженной извести. При составлении материального баланса учитывают потери пылевидного материала, уносимого дымовыми газами, процент уноса летучих продуктов разложения извести, внешнюю и гидратную влагу.

На рис. 1 показана схема приходных и расходных статей известерегенерационной печи.



Рис. 1. Схема потоков материала в известерегенерационной печи

Приходная часть материального баланса

1. Расход сухого сырья:

$$G_{с.с} = 1,0 \cdot \frac{100}{100-a_{ш}} \cdot \frac{100}{100-y}, \frac{\text{кг сух.сырья}}{\text{кг.об.изв.}}$$

2. Количество влаги, содержащейся в шламе:

$$M_{вл} = G_{с.с} \cdot U = G_{с.с} \cdot \frac{W_{ш}}{100-W_{ш}}, \text{ кг/кг.}$$

3. Удельный расход топлива на 1 кг обожженной извести:

V кг/кг

4. Расход воздуха на горение топлива при \bar{t}_B :

$$L_B = \alpha \cdot V_B^0 \cdot \rho_B \cdot V, \text{ кг/кг.}$$

Расходная часть материального баланса

1. Обожженная известь – 1 кг.

2. Продукты разложения известняка:

$$G_{пр} = G_{с.с} \cdot \left(1 - \frac{y}{100}\right) \cdot \frac{a_{ш}}{100}, \text{ кг/кг.}$$

3. Количество сырья, уносимого с дымовыми газами:

$$G_{yh} = G_{с.с} \left(\frac{y}{100}\right), \text{ кг/кг.}$$

4. Количество влаги, удаляемой из печи с дымовыми газами:

$$M_{вл} = G_{с.с} \frac{W_{ш}}{100-W_{ш}}, \text{ кг/кг.}$$

5. Расход дымовых газов при $t_{ух.г.}$:

$$G_{г} = V_{г} \cdot \rho_{г} \cdot V, \text{ кг/кг.}$$

Тепловой баланс печи

Тепловой баланс составляется на 1 кг обожженной извести.

Приход теплоты:

1. Химическая теплота топлива:

$$q_{x.m.} = Q_H^p \cdot V, \text{ кДж/кг.}$$

2. Физическая теплота топлива:

$$q_{ф.т.} = i_M \cdot V = C_M \cdot t_M \cdot V, \text{ кДж/кг.}$$

3. Теплота, вносимая воздухом, при нагреве его в холодильнике до $t_{г.в.}$:

$$q_B = \alpha \cdot I_B^0 \cdot V, \text{ кДж/кг.}$$

4. Теплота, вносимая с влажным шламом при $t_{ш}$ и $C_{с.с}$:

$$C_{с.с} = 1,05, \text{ кДж/кг}^\circ\text{С}$$

$$q_{ш} = G_{с.с} \cdot (C_{с.с} + C_w \cdot U) \cdot t_{ш}, \text{ кДж/кг.}$$

Расход теплоты

1. Потеря теплоты с уходящими из печи газами при $t_{ух.г}$ и $t_{г.в}$:

$$q_{ух.г} = [I_{ух.г}^o + (\alpha - 1) \cdot I_B^o] \cdot v = [i_{RO_2} V_{RO_2} + i_{N_2} V_{N_2} + i_{H_2O} V_{H_2O} + (\alpha - 1) \cdot i_B \cdot V_B^o] \cdot v, \text{ кДж/кг.}$$

2. Потеря теплоты от химического и механического недожога топлива:

$$q_H = a_H \cdot Q_H^P \cdot v, \text{ кДж/кг.}$$

3. Потеря теплоты с удаляемой из печи обожженной известью при $g_{ou} = \frac{1\text{кг}}{\text{кг}}$:

$$q_{ou} = g_{ou} \cdot C_{ou} \cdot t_{ou}, \text{ кДж/кг.}$$

4. Затраты теплоты на испарение внешней влаги и перегрева образующегося пара:

$$q_{вл} = M_{вл} \cdot r = M_{вл} \cdot (i_{п} - C_w \cdot t_{ш}) = M_{вл} \cdot (i_{н.п} + C_{п} \cdot t_{ух.г} - C_w \cdot t_{ш}), \text{ кДж/кг.}$$

5. Потеря теплоты с механическим уносом сырья

$$q_y = G_y \cdot C_{ou} \cdot t_{ух.г}, \text{ кДж/кг.}$$

6. Затраты теплоты на дегидратацию и перегрев пара при содержании $Al_2O_3 \approx 1,5\%$ [6]:

$$q_{gr} = q'_{g.r} \cdot \frac{Al_2O_3}{100} \cdot G_{с.с}, \text{ кДж/кг.}$$

7. Расход теплоты на разложение карбонатов:

$$q_{gk} = q'_{g.k} \cdot g_{ou} \cdot \frac{CaO+MgO}{100}, \text{ кДж/кг.}$$

8. Затраты теплоты на нагрев продуктов разложения известняка (CO_2):

$$q_{CO_2} = G_{п.р} \cdot C_{CO_2} \cdot t_{ух.г}, \text{ кДж/кг.}$$

9. Потеря теплоты в окружающую среду наружной поверхностью печи определяется формулой:

$$q_{oc} = \frac{3,6 \cdot \alpha \cdot H \cdot \Delta t}{G_u}, \text{ кДж/кг.}$$

Так как поверхность печи неизвестна, принимаем:

$$q_{oc} = 0,04 \cdot Q_H^P \cdot v, \text{ кДж/кг.}$$

10. Удельный расход топлива (v) определяем из теплового баланса печи:

$$q_{XJ} + q_{фТ} + q_{в} + q_{ш} = q_{ух.г} + q_H + q_{о.у} + q_{вл} + q_y + q_{g.r} + q_{g.k} + q_{CO_2} + q_{о.с.}$$

Невязка

$$\Delta = \frac{V^{\text{прин}} - V^{\text{расч}}}{V^{\text{прин}}} \cdot 100 \%$$

При невязке $\Delta > 5 \%$ произвести корректировку расчета. При этом необходимо принять новое значение (v) при расчете коэффициента избытка воздуха (α) и долю потери теплоты в окружающее пространство.

Исходные данные для контрольной работы № 2

Наименование величины	Обозначение	№ варианта									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Производительность печи по извести	$G_u, \text{Т/ч}$	12	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7
Температура извести после печи	$t_{ou}, ^\circ\text{C}$	750	1200	1150	1100	1000	900	950	800	850	800
Температура мазута	$t_m, ^\circ\text{C}$	100	110	115	120	110	100	120	130	120	110
Влажность шлама	$W_{ш}, \%$	58	40	42	44	46	48	50	52	54	56
Температура шлама	$t_{ш}, ^\circ\text{C}$	85	40	45	50	55	60	65	70	75	80
Недожог мазута	a_m	0,04	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,01	0,01	0,02	0,03
Потери извести при прокаливании	$a_{пп}, \%$	4	3	4	5	6	7	8	6	5	4
Потери извести в результате уноса	$y, \%$	5	1,5	2	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
Температура уходящих газов	$t_{ух.г}, ^\circ\text{C}$	200	210	220	200	210	220	200	210	220	215

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 3. МАТЕРИАЛЬНЫЙ И ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ГАЗОГЕНЕРАТОРА

При проектировании новых конструкций газогенератора состав газа принимают на основании опытных данных, а состав топлива – по паспортным данным месторождения или по результатам анализа.

Исходные данные, необходимые для расчета материального и теплового балансов, следующие:

- состав топлива;
- состав горючего газа;
- выход и состав смолы;
- содержание углерода в уносе пыли и шлаке;
- расход пара на газификацию (при использовании парового или паровоздушного дутья).

В процессе эксплуатации материальный и тепловой балансы составляются по данным измерительного контроля состава и температуры газа на выходе из газогенератора, количества и состава паров смолы и очаговых остатков (шлака).

Расчет материального баланса процесса газификации:

Выход генераторного газа определяется по балансу углерода:

$$V^{сг} = \frac{C^p - (C_{п}^p + C_{ш}^p + C_{см}^p)}{0,536 \cdot (CO_2 + CO + CH_4 + 2C_2H_4)}, \text{ м}^3/\text{кг},$$

где $C_{п}^p$, $C_{ш}^p$ – потери углерода с уносом пыли и шлаком, отнесенные к 1 кг рабочей массы топлива;

$C_{см}^p$ – переход углерода в смолу.

Количество углерода, выносимого с топливной пылью:

$$C_{п}^p = \alpha_c^п \cdot g_{уш} = 0,01(\text{исх. данные}), \frac{\text{кг}}{\text{кг}} \text{ рабочего топлива},$$

где $\alpha_c^п$, $g_{уш}$ – содержание углерода в пыли и масса уноса топливной пыли газом.

Содержание отдельных элементов в газе, отнесенное к 1 кг рабочего топлива:

- углерода: $C^{с.г.} = \frac{12}{22,4} \cdot (CO_2 + CO + CH_4 + 2C_2H_4) \cdot V^{с.г.}, \frac{\text{кг}}{\text{кг}};$

- водорода: $H_2 = \frac{2}{2,24} \cdot [2(CH_4 + C_2H_4)] \cdot V^{с.г.}, \frac{\text{кг}}{\text{кг}};$

- кислорода: $O_2 = \frac{32}{22,4} \cdot [CO_2 + 0,5CO] \cdot V^{с.г.}, \frac{\text{кг}}{\text{кг}};$

- азота: $N_2 = \frac{28}{22,4} \cdot N_2 \cdot V^{с.г.}, \frac{\text{кг}}{\text{кг}}.$

Потеря углерода со шлаком:

$$C_{\text{ш}}^{\text{p}} = \alpha_{\text{с}}^{\text{ш}} \cdot g_{\text{ш}}^{\text{p}} = 0,014.$$

Количество углерода, переходящего в смолу:

$$C_{\text{см}}^{\text{p}} = \alpha_{\text{с}}^{\text{см}} \cdot g_{\text{см}}^{\text{p}} = 0,08,$$

где $\alpha_{\text{с}}^{\text{см}}$, $g_{\text{см}}^{\text{p}}$ – содержание углерода в смоле и выход смолы, кг/кг.

Расход воздуха на газификацию определяется по балансу азота:

$$V_{\text{в}} = \frac{N_2^{\text{с.г.}} \cdot V^{\text{с.г.}} - 0,8 \cdot N_2^{\text{p}}}{0,79}, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Количество влаги, переходящей в газ, определяется по балансу водорода:

$$g_{\text{вл}}^{\text{p}} = g \cdot [H^{\text{p}} + 0,111(W^{\text{p}} + D_{\text{п}}) - 0,0899 \cdot (H^{\text{с.г.}} + 2 \cdot \text{СН}_4 + 2 \cdot \text{С}_2\text{H}_4) \cdot V^{\text{с.г.}} - H_{\text{см}}], \text{кг/кг},$$

где W^{p} , $D_{\text{п}}$ – содержание влаги в рабочей массе топлива и расход пара с дутьем, кг/кг.

Количество пирогенной влаги:

$$g_{\text{вл}}^{\text{пир}} = \frac{W^{\text{p}}}{100} - g_{\text{вл}}^{\text{г}}, \frac{\text{кг}}{\text{кг}}.$$

Расчет теплового баланса процесса газификации:

Приход тепла:

1. Химическое тепло топлива

$$Q_{\text{х.т}} = Q_{\text{в}}^{\text{p}}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

2. Физическое тепло топлива

$$Q_{\text{ф.т}} = C_{\text{в.т}} \cdot t_0,$$

где $C_{\text{в.т}} = C_{\text{с.т}} \left(1 - \frac{W^{\text{p}}}{100}\right) + C_{\text{w}} \frac{W^{\text{p}}}{100}$.

Вследствие малой величины и переменного знака физическое тепло топлива может не учитываться.

3. Физическое тепло паровоздушной (дутьевой) смеси:

$$Q_{\text{д}} = \rho_{\text{с.в}} \cdot V_{\text{в}} \cdot I_{\text{в}}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

где $\rho_{\text{с.в}}$ – плотность сухого воздуха;

$I_{\text{в}}$ – удельная энтальпия влажного воздуха.

Расход тепла:

1. Химическое тепло сухого газа

$$Q_{\text{г}} = Q_{\text{в}}^{\text{с.г.}} \cdot V^{\text{с.г.}}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Теплота сгорания сухого газа:

$$Q_{\text{в}}^{\text{с.г}} = [27,500 + [28H_2 + 400CH_4 + 640C_2H_4]], \text{ кДж/кг.}$$

2. Тепло уносимой пыли

а) химическое

$$Q_{\text{х.в}} = 34000 \cdot C_{\text{в}}^{\text{р}}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

б) физическое

$$Q_{\text{ф.п}} = g_{\text{ун}} \cdot C_{\text{п}} \cdot t_{\text{г}}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

3. Тепло шлака

а) химическое

$$Q_{\text{х.ш}} = 34000 \cdot C_{\text{ш}}^{\text{р}}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

б) физическое

$$Q_{\text{ф.ш}} = g_{\text{ш}} \cdot C_{\text{ш}} \cdot t_{\text{ш}}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Температура шлака принимается 600 °С.

4. Тепло смолы

б) химическое

$$Q_{\text{х}}^{\text{см}} = g_{\text{см}}^{\text{р}} \cdot (340C_{\text{см}} + 1030H_{\text{см}} - 1090O_{\text{см}}), \text{ кДж/кг};$$

Б) физическое

$$Q_{\text{ф}}^{\text{см}} = g_{\text{см}}^{\text{р}} \cdot C_{\text{см}} \cdot t_{\text{г}}, \text{ кДж/кг}.$$

5. Потери тепла в окружающую среду (2 – 3 %) от $Q_{\text{в}}^{\text{р}}$

$$Q_{\text{о.с}} = 0,02 \cdot Q_{\text{в}}^{\text{р}}, \text{ кДж/кг}.$$

6. Физическое тепло газа на выходе из газогенератора:

Физическое тепло влажного газа на выходе из газогенератора определяется по разности

$$Q_{\text{ф.г}} = \sum Q - Q_{1-6}, \text{ кДж/кг}$$

Физическое тепло газа частично тратится на испарение внешней и пирогенной влаги топлива. Остальная часть тепла расходуется на перегрев всей влаги и нагрев сухого газа.

Затрата тепла на испарение влаги (условно при 0 °С):

$$Q_{\text{исп}} = Q_{\text{ф.г}} \cdot (W^{\text{р}} + W^{\text{пир}}), \text{ кДж/кг}.$$

Теплота нагрева влажного газа:

$$Q_{\text{нг}} = Q_{\text{ф.г}} - Q_{\text{исп}}, \text{ кДж/кг}.$$

Приведенная теплоемкость влажного газа:

$$C_{\text{в.г}} = C_{\text{с.г}} + x \cdot C_{\text{п}} \cdot \rho^{\text{с.г}}, \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{°С}).$$

Температура влажного газа:

$$t_{\text{г}} = \frac{Q_{\text{нг}}}{C_{\text{в.г}} \cdot V_{\text{с.г}}}, \text{ °С}.$$

Химический КПД процесса газификации:

$$\eta_x = \frac{Q_B^{c.g} \cdot V^{c.g}}{Q_B^p} \cdot 100 \% .$$

Термический КПД:

$$\eta_t = \frac{Q_B^{c.g} + Q_{\phi}^{B.g} + Q_{cm}}{Q_B^p + Q_{\phi.z}} \cdot 100 \% .$$

Расход топлива на получение 1 м³ газа:

$$B = \frac{1}{V_{c.g}}, \frac{\text{кг}}{\text{с}} .$$

Исходные данные для контрольной работы № 3

Топливо: корьевые отходы

Состав топлива: W = 55 %, A = 1,6 %, S = 0,2 %, C = 22,7 %, H = 2,6 %, N = 0,3 %, O = 17,6 %,

Теплота сгорания топлива: Q_s^r = 8637,3 кДж/кг, Q_i^r = 7157,5 кДж/кг

Состав горючего газа: CO = 4,6 %, H₂ = 5,9 %, C_nH_m = 3,4 %, CO₂ = 12,9 %, N₂ = 40,2 %, H₂O = 33 %

Теплота сгорания сухого газа: Q_s^r = 4641,3 кДж/кг.

Другие необходимые исходные данные приведены в таблице.

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Температура дутьевого воздуха, t _B , °C	20	25	30	35	40	45	20	25	30	35
Влагосодержание воздуха, d _B , г/кг	40	50	60	45	55	65	45	55	50	40
Температура генераторного газа, t _г , °C	400	450	425	350	325	300	325	350	300	400
Потери углерода со шлаком, %	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1
Потери углерода с уносом, %	2,5	3,0	2,0	3,5	2,5	3,0	2,0	3,5	2,5	3,0

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Громова, Е. Н. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки. Ч. 1. [Текст]: учебное пособие / Е. Н. Громова; М-во науки и высшего образования РФ, С.-Петербург. гос. ун-т пром. технологий и дизайна, Высш. шк. технологии и энергетики. – Санкт-Петербург: ВШТЭ СПбГУПТД, 2020. – 88 с.
2. Громова, Е. Н. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки. Ч. 2 [Текст]: учеб. пособие / Е. Н. Громова; М-во науки и высшего образования РФ, С.-Петерб. гос. ун-т пром. технологий и дизайна, Высш. шк. технологии и энергетики. – Санкт-Петербург: ВШТЭ СПбГУПТД, 2021. – 62 с.
3. Громова, Е. Н. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки [Текст]: практикум / сост.: Е. Н. Громова; М-во науки и высшего образования РФ, С.-Петерб. гос. ун-т пром. технологий и дизайна, Высш. шк. технологии и энергетики. – Санкт-Петербург: ВШТЭ СПбГУПТД, 2023. – 55 с.
4. Бельский, А. П. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях [Текст]: учебное пособие / А. П. Бельский, В. Ю. Лакомкин, С. Н. Смородин. – 3-е изд., испр. – СПб., 2012. – 134 с.
5. Жучков, П. А. Расчет и проектирование высокотемпературных установок целлюлозно-бумажных предприятий [Текст]: учеб. пособие / П. А. Жучков. – Л.: ЛТА, 1979. – 103 с.
6. Шукин, А. А. Промышленные печи и газовое хозяйство заводов [Текст]: учебник для вузов / А. А. Шукин. – Изд. 2-е, перераб. – М.: Энергия, 1973. – 224 с.
7. Алешина, А. С. Газификация твердого топлива [Текст]: учеб. пособие / А. С. Алешина, В. В. Сергеев. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 199 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Примерный элементарный состав топочного мазута по массе

$C^p = 84 \%$; $H^p = 10,3 \%$; $O^p = 0,5 \%$; $N^p = 0,5 \%$; $S^p = 0,7 \%$; $W^p = 4 \%$.

Приложение 2

Физические свойства дымовых газов

$L_6 = 760$ мм. рт. ст. = $1,01 \cdot 10^5$ Па; $P_{CO_2} = 0,13$; $P_{H_2O} = 0,11$; $P_{N_2} = 0,76$

t, °C	ρ , кг /м ³	C_p , кДж /кг · °C	λ · 10 ² , Вт /м · °C	$a \cdot 10^6$, м ² / с	$\eta \cdot 10^6$, Па · с	$\nu \cdot 10^6$, м ² / с	Pr
0	1,295	1,042	2,28	16,9	15,8	12,20	0,72
100	0,950	1,068	3,13	30,8	20,4	21,54	0,69
200	0,748	1,097	4,01	48,9	24,5	32,80	0,67
300	0,617	1,122	4,84	69,9	28,2	45,81	0,65
400	0,525	1,151	5,70	94,3	31,7	60,38	0,64
500	0,457	1,185	6,56	121,1	34,8	76,30	0,63
600	0,405	1,214	7,42	150,9	37,9	93,61	0,62
700	0,363	1,239	8,27	183,8	40,7	112,1	0,61
800	0,330	1,264	9,15	219,7	43,4	131,8	0,60
900	0,301	1,290	10,00	258,0	45,9	152,5	0,59
1000	0,275	1,306	10,90	303,4	48,4	174,3	0,58
1100	0,257	1,323	11,75	345,5	50,7	197,1	0,57
1200	0,240	1,340	12,62	392,4	53,0	221,0	0,56

Приложение 3

Средние удельные теплоемкости, кДж/(м³·К), для воздуха и газов

t, °C	Воздух сухой	O ₂	N ₂	H ₂ O	CO ₂	SO ₂	ДЫМОВЫЕ газы*
0	1,298	1,306	1,294	1,495	1,599	1,733	1,359
200	1,306	1,336	1,298	1,524	1,788	1,888	1,381
400	1,327	1,377	1,315	1,566	1,930	2,018	1,415
600	1,357	1,415	1,340	1,616	2,043	2,114	1,448
800	1,382	1,449	1,365	1,666	2,098	2,181	1,472
1000	1,411	1,478	1,390	1,725	2,202	2,236	1,498
1200	1,432	1,503	1,415	1,775	2,265	2,278	1,523
1400	1,453	1,520	1,436	1,830	2,315	2,319	1,548
1600	1,478	1,537	1,453	1,876	2,374	2,361	1,573
1800	1,494	1,553	1,470	1,922	2,391	-	1,639
2000	1,507	1,570	1,482	1,964	2,424	-	1,657
2200	1,520	1,583	1,495	2,001	2,449	-	1,675
2400	1,532	1,595	1,507	2,035	2,470	-	1,690

*CO₂ – 13 %, H₂O – 11 %, N₂ – 76 %.

Приложение 4

Относительная разность температур поверхности цилиндрической заготовки при Fo = 0,125

Bi	0,5	0,7	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	6,0	7,0	10,0	20,0
θ _п	0,80	0,73	0,67	0,53	0,45	0,34	0,28	0,21	0,16	0,12	0,06

Относительная разность температур центра цилиндрической заготовки при Fo = 0,125

Bi	0,5	0,7	1,0	1,5	2,0	3,0	5,0	10,0	20,0
θ _ц	0,98	0,97	0,95	0,93	0,92	0,89	0,86	0,83	0,80

Приложение 5

Физические свойства малоуглеродистых сталей (сталь 20)

Параметры	Температура, °С						
	0	200	400	600	800	1000	1200
Коэффициент теплопроводности, Вт/мК	51,9	48,5	42,7	35,6	25,9	27,7	29,8
Средняя удельная теплоемкость в интервале температур 0...t °С, кДж/кг	0,470	0,502	0,540	0,590	0,703	0,695	0,687
Коэффициент температуропроводности, (м ² /с)·10 ⁶	14,4	12,2	9,2	6,4	3,9	5,6	6,1
Плотность, кг/м ³	7863	7803	7736	7359	7624	7548	7444

Приложение 6

Отдельные показатели работы печей целлюлозно-бумажных предприятий

№ п/п	Показатель работы печи	Обозначение	Размерность	Братский ЛПК-3 Архангельский ЦБК-1	Байкальский ЦЗ-2	Сыктывкарский ЛПК-2 ЦЗ Питкяранта Амурский ЦКК
1	Производительность по обожженной извести	G _п	кг/ч	10400	7000	6250
2	Диаметр печи	D _п	м	3,6	3,2	3,0
3	Длина печи	L _п	м	110	92	85
4	Длина цепной зоны	L _ц	м	41,8	20	30
5	Поверхность футеровки	F _ф	м ²	1243	810	694
6	Съем извести с поверхности футеровки	m _у	кг/м ² ч	8,36	8,62	9,0
7	Удельный расход теплоты	q _{о.у}		9600	9300	8450
8	Тепловое напряжение объема печи	q _к ·10 ⁻³		48	52	49

Приложение 7

Средняя объемная теплоемкость и плотность различных газов и воздуха

t, °C	Теплоемкость °C, кДж/м ³ °C				Плотность, кг/м ³	
	RO ₂	N ₂	H ₂ O	Воздух абс.с	Воздух	Дымовые газы
0	1,5998	1,2946	1,493	1,2971	1,293	1,295
100	1,7003	1,2958	1,502	1,3004	0,946	0,95
200	1,7873	1,2996	1,5223	1,3071	0,746	0,748
300	1,8627	1,3067	1,5424	1,3172	0,615	0,617
400	1,9297	1,3163	1,5654	1,3289	0,524	0,525
500	1,9887	1,3276	1,5897	1,3427	0,456	0,457
600	2,0411	1,3402	1,6148	1,3565	0,404	0,405
700	2,0884	1,3536	1,6412	1,3708	0,362	0,363
800	2,1311	1,3670	1,6680	1,3842	0,329	0,330
900	2,1692	1,3796	1,6957	1,3976	0,301	0,301
1000	2,2035	1,3917	1,7229	1,4097	0,277	0,275
1100	2,2349	1,4034	1,7501	1,4214	0,257	0,257
1200	2,2638	1,4143	1,7769	1,4327	0,239	0,240
1300	2,2898	1,4252	1,8028	1,4432		
1400	2,3136	1,4348	1,8280	1,4528		
1500	2,3354	1,4440	1,8527	1,4620		
1600	2,3555	1,4528	1,8761	1,4708		
1700	2,3743	1,4612	1,8996	1,4867		
1800	2,3915	1,4687	1,9213	1,4867		
1900	2,4076	1,4758	1,9423	1,4939		
2000	2,4221	1,4825	1,9629	1,5010		

Образец титульного листа контрольной работы

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА
ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ
ИНСТИТУТ ЗАОЧНОГО И ВЕЧЕРНЕГО ОБУЧЕНИЯ**

Направление _____ Группа _____ Шифр _____

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № _____

по _____

Студента _____ курса _____
(фамилия, имя, отчество)

Дата и номер регистрации работы _____