Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Институт металлургии, машиностроения и транспорта

Кафедра «ТЕХНОЛОГИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ»

Пояснительная записка

К курсовому проекту на тему:

«Тепловой расчёт и конструирование нагревательной печи»

Проект выполнил:

Студент гр.33314/1 (подпись)

Сидоров Н.А. (дата)

Руководитель:

 Коджаспиров В.Е. (подпись)

 (дата)

Санкт-Петербург

2016

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Тип и назначение печи: камерная, садочная.

Материал нагреваемых заготовок: сталь 40

Габариты заготовок: пластина 500х500 мм, *l* = 1000 мм.

Количество заготовок: 4

Режим нагрева металла: под ковку

Топливо: смесь природного и доменного газов.

Теплотворность топлива: = 23000 кДж/м3.

Влажность топлива: W = 25 г/м3.

Температура подогрева воздуха: tвоздуха = 175˚С.

Выполнить аэродинамический расчёт: дымового тракта.

# РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

В этой главе необходимо определить состав смеси топлива, теоретический и действительный объёмы воздуха, состав продуктов горения и их плотность.

По заданию печь отапливается смесью природного и доменного газов, поэтому расчеты ведутся на 1 м3 топлива. Составы используемых газов приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Состав природного и доменного газов (в процентах)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Газ | СО2 | СО | N2 | H2 | CH4 | C2H4 | O2 | H2S | Влажность, г/м3 |
| Природный | 0,3 | 0,6 | 3,0 | 2,0 | 93,0 | 0,4 | 0,5 | 0,2 | - |
| Доменный | 10 | 27,4 | 58,4 | 3,3 | 0,9 | - | - | - | 25 |

Все расчеты проводят по рабочей массе топлива. Чтобы перейти к рабочим значениям, значения табличные необходимо умножить на коэффициент *k*, учитывающий содержание влаги *W* в топливе в реальных условиях.

где *Н2О* – заданное содержание влаги в топливе, %; *(Н2О)Т* – содержание влаги в топливе по справочным данным, %; *W* – содержание водяных паров в топливе, г/м3.

Рабочий состав топлива определяем по формуле:

,

где *Гр* – содержание газа в рабочей массе, %; *Гс* – содержание газа в сухой массе, %. Данные расчета приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Рабочий состав природного и доменного газов (в процентах)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Газ | СО2Р | СОР | Н2Р | N2Р | CH4Р | C2H4Р | O2Р | H2SР | H2OР | Сумма |
| Природный газ | 0,3 | 0,6 | 2 | 3 | 93 | 0,4 | 0,5 | 0,2 | 0 | 100 |
| Доменный газ | 9,7 | 26,63 | 3,2 | 56,6 | 0,87 | - | - | - | 3 | 100 |

Вычислим теплоту сгорания каждого газа по формуле:

Определим состав смеси:

доля природного газа в смеси

доля доменного газа в смеси

 1-0,638=0,362

Вычислим рабочий состав смешанного газа по формуле и сведем полученные результаты в таблицу:

.

Таблица 1.3

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| СО2РСМ | СОРСМ | Н2РСМ | N2РСМ | СН4РСМ | С2Н4РСМ | О2РСМ | Н2SРСМ | Н2ОРСМ | Сумма |
| 3,71 | 10 | 2,43 | 22,44 | 59,62 | 0,26 | 0,32 | 0,13 | 1,09 | 100 |

Теоретически необходимый объем воздуха рассчитаем по формуле:

где – влагосодержание сухого воздуха, г/м3

Действительный объем воздуха, зависящий от вида топлива, необходимый для полного сжигания единицы топлива, определяем из соотношения:

где  – коэффициент избытка воздуха, принимаем

Рассчитаем количество продуктов сгорания:

Общее количество продуктов горения при полном сжигании единицы топлива:

Рассчитаем процентный состав продуктов горения и сведем полученные результаты в таблицу:

Таблица 1.4

Процентный состав продуктов горения рабочей смеси газов

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| СО2 | Н2О | N2 | O2 | SO2 | всего |
| 9,6 | 17,13 | 71,59 | 1,66 | 0,02 | 100 |

Вычислим плотность продуктов горения:

Итог:

* состав смеси топлива (см. таблицу 1.3);
* теоретический объем воздуха;
* действительный объем воздуха ;
* состав продуктов горения (см. таблицу 1.4);
* плотность продуктов сгорания .

# садка объемРАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕГО ТЕПЛООБМЕНА

Садка состоит из четырех пластин 500х500 мм и длиной *l* = 1000 мм

Рис.2.1. Схема размещения пластин в рабочем пространстве печи

Длина рабочего пространства L = 2,9 м.

Ширина рабочего пространства печи B = 2,05 м.

В камерных печах рабочее пространство перекрывают арочным сводом с центральным углом . Это значит, что *R=B*, а высота боковой стенки

Т.к. *R=B*, то *H=R=B*. Таким образом средняя высота печи:

Определим геометрические параметры излучения. Поверхность кладки:

Определяем излучающую поверхность металла:

где n – число пластин,

 a, b, с – размеры пластин.

Общий объем рабочего пространства печи:

Объем металла:

Определим эффективную длину луча:

Угловые коэффициенты:

Вычислим приведенный коэффициент *Спм* при степени черноты, окисленной стали, равной *εм = 0,8:*

Так как в продуктах сгорания содержится 9,6% *СО2* и 17,13% *H2O*, парциальное давление углекислого газа и паров воды равняется:

Определим степень черноты газов для ряда температур от 500˚С до 1500˚С с шагом 50˚:

Приведем расчет для температуры 1100оС.

Коэффициент ослабления:

Степень черноты газов:

Приведенный коэффициент излучения в системе газ-металл:

Приведенный коэффициент излучения в системе кладка-металл:

Результаты расчета сводим в таблицу 2.1:

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| t, ˚С | εг | Cгм | Cкм | Cпм |
| Вт/(м2К4)  |
| 500 | 0,3071 | 2,9080 | 5,3294 | 3,589 |
| 550 | 0,3002 | 2,8739 | 5,3369 |
| 600 | 0,2933 | 2,8387 | 5,3445 |
| 650 | 0,2862 | 2,8024 | 5,3522 |
| 700 | 0,2792 | 2,7648 | 5,3599 |
| 750 | 0,2720 | 2,7260 | 5,3677 |
| 800 | 0,2648 | 2,6859 | 5,3756 |
| 850 | 0,2575 | 2,6444 | 5,3835 |
| 900 | 0,2501 | 2,6013 | 5,3915 |
| 950 | 0,2427 | 2,5568 | 5,3996 |
| 1000 | 0,2352 | 2,5106 | 5,4077 |
| 1050 | 0,2276 | 2,4627 | 5,4160 |
| 1100 | 0,2200 | 2,4130 | 5,4243 |
| 1150 | 0,2122 | 2,3613 | 5,4326 |
| 1200 | 0,2044 | 2,3076 | 5,4411 |
| 1250 | 0,1965 | 2,2518 | 5,4496 |
| 1300 | 0,1885 | 2,1937 | 5,4582 |
| 1350 | 0,1805 | 2,1332 | 5,4669 |
| 1400 | 0,1724 | 2,0701 | 5,4757 |
| 1450 | 0,1642 | 2,0043 | 5,4845 |
| 1500 | 0,1559 | 1,9355 | 5,4934 |

**3. Расчет режима нагрева металла**

**3.1. Рабочие формулы и порядок выполнения расчета**

Принимаем следующий режим нагрева: первый период – нагрев при постоянной температуре печи (TПЧ = Const) до заданной конечной температуры поверхности заготовок; второй период – выравнивание температуры по сечению заготовки при постоянной температуре поверхности (TПОВ = Const) до заданного конечного перепада температур по сечению заготовки.

Аналитические методы расчета нагрева и охлаждения основываются на решении дифференциального уравнения теплопроводности (уравнение Фурье):

Для неограниченной пластины, когда тепловой поток становится одномерным, это уравнение запишем в форме:

Применительно к неограниченному цилиндру уравнение (22) в цилиндрических координатах будет иметь вид:

Чтобы получить однозначное решение уравнений (22) – (24), необходимо задаться краевыми условиями задачи, состоящими из начальных и граничных условий. Граничные условия первого рода задают распределение температуры поверхности тела как функции координат и времени. Второго рода – определяют тепловой поток на поверхность тела как функцию времени, третьего рода – задают характер изменения температуры, окружающей тело среды как функцию времени и закон теплообмена между поверхностью тела и этой средой.

Решение уравнения (23) при граничных условиях третьего рода (постоянная температура среды) имеет вид:

Здесь значения являются решениями характеристического уравнения:

Решение уравнения (24) при граничных условиях третьего рода имеет вид:

В этом уравнении функция Бесселя первого рода нулевого и первого порядков соответственно, а значения являются решениями характеристического уравнения:

 В формулах (25) и (27)

- относительная (безразмерная) избыточная температура; соответственно абсолютная температура печи, температура в рассмотренной точке тела и средняя температура тела, К; те же температуры, ; числа Фурье и Био:

При симметричном нагреве пластины толщиной δ =2S, вычисляя значения за определяющий размер тела принимают x = S, т. е. половину ее толщины.

В случае симметричного нагрева цилиндра за определяющий размер тела принимают x = R, т. е. равняется ее радиусу.

Анализ решений (25) и (27) показывает, что при для пластины и для цилиндра наступает регулярный тепловой режим, когда в этих решениях можно ограничиться только первым членом ряда. Погрешность вследствие отбрасывания всех членов ряда, кроме первого при этом составляет менее 1%. В этом случае решение (25) можно записать для поверхности пластины и для ее оси:

В области регулярного режима решение (27) для поверхности цилиндра имеет вид:

а для его оси:

в выражениях (34) и (35) принято:

;

Значения в зависимости от числа приведены в таблицах [1].

Коэффициенты для расчета нагрева пластины или цилиндра при промежуточных значениях числа можно определить из таблиц [1] методом интерполяции. В области нерегулярного режима нагрева нельзя ограничиться только первым членом ряда решений (25) и (27), и поэтому с целью упрощения расчетов эти решения при малых значениях числа обычно представляют в виде графиков для определения температур поверхности и центра пластины и цилиндра.

Выравнивание температур происходит при Tп = Const, т. е. при граничных условиях первого рода. Расчет выравнивания температур по сечению тела может быть произведен по следующим формулам:

для пластины

 (36)

для цилиндра

 (37)

В (36) и (37) обозначено разность температур по сечению тела в начале и конце периода выравнивания,.

Выражения (36) и (37) получают из решений уравнений (23) и (24) при граничных условиях первого рода. Если известны значения , то из (36 ) и (37) легко определить время выдержки, необходимое для выравнивания температур по сечению заготовки от . При задании режима нагрева металла важное значение имеет выбор температуры печи tПЧ = Const, при которой будет происходить первый период нагрева.

Также нужно учитывать, что при нагреве тел в них возникают тепловые напряжения, которые могут явиться одним из факторов, ограничивающих скорость нагрева.

Температурные напряжения в стали появляются в интервале 0 до 500. При более высоких температурах сталь приобретает достаточную пластичность, и эти напряжения никакой опасности не представляют. Мягкие стали обладают пластичностью во всем интервале температур нагрева, и поэтому скорость их нагрева не лимитируется. Зависимость температурных напряжений от деформации, возникающих при термическом расширении тел, имеет вид:

где коэффициент линейного расширения стали; модуль упругости; отношение Пуассона (для сталей ); средняя температура заготовки; температура в рассматриваемом сечении или элементе тела.

Подставив в (38) значения из решений уравнений (23) и (24) для регулярного режима нагрева при граничных условиях второго рода (qПОВ = Const), получим выражения, позволяющие оценить максимально допустимые перепады температур по сечению тела

∆tДОП = ∆TДОП = TП-TЦ;

В качестве прочностной характеристики при определении ∆tДОП принимают значение временного сопротивления стали разрыву .

При этих условиях получим для пластины:

Определив значение , можно рассчитать допустимые тепловые потоки на поверхность пластины:

Далее из формулы (14) можно определить допустимую температуру печи:

при которой перепады температур, возникающие по сечению тела в процессе его нагрева при условии , не превысят допустимых значений, рассчитанных согласно (40).

Выполним расчет нагрева металла под нормализацию в соответствии с заданием.

**3.2. Расчет режима нагрева металла под ковку**

Нагрев металла под обработку давлением происходит при следующих условиях:

* начальная температура металла 20;
* конечная температура поверхности слитков 1180;
* конечный перепад температур по сечению слитков 50

По формуле (40) определим допустимый перепад температур по сечению слитка.

Для стали 40 из [1] имеем:

σВ = 626,6 МН/м2

β = 10,72∙10-6 1/

E = 20,29∙104 МН/м2

По выражению (41) находим допустимый тепловой поток на поверхность металла. Так как температурные напряжения должны учитываться при нагреве стали от 20 до 500 , то сначала определим среднее значение коэффициента теплопроводности в этом интервале температур.

Ниже представлена таблица значений коэффициента теплопроводности стали ст 40 λ, Вт/(м⬝°С), при различной температуре.

**Таблица 5. Значения коэффициента теплопроводности стали 40 при различных температурах**

|  |  |
| --- | --- |
| Температура, | λ, Вт/(м⬝°С) |
| 20 | 52 |
| 100 | 51 |
| 200 | 48 |
| 300 | 46 |
| 400 | 42 |
| 500 | 38 |
| 600 | 34 |
| 700 | 30 |
| 800 | 25 |
| 900 | 26 |
| 1000 | 28 |
| 1100 | 30 |
| 1200 | 31 |

Далее согласно (42) рассчитываем допустимую температуру печи:

1001,2

Принимаем следующий режим нагрева:

* первый интервал – нагрев при температуре печи tпч=1100°С; tп1н=20°С, tп1к=600°С
* второй интервал – нагрев при температуре печи tпч=1230°С; tп2н=600°С, tп2к=1180°С
* третий интервал – выравнивание температур по сечению слитка при постоянной температуре поверхности tпв=1180°С.

Конечный перепад температур по сечению слитков Δtк=50°С

**3.2.1. Расчет первого интервала**

По формуле (14) определяем тепловые потоки на поверхность металла в начале и в конце интервала:

139994

117355,9

Коэффициенты теплоотдачи в начале и в конце интервала:

Среднее значение коэффициента теплоотдачи в первом интервале нагрева:

Среднее значение коэффициента теплопроводности в первом интервале нагрева.

Величину определяем по известным значениям температуры по сечению слитка:

 начальная температура поверхности слитка;

 начальная температура центра слитка;

 температура поверхности слитка в конце первого интервала.

Температура центра слитка в конце первого интервала нам пока неизвестна.

Число Био в первом интервале нагрева согласно (31):

 Температурный критерий поверхности в конце первого интервала

где *tср1н* = *tп1н* = *tцп =*20˚С – средняя температура по сечению слитка в начале первого интервала нагрева.

Находим число *Fo1*

где *μ*12*, Рпл* – коэффициенты для расчета нагрева или охлаждения пластины стороной *d* [2, с.25].

Вычислим :

где *Апл* – коэффициент для расчета нагрева или охлаждения пластины стороной *d* [2, с.25].

Найдем температуру центра слитка в конце первого интервала нагрева

*°C*

Разница между уточненным *λ'ср1* и его первоначальным значением *λср1* составляет

Разница < 10%, поэтому пересчет при новом значении числа *Bi1*, рассчитанном с *λ'ср1*, производить не будем.

Перепад температур по сечению слитка в конце первого интервала нагрева:

°C

Средняя температура по сечению слитка в конце первого интервала:

Для расчета теплоемкости необходимо знать зависимость теплосодержания стали от температуры. Теплосодержание стали 40 при различных температурах приведено в Таблице 6.

**Талица 6. Теплосодержание стали 40 при разных температурах**

|  |  |
| --- | --- |
| Температура, | i, кДж/кг |
| 20 | 9,84 |
| 100 | 49,4 |
| 200 | 100 |
| 300 | 154 |
| 400 | 213 |
| 500 | 278 |
| 600 | 350 |
| 700 | 434 |
| 800 | 551 |
| 900 | 620 |
| 1000 | 686 |
| 1100 | 751 |
| 1200 | 816 |

Расчетная теплоемкость стали в первом интервале нагрева:

Среднее значение коэффициента температуропроводности в первом интервале нагрева:

где ρ=7850 кг/м3 – плотность стали 40, значение которой принимаем постоянным независящим от температуры.

Время нагрева в первом интервале:

Температура газов в начале нагрева:

Температура газа в конце первого интервала нагрева:

Температура кладки в начале нагрева:

Температура кладки в конце первого интервала нагрева:

**3.2.2. Расчет второго интервала**

Определяем тепловые потоки на поверхность металла в начале и конце интервала:

Коэффициенты теплоотдачи в начале и конце интервала:

Среднее значение коэффициента теплоотдачи во втором интервале:

Среднее значение коэффициента теплопроводности во втором интервале нагрева:

Число Био во втором интервале нагрева:

Температурный критерий поверхности в конце второго интервала:

Находим число Fo2:

Вычислим:

Найдем температуру центра слитка в конце второго интервала нагрева:

Разница между уточненным *λ'ср2* и его первоначальным значением *λср2* составляет:

.

Разница < 10%, поэтому пересчет при новом значении числа *Bi2*, рассчитанном с *λ'ср2*, производить не будем.

Перепад температур по сечению слитка в конце второго интервала нагрева:

Средняя температура по сечению слитка в конце второго интервала.

Расчетная теплоемкость материала во втором интервале нагрева:

Среднее значение коэффициента температуропроводности во втором интервале нагрева:

Время нагрева во втором интервале

Температура газов в начале второго интервала:

Температура газа в конце второго интервала:

Температура кладки в начале второго интервала:

Температура кладки в конце первого интервала нагрева:

Общее время нагрева первого и второго интервала:

**3.2.3. Расчет третьего интервала**

Нагрев происходит при условии *tп* = 1180˚С = *const* (т.е. при граничных условиях первого рода) для выравнивания температур по сечению слитка от *∆t2к* = 67°С в конце второго интервала до заданного значения *∆tВ= d/2 \* 2 = 50˚С*

Среднее значение коэффициента теплопроводности во втором периоде нагрева

Средняя температура по сечению слитка в конце периода выдержки:

Расчетная теплоемкость на этапе выдержки:

Среднее значение коэффициента температуропроводности в период выравнивания температур:

Определяем продолжительность периода выравнивания температур:

Тепловой поток на поверхность металла в конце этапа выдержки:

Температура газов в конце выдержки:

Температура печи в конце выдержки:

Температура кладки в конце выдержки

Общее время нагрева слитков:

Общая масса садки печи:

Производительность печи:

Напряженность пода печи

Результаты расчетов сведем в Таблицу 7

**Таблица 7. Результаты расчета режима нагрева металла**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *Время* | *tц* | *tср* | *tп* | *tкл* | *tпч* | *tг* | *qпов* | *Δt* |
| *ч* | *℃* | *Вт/м 2* | *℃* |
| 0 | 20 | 20 | 20 | 996 | 1100 | 1307 | 139994,0 | 0 |
| 1,09 | 346 | 473 | 600 | 1014 | 1100 | 1278 | 117355,9 | 254 |
| 1,09 | 346 | 473 | 600 | 1129 | 1230 | 1482 | 178519,8 | 254 |
| 5,75 | 1113 | 1147 | 1180 | 1217 | 1230 | 1274 | 25498,0 | 67 |
| 5,95 | 1130 | 1155 | 1180 | 1198 | 1207 | 1222 | 12320,0 | 50 |

4.Расчет теплого баланса печи

Расход топлива и коэффициент полезного действия – важнейшие характеристики работы печи. Расход топлива проектируемых печей находят расчетным путем, используя тепловой баланс. Тепловой баланс печи состоит из равных между собой приходных и расходных статей. Для камерных печей периодического действия тепловой баланс рассчитывают на один цикл работы (загрузка, нагрев, и выгрузка заготовок).

**4.1. Приходные статьи теплого баланса**

Приходные статьи теплового баланса рассчитываем в предположении, что топливо не подогревается, а воздух нагревается в рекуператоре до 250˚С. Поскольку топливо не подогревается, его физическую теплоту можно не учитывать.

Теплота, выделяющаяся при сжигании топлива

 136901,5∙B кДж

где *В* – расход топлива, *м3/ч*.

Определяем физическую теплоту, вносимую подогретым воздухом при *tв* = 175˚С

13030,2

где *LД*–действительный объем воздуха, м3; *Св* – теплоемкость воздуха при данной температуре, Дж/(кг·˚С).

Определяем количество теплоты, выделившейся при окислении железа. Эту составляющую необходимо учитывать при *tп* > 700˚С. По рис.3.1 определили, что *tок* = *tп* = 700˚С через 1,3 ч нагрева. Значит, металл находится при *tп* > 700˚С *τок* = 4,65 ч, где *τок* – время окалинообразования. Средняя температура поверхности садки за это время

 Количество железа, окислившегося на одном квадратном метре садки

.

Теплота, выделившаяся при окислении железа

**4.2. Расходные статьи теплого баланса**

Теплота, расходуемая на нагрев металла

6068050

Выберем двухслойную футеровку печи: первый слой (внутренний) – огнеупорный, выполнен из шамота ρ = 2150 кг/м3 толщиной *S1* = 230 мм, а второй слой (наружный) – теплоизоляционный, из диатомита ρ = 500 кг/м3 толщиной *S2* = 230 мм.

Средняя температура внутренней поверхности кладки за цикл нагрева (см. таблицу 7)

Примем в первом приближении, что средняя температура по сечению внутреннего слоя

Средняя температура по сечению наружного слоя

При таких значениях средних температур коэффициент теплопроводности шамота равен

Коэффициент теплопроводности теплоизоляционного слоя

Считая коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности кладки к воздуху *a* = 20 Вт/м2·град, определим тепловой поток через кладку

Проверим правильность принятых средних температур слоев кладки

Поскольку проверка показывает большие расхождения с принятыми температурами, произведем перерасчет:

 Дальнейшее уточнение не требуются, так как принятые и рассчитанные значения средних температур отличаются друг от друга менее чем на 10%.

Рассчитаем температуру на внешней поверхности кладки:

Распределение температур по сечению кладки показано на рис. 2.



Рис.2. Распределение температур по сечению кладки печи

Общие потери теплоты теплопроводностью за весь цикл нагрева

Теплоту, аккумулированную кладкой, рассчитываем для первого периода нагрева, когда температура внутренней поверхности кладки нарастает. Допускаем, что теплота аккумулируется только внутренним слоем кладки.

Теплоемкость шамота при средней его температуре 1058˚С

С=0,808+0,000314⬝1058=1,140

Теплота, аккумулированная кладкой

,

где *tклн*, *tклк* – начальная и конечная температуры внутренней поверхности кладки в первый период нагрева, ˚С;

*τ1* – продолжительность первого периода нагрева, с;

*ρ* – плотность внутреннего слоя кладки, кг/м3.

Рассчитаем потери теплоты излучением через рабочие окна – потери, происходящие при загрузке и выгрузке слитков печи.

Примем следующие размеры окна: ширина *b* = 2,25 м, средняя высота *d* = 1,95 м, толщина стенки окна *l* = 0,46м.

При таких размерах окна коэффициент *f* равен

Коэффициент диафрагмирования

Время загрузки *τз* печи и время её разгрузки *τр* принимаем равными 20 мин.

Теплота, теряемая излучением при посадке (*tг0* = ˚С)

Теплота, теряемая излучением при выдаче (*tг3* = ˚С)

Средняя температура уходящих газов за цикл нагрева

При этой температуре теплоемкость продуктов сгорания



Тогда

Рассчитаем потери теплоты на нагрев технологических приспособлений. Пусть три слитка уложены на четыре подставки из стали 40 общей массой 550 кг. Допускаем, что начальная температура подставок равна температуре внутренней поверхности кладки, то есть *tпн* = *tкл0* = 996 ˚С. Конечная температура подставок и поверхности садки одинакова *tпк* = *tп3* =1180 ˚С.

Тогда теплота, затраченная на нагрев подставок

где *Gп* – масса приспособлений, кг;

*iпн*, *iпк* – теплосодержание материала приспособлений в начале и конце цикла нагрева, кДж/кг.

Неучтенные потери теплоты



**4.3. Тепловой баланс и тепловая эффективность работы печи**

Из равенства приходной и расходной частей баланса определим средний расход топлива.

,

*B =* 182 м3/ч

Результаты расчета теплового баланса печи сведены в таблицу 8.

**Таблица 8. Результаты расчёта теплового баланса печи**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| статья | приход теплоты | Статья | расход теплоты |
| **МДж** | **%** | **МДж** | **%** |
| QТ | 24915 | 91,0 | QМ | 6068 | 22,2 |
| Qфв | 2371 | 8,7 | Qтепл | 583 | 2,1 |
| Qэкз | 82 | 0,3 | Qак | 102 | 0,4 |
|   |  |  | Qизл | 2344 | 8,6 |
|   |  |  | Qп | 66 | 0,2 |
|   |  |  | Qух | 17897 | 65,4 |
|   |  |  | Qнеучт | 309 | 1,1 |
| итого | 27368 | 100 | Итого | 27368 | 100 |

Коэффициент полезного действия печи

Средний удельный расход теплоты

Удельный расход условного топлива (теплота сгорания условного топлива равна 23 МДж/кг)

5.Расчет рекуператора

Дымовые газы, покидающие рабочее пространство печи, имеют высокую температуру, а, следовательно, содержат значительное количество теплоты. Поэтому целесообразно обеспечить утилизацию теплоты отходящих дымовых газов с возвратом части её обратно в печь. Для этого необходимо теплоту уходящих дымовых газов передать поступающему в печь воздуху. Для решения этой задачи используют теплообменники рекуперативного типа, применение которых позволяет экономить топливо.

Рекуператор представляет собой теплообменный аппарат, работающий в условиях, близких к стационарному тепловому состоянию, при котором происходит передача теплоты от остывающих дымовых газов к нагревающемуся воздуху через разделительную стенку.

Проектирование рекуператоров предполагает расчет значений площади поверхности нагрева и некоторых других параметров, характеризующих его конструкцию.

Выберем для проектируемой печи имеющий широкое применение петлевой рекуператор. Исходные данные для его расчета:

* *В* =  м3/ч – средний расход топлива;
* *LД* = м3 – расход воздуха;
* *VД* =м3 – количество продуктов сгорания;
* *tв*= 175˚С – температура подогрева воздуха;
* *tух* = ˚С – средняя температура уходящих из печи дымовых газов за цикл нагрева;
* *СО2* = %; *H2O* = %; N2 = 71,59 %; O2 = 1,66% - содержание лучепрозрачных газов в продуктах сгорания топлива;

Для изготовления рекуператора выберем трубы диаметром

*dн* = 30 *мм* – наружный диаметр трубы;

*dвн* = 24,7 *мм* – внутренний диаметр трубы.

Примем коридорное расположение труб в рекуператоре с шагом

, .



Рис. 3. Схема расположения и основные геометрические характеристики коридорного пучка труб в рекуператоре.

Расчет начинаем с определения расхода воздуха и дыма, проходящих через рекуператор. Найдем расход воздуха

 В 1216,5 м3/ч

где *n* – коэффициент подсоса воздуха, который для трубчатых металлических рекуператоров равен нулю.

Расход дымовых газов с учётом потерь дыма на выбивание через дымовой шибер, а также подсоса воздуха

 м3/ч

где *m* – коэффициент, учитывающий потери дыма в печи и боровах до рекуператора; *ρ* – коэффициент подсоса воздуха.

Рассчитаем теплосодержание дыма

Теплосодержание дыма перед рекуператором с учетом подсоса воздуха

Теплосодержанию дыма соответствует температура

 (рис. 4).

Рис. 4. Зависимость теплосодержания дымовых газов от их температуры

Принимая коэффициент потерь в рекуператоре *ξ* = 0,82, определим теплосодержание дыма за рекуператором

Этому теплосодержанию соответствует температура дыма за рекуператором (рис. 4). Среднелогарифмический температурный напор

Средняя температура дыма в рекуператоре

Приняв скорость дыма в рекуператоре *WД* = 4 *м/с*, вычислим коэффициент теплоотдачи конвекцией на дымовой стороне

Общий коэффициент теплоотдачи с учетом излучения на дымовой стороне

Средняя температура воздуха в рекуператоре

(175+20)/2=97,5.

Принимаем скорость движения воздуха в рекуператоре *WВ* = 6*м/с*.

Определим коэффициент теплоотдачи конвекцией на воздушной стороне рекуператора

Предполагая, что тепловое сопротивление s/λ = 0, найдем коэффициент теплоотдачи

=

где *s* – толщина стенки, *м*; *λ* – коэффициент теплопроводности материала стенки, *Вт/м·град*.

Площадь поверхности рекуператора

Произведем компоновку рекуператора. Число U-образных элементов

Средняя поверхность нагрева одного трубного элемента

Средняя длина одного трубного элемента

Число труб в ряду, перпендикулярном движению дыма:

Число труб по ходу дыма:

6.Аэродинамический расчет дымового тракта

Исходные данные для расчета:

Расход воздуха на рекуператор В =м3/ч

Температура воздуха на входе в рекуператор t’в= 20°С.

Температура воздуха на выходе из рекуператора t"B=175°С.

Вд = В⬝Vд = 182⬝7,69 = 1399,4 м3/ч

Скорость движения газов в горизонтальных дымовых каналах (дымоходах) и вертикальных каналах (дымопадах) высотой 2 м: W01=1 м/с

В рабочем пространстве печи имеется 6 дымовых окон, расположенных на боковых стенках симметрично по 3 с каждой стороны. Площадь всех дымовых окон:

размер окна:

Эквивалентный диаметр канала определим следующим образом:

Динамический напор газа на этом участке определим следующим образом:

Потери на трение на горизонтальном участке канала длиной 0,25 м определим следующим образом:

Потери при повороте канала на 900 без изменения его сечения:

Потери на трение в дымопаде высотой 2 метра:

Потери на преодоление геометрического давления в дымопаде определим следующим образом:

Потери на поворот 900 из дымохода в боковой дымовой канал с расширением потока:

Определим потери напора при движении дымовых газов в горизонтальных боковых дымовых каналах печи до места их слияния в общий дымовой канал (боров), по которому газы движутся к основанию дымовой трубы. Размеры боковых окон 0,44х0,44 м , то есть их площадь поперечного сечения равна сумме площадей четырёх вертикальных каналов, и, следовательно, средняя скорость дымовых газов в них будет равна скорости газов в дымопадах, то есть W02=W01=1 м/с.

Средняя температура дыма в боковых дымовых каналах:

 Динамический напор газа на этом участке:

Эквивалентный диаметр бокового канала:

Потери на трение в боковом канале до выхода в боров:

Потери при повороте бокового дымового канала при повороте на 90° без изменения его сечения:

Определим потери напора при движении газов в борове от его начала до основания дымовой трубы. Среднее количество дымовых газов, проходящих через него, с учётом утечки дыма и подсоса воздуха:

Скорость движения газов в борове: W03 =W02=W01=1 м/с

тогда площадь его поперечного сечения:

Пусть высота борова Нб=0,44 м, то есть, равна высоте бокового канала, то его ширина

Эквивалентный диаметр борова:

Среднюю температуру в борове от его начала до рекуператора можно считать равной средней температуре дыма в боковых каналах, то есть

Поэтому динамический напор газа на этом участке:

Потери на преодоление трения от начала борова до рекуператора (длина этого участка равна 1 м):

Определим потери давления в рекуператоре. При коридорном расположении труб в рекуператоре коэффициент сопротивления рассчитывается по формуле:



Для данного рекуператора эти параметры имеют следующие значения:

n = 39

S1 = 0,048

S2 = 0,060

(S1-dн)/S1 = 0,375

m = 0,2, a β = 2,85.

Таким образом, коэффициент сопротивления равен:

Средняя температура дыма в рекуператоре:

Потери напора в рекуператоре:

Определим потери напора от рекуператора до дымовой трубы. Пусть при движении по борову дымовые газы охлаждаются на один градус на один метр его длины, тогда средняя температура дыма на этом участке длиной 20 метров составит:

Потери на преодоление трения (сечение борова то же, что и до рекуператора) на этом участке:

Потери на дымовом регулирующем шибере с учётом степени его открытия на 50% составляют:

Потери на повороте 900 в дымовую трубу при К6=0.66:

Общие потери при движении дымовых газов от рабочего пространства печи до основания дымовой трубы определим следующим образом:

 Геометрический напор Ргтр (разряжение) столба горячего газа внутри трубы, окруженной более холодным воздухом, должен покрыть потери напора при прохождении газов по дымовому тракту Рп, потери на трение в самой трубе Ртр и потери на выхлоп в устье трубы Рвых. В настоящее время размеры минимальной высоты дымовой трубы устанавливаются исходя из санитарных норм и экологических соображений. Поэтому методику расчёта высоты дымовой трубы рассматривать нет необходимости. Если здания вокруг трубы находятся на расстоянии, меньшем 100 метров, то высота трубы должна быть на 5 метров выше конька крыши здания, но не менее 16 метров. Если продукты сгорания содержат вредные газы (N2O5, SO2 и др.), то высота должна превышать 100 метров.

Список использованной литературы

1. Казанцев Е.И., Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. 2-е изд, М., «Металлургия», 1975, 368с.
2. Становой В.И., Буйлов А.А., Расчеты горения топлива, параметров внешнего теплообмена и режимов нагрева металла в печах периодического действия: методические указания, Л., ЛГТУ, 1991, 46с.
3. Становой В.И., Буйлов А.А., Расчеты теплового баланса и рекуператора, Аэродинамические расчеты камерных садочных печей: методические указания, Л., ЛГТУ, 1991, 40с.
4. Тайц Н.Ю., Расчеты нагревательных печей, 2-е издание, исправленное и дополненное, Издательство “ТЕХНIКА”, Киев, 1969, 549с.