Санкт-Петербургский политехнический университет

Имени Петра Великого

Институт металлургии, машиностроения и транспорта

Кафедра «Технология исследования материалов»

Курсовой проект

на тему «Расчет нагрева металла и конструирование печи»

Исполнитель

 Студент гр. 43314/4 (подпись)

 Букалин М.М. (дата)

Руководитель

 Преподаватель (подпись)

 Коджаспиров В.Е. (дата)

Санкт-Петербург

2015

Оглавление

[**Введение** 3](#_Toc421060055)

[**Техническое задание** 4](#_Toc421060056)

[**1.** **Расчет горения топлива** 5](#_Toc421060057)

[1.1. Рабочий состав топлива 5](#_Toc421060058)

[1.2. Теплота сгорания топлива 5](#_Toc421060059)

[1.3. Теоретический и действительный объем воздуха 6](#_Toc421060060)

[1.4. Выход и состав продуктов горения 6](#_Toc421060061)

[1.5. Расчет горения топлива 7](#_Toc421060062)

[**2.** **Расчет параметров внешнего теплообмена** 10](#_Toc421060063)

[Расчет параметров внешнего теплообмена 12](#_Toc421060064)

[**3.** **Расчет режима нагрева металла** 15](#_Toc421060065)

[3.1. Рабочие формулы и порядок выполнения расчета 15](#_Toc421060066)

[3.2. Расчет режима нагрева металла под ковку 18](#_Toc421060067)

[3.2.1. Расчет первого интервала 19](#_Toc421060068)

[3.2.2. Расчет второго интервала 22](#_Toc421060069)

[3.2.3. Расчет третьего интервала 24](#_Toc421060070)

[**4.** **Расчет теплого баланса печи** 27](#_Toc421060071)

[4.1. Приходные статьи теплого баланса 27](#_Toc421060072)

[4.2. Расходные статьи теплого баланса 27](#_Toc421060073)

[4.3. Тепловой баланс и тепловая эффективность работы печи 31](#_Toc421060074)

[**5.** **Расчет рекуператора** 33](#_Toc421060075)

[**6.** **Аэродинамический расчет дымового тракта** 37](#_Toc421060076)

[**Заключение.** 41](#_Toc421060077)

[**Список использованной литературы** 42](#_Toc421060078)

# **Введение**

Нагрев металла является одной из важнейших стадий производственного процесса, влияющей на производительность, качество и себестоимость выпускаемой продукции.

В настоящее время в машиностроении для нагрева металлических заготовок под прессование, штамповку и термическую обработку используют печи самых различных конструкций, которые могут быть объединены общим признаком. В подавляющем большинстве случаев (85-90 %) – это камерные печи садочного типа. Широкое применение такого типа печей объясняется, в первую очередь, их универсальностью, позволяющей обрабатывать в них по разным режимам самые разнообразные по форме и размерам заготовок, что в условиях машиностроения делает эти печи незаменимыми.

Для того, чтобы технически грамотно выбрать и использовать печь существующей конструкции для решения конкретной технологической задачи, необходимо знать основы ее тепловой работы, под которой понимают совокупность всех процессов, протекающих в печи и определяющих основной процесс – нагрев металла.

Сущность тепловой работы нагревательных и термических печей садочного типа одинакова и определяется сочетанием процессов тепловыделения, теплообмена и теплоусвоения, которые протекают в рабочем пространстве. Поэтому задачи расчета таких печей сводятся к выявлению условий протекания указанных процессов, которые обеспечат заданный режим нагрева и заданную производительность печи.

Данный курсовой проект позволяет ознакомиться с методиками расчета основных процессов, определяющих тепловую работу печей, а также качественные и количественные связи между параметрами, обеспечивающими требуемый технологический режим нагрева металла.

В первой части проекта производим расчет горения топлива с целью определения объема продуктов сгорания и их состава.

Во второй части рассчитываем параметры, характеризующие интенсивность теплообмена излучением в рабочем пространстве печи.

В третьей части выполняем расчет нагрева металла в соответствии с температурным режимом печи, выбранным с учетом технологических ограничений по нагреву металла.

В четвертой части проекта составляем тепловой баланс печи, позволяющий определить необходимый расход топлива.

В пятой части выбираем тип рекуператора и рассчитываем его основные рабочие параметры.

В шестой части проводим аэродинамический расчет печи, а именно расчет движения газов в аэродинамическом тракте.

# **Техническое задание**

1. Тип и назначение печи: камерная садочная
2. Материал нагреваемых заготовок: Ст У8
3. Габариты заготовок: цилиндр d = 500 мм; l = 1500 мм
4. Садка печи: 3 шт.
5. Режим нагрева металла: нагрев под ковку
6. Топливо: смесь природного и доменного газов
7. Теплота сгорания топлива Qнр = 32МДж/м3
8. Влажность топлива: W = 25 г/м3

# **Расчет горения топлива**

Это первая стадия теплового расчета пламенных печей, в результате которой определяют следующие характеристики: низшую теплоту сгорания топлива; теоретический и действительный объем воздуха; выход и состав продуктов горения; плотность продуктов горения.

## 1.1. Рабочий состав топлива

Расчеты проводятся по рабочей массе топлива, характеризующей состав топлива в практических условиях его использования. Коэффициент пересчета состава сухого топлива на влажный (рабочую массу топлива) определяют из выражений:

где содержание влаги в топливе по справочным данным, %; заданное содержание влаги в топливе, %; содержание водяных паров в топливе. г/м3.

Рабочий состав топлива определяют путем умножения соответствующих компонентов сухого топлива на коэффициент пересчета .

## 1.2. Теплота сгорания топлива

Низшую теплоту сгорания топлива определяют по формулам для газообразного топлива (мДж/м3);

где содержание соответствующих компонентов в рабочем составе топлива, %.

Поскольку в нашем случае печь работает на смешанном топливе, то теплота сгорания задана. Поэтому необходимо определить долю отдельных видов топлива в смеси и ее состав. Если обозначить теплоты сгорания смеси газов Qсм , первого Q’ и второго Q’’, то доля первого газа в смеси составит

x = (Qсм - Q’’) / (Q’ - Q’’), а второго – (1 - x). Теплоту сгорания каждого из газов, входящих в смесь, вычисляют по их рабочему составу.

После определения долей газов находят состав смеси как сумму произведений соответствующих компонентов первого и второго газов на их доли, например:

## 1.3. Теоретический и действительный объем воздуха

Теоретический расход воздуха L0 рассчитывается по следующей формуле:

где влагосодержание сухого воздуха, г/м3. Обычно в расчетах влагосодержание сухого воздуха принимают равным 10 г/м3.

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

 где коэффициент избытка воздуха, зависящий от вида топлива и типа горелочного устройства. При расчетах топлива коэффициент избытка воздуха для газообразного топлива принимается равным 1,05…1,15.

## 1.4. Выход и состав продуктов горения

Качественный состав продуктов горения любого топлива в воздухе одинаков: CO2,

H2O, SO2, N2, O2. Количество продуктов полного сгорания газообразного топлива (на 1 м3)

Для каждой составляющей находят по формулам:

Общее количество продуктов горения при полном сжигании единицы топлива находят из выражения:

Состав продуктов горения в объемных процентах определяется следующим образом:

Плотность продуктов горения (кг/м3) рассчитывают по их процентному составу:

## 1.5. Расчет горения топлива

Согласно выданному заданию печь отапливается смесью природного и доменного газов (теплота сгорания 28 МДж/м3, влажность 25 г/м3). Состав природного и доменного газов приведён в таблице 1.

**Таблица 1. Состав природного и доменного газов (%)**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Газ |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Сумма |
| Природный | 0,3 | 0,6 | 2,0 | 3,0 | 93,0 | 0,4 | 0,2 | 0,5 | 0 | 100 |
| Доменный | 10,0 | 27,4 | 3,3 | 58,4 | 0,9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 |

Пересчитаем по формулам (1) – (3) состав доменного газа:

3,01714

Коэффициент пересчета сухого доменного газа на влажный:

0,96983

Рабочий состав доменного газа определим как:

9,69829

26,5733

3,20043

56,63799

0,87285

**Таблица 2. Рабочие составы природного и доменного газов (%)**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Газ |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Сумма |
| Природный | 0,3 | 0,6 | 2,0 | 3,0 | 93,0 | 0,4 | 0,2 | 0,5 | - | 100 |
| Доменный | 9,7 | 26,57 | 3,2 | 56,63 | 0,87 | 0 | 0 | 0 | 3,02 | 100 |

Теплоту сгорания каждого газа вычисляем по формуле (4)

Определим долю природного газа в смеси:

Доля природного газа в смеси:

доля доменного газа в смеси: 1 - = 0,059786

По формуле (5) рассчитаем рабочий состав смешанного газа:

0,86188

2,15283

2,07177

6,20677

87,49213

0,37609

0,18804

0,47011

**Таблица 3. Рабочий состав смешанного газа (%)**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  | Сумма |
| 0,861 | 2,152 | 2,071 | 6,206 | 87,492 | 0,376 | 0,188 | 0,47 | 0,18 | 100 |

Теоретически необходимое количество воздуха (м3) для сжигания 1 м3 топлива определим по формуле (6):

8,57963м3/м3топлива

Действительное количество воздуха при вычислим по формуле (7):

8,579639,43760м3/м3топлива

Рассчитаем количество продуктов сгорания (м3), выделившихся при сжигании 1 м3 топлива, по формулам (8):

0,91259м3/м3топлива

1,898м3/м3топлива

7,51777м3/м3топлива

0,18017 м3/м3топлива

0,00188 м3/м3топлива

Общее количество продуктов сгорания согласно (9):

10,51121м3/м3топлива

Рассчитаем состав продуктов сгорания смешанного газа по формулам (10):

8,68207

18,06446

71,52148

0,01789

1,7141

Плотность продуктов сгорания вычисляется по формуле (11):

1,23

# **Расчет параметров внешнего теплообмена**

На поверхности нагреваемого в печи материала теплота передается за счет излучения и конвекции:

где и тепловые потоки, переданные соответственно конвекцией и излучением.

Следует иметь в виду, что доля теплоты, передаваемой конвекцией в печах с рабочей температурой более 700̊ C, не превышает 15…20% и падает с увеличением температуры.

Существующие методики расчета конвективного теплообмена дают относительную погрешность около 20…30%, поэтому в дальнейшем будем считать, что конвективный тепловой поток составляет 10% от лучистого теплового потока: .Тогда общий поток теплоты, передаваемый на поверхность металла: . Тепловой поток излучением на поверхность нагреваемого материала может быть вычислен по формуле:

где тепловой поток излучением; , температуры среды и поверхности нагреваемого материала, К; приведенный коэффициент излучения, Вт/м2К4.

При расчете теплового потока на поверхность садки в качестве источника излучения может быть выбрана печь, газ или кладка. В реальных условиях режим нагрева контролируется по показаниям печной термопары. Температура, фиксируемая горячим спаем, дает промежуточное значение между температурой газа (наиболее высокой температурой печи), кладки и металла. Принято считать, что на поверхность печной термопары и металла передаются равные тепловые потоки, поэтому в дальнейшем при его определении принимаем в качестве источника излучения печи. Тогда с учетом конвекции тепловой поток на металл:

где приведенный коэффициент излучения в системе печь – металл, Вт/м2К4; температура печи, К.

Исходя из того что, тепловой поток излучением на металл одинаков независимо от того, что мы выбираем в качестве источника излучения, то зная можно определить температуру газов и кладки из выражений:

(15)

где приведенные коэффициенты излучения в системе газ – металл и кладка – металл, Вт/м2К4; температура газа, К; температура внутренней поверхности кладки, К.

Таким образом, основной задачей расчета внешнего теплообмена является определение приведенных коэффициентов излучения, которые рассчитываются по формулам:

 где 5,67 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, В/м2К4; степень черноты металла; поверхность металла, участвующая в теплообмене, м2; угловой коэффициент с металла на кладку; угловой коэффициент с металла на металл; угловой коэффициент с кладки на металл, численно равный ; степень черноты газа.

Степень черноты продуктов сгорания, зависящая от состава дыма, его температуры и эффективной длины луча, может быть определена из выражения:

где коэффициент ослабления; суммарное парциальное давление паров воды и углекислого газа в продуктах сгорания, МПа; эффективная длина луча, м.

Коэффициент ослабления вычисляют по формуле:

 Эффективная длина луча зависит от объема, занимаемого газом и поверхности, его ограничивающей. Обычно ее определяют по формуле А. С. Невского:

где объем печи, м3; объем металла, нагреваемого в печи, м3.

## Расчет параметров внешнего теплообмена

 

Рис. 1. Эскиз рабочего пространства печи и схема расположения слитков на ее поду

Рассчитаем приведенные коэффициенты излучения при нагреве трёх слитков диаметром d = 500 мм и длиной l = 1500 мм. Расчет внешнего теплообмена в проектируемых печах начинаем с определения основных размеров печи в зависимости от числа слитка и их размещения. В данном случае слитки расположены в два ряда по длине и ширине печи. Тогда длина рабочего пространства L = 2500 мм; ширина B = 2250 мм.

В камерных печах рабочее пространство перекрывают арочным сводом с центральным углом φ = 60̊. При таком центральном угле свода R = B, а высота боковой стены:

Средняя высота печи:

Определим геометрические параметры излучения.

Поверхность кладки:

30,70

Излучающую поверхность металла определим по формуле:

8,24

Объем рабочего пространства печи найдем из формулы:

11,80

А объем металла – из формулы:

Эффективную длину луча определим по формуле (21):

Угловые коэффициенты:

Приведенный коэффициент при степени черноты окисленной стали, равной вычислим по формуле (16):

Для расчета других приведенных коэффициентов необходимо сначала определить степень черноты газов, заполняющих рабочее пространство печи. В расчете горения топлива было определено, что в продуктах сгорания содержится 8,68% CO2 и 18,06 % H2O. Следовательно, парциальное давление углекислого газа и паров воды составит:

0,0085

0,0177

Далее необходимо определить температуру газов, заполняющих рабочее пространство печи. Так как на данном этапе неизвестно, при каких значениях температуры газов требуется вычислить степень черноты газов, то определим степень черноты газов для температур в диапазоне 500-1500°С с шагом 50°С.

Рассмотрим в качестве примера расчет для tг = 500°С.

Коэффициент ослабления вычисляют по формуле (20):

Степень черноты продуктов сгорания, зависящая от состава дыма, его температуры и эффективной длины луча по формуле (19):

Приведенный коэффициент излучения в системе газ-металл (17):

Приведенный коэффициент излучения в системе кладка-металл (18):

Аналогично рассчитываем значения приведенных коэффициентов излучения при других температурах газа. Результаты расчета сведены в Таблицу 4.

**Таблица 4. Результаты расчета приведенных коэффициентов излучения для диапазона температур 500-1500°С с шагом 50°С**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **t, °C** | **T, K** | **K** | **εг** | **Сгм** | **Скм** | **Спм** |
| **Вт/(м2К4)** |
| 500 | 773 | 1,5077 | 0,3219 | 3,1372 | 5,1734 | 3,7340 |
| 550 | 823 | 1,4671 | 0,3148 | 3,1052 | 5,1799 | 3,7340 |
| 600 | 873 | 1,4266 | 0,3076 | 3,0721 | 5,1864 | 3,7340 |
| 650 | 923 | 1,3860 | 0,3003 | 3,0378 | 5,1930 | 3,7340 |
| 700 | 973 | 1,3455 | 0,2929 | 3,0022 | 5,1996 | 3,7340 |
| 750 | 1023 | 1,3049 | 0,2855 | 2,9654 | 5,2064 | 3,7340 |
| 800 | 1073 | 1,2643 | 0,2780 | 2,9271 | 5,2131 | 3,7340 |
| 850 | 1123 | 1,2238 | 0,2704 | 2,8873 | 5,2200 | 3,7340 |
| 900 | 1173 | 1,1832 | 0,2627 | 2,8459 | 5,2269 | 3,7340 |
| 950 | 1223 | 1,1427 | 0,2550 | 2,8029 | 5,2339 | 3,7340 |
| 1000 | 1273 | 1,1021 | 0,2472 | 2,7581 | 5,2409 | 3,7340 |
| 1050 | 1323 | 1,0615 | 0,2393 | 2,7115 | 5,2480 | 3,7340 |
| 1100 | 1373 | 1,0210 | 0,2313 | 2,6628 | 5,2552 | 3,7340 |
| 1150 | 1423 | 0,9804 | 0,2232 | 2,6121 | 5,2625 | 3,7340 |
| 1200 | 1473 | 0,9398 | 0,2150 | 2,5590 | 5,2698 | 3,7340 |
| 1250 | 1523 | 0,8993 | 0,2068 | 2,5036 | 5,2772 | 3,7340 |
| 1300 | 1573 | 0,8587 | 0,1985 | 2,4456 | 5,2846 | 3,7340 |
| 1350 | 1623 | 0,8182 | 0,1900 | 2,3849 | 5,2922 | 3,7340 |
| 1400 | 1673 | 0,7776 | 0,1815 | 2,3212 | 5,2998 | 3,7340 |
| 1450 | 1723 | 0,7370 | 0,1729 | 2,2543 | 5,3075 | 3,7340 |
| 1500 | 1773 | 0,6965 | 0,1643 | 2,1841 | 5,3152 | 3,7340 |

# **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 цилиндра:

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

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 У8 из [2] имеем:

σВ=700 МН/м2

β= 10,84∙10-6 1/

E=20,9∙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 У8 λ, Вт/(м⬝°С), при различной температуре.

**Таблица 5. Значения коэффициента теплопроводности стали У8 при различных температурах**

|  |  |
| --- | --- |
| Температура, | λ, Вт/(м⬝°С) |
| 20 | 49,6 |
| 100 | 48,1 |
| 200 | 45,1 |
| 300 | 41,4 |
| 400 | 38,1 |
| 500 | 35,0 |
| 600 | 33,0 |
| 700 | 30,1 |
| 800 | 24,3 |
| 900 | 25,7 |
| 1000 | 26,9 |
| 1100 | 28,6 |
| 1200 | 30,2 |

Далее согласно (42) рассчитываем допустимую температуру печи:

1134,8

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:

145663,5

122108,6

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*, Рцил* – коэффициенты для расчета нагрева или охлаждения цилиндра радиусом *d/2* [2, с.25].

Вычислим :

где *Ацил* – коэффициент для расчета нагрева или охлаждения цилиндра радиусом *d/2* [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 У8 при различных температурах приведено в Таблице 6.

**Талица 6. Теплосодержание стали У8 при разных температурах**

|  |  |
| --- | --- |
| Температура, | i, кДж/кг |
| 20 | 9,71 |
| 100 | 48,57 |
| 200 | 102,99 |
| 300 | 159,52 |
| 400 | 219,39 |
| 500 | 284,70 |
| 600 | 356,72 |
| 700 | 433,75 |
| 800 | 572,75 |
| 900 | 636,81 |
| 1000 | 699,19 |
| 1100 | 764,51 |
| 1200 | 828,99 |

Расчетная теплоемкость стали в первом интервале нагрева:

Среднее значение коэффициента температуропроводности в первом интервале нагрева:

где ρ=7830 кг/м3 – плотность стали У8, 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* = 83°С в конце второго интервала до заданного значения *∆tВ=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 | 1019 | 1100 | 1281 | 145663,5 | 0 |
| 0,54 | 308 | 454 | 600 | 1033 | 1100 | 1255 | 122108,6 | 292 |
| 0,54 | 308 | 454 | 600 | 1151 | 1230 | 1450 | 185749,6 | 292 |
| 2,69 | 1097 | 1138 | 1180 | 1219 | 1230 | 1268 | 26530,6 | 83 |
| 3,01 | 1130 | 1155 | 1180 | 1198 | 1205 | 1217 | 11960,0 | 50 |

# **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

96348,1∙B кДж

где *В* – расход топлива, *м3/ч*.

Определяем физическую теплоту, вносимую подогретым воздухом при *tв* = 250˚С

9306,1

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 0,8 ч нагрева. Значит, металл находится при *tп* > 700˚С *τок* = 2,15 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

5486879,2

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 1071˚С

С=0,808+0,000314⬝1071=1,144

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 У8 общей массой 550 кг. Допускаем, что начальная температура подставок равна температуре внутренней поверхности кладки, то есть *tпн* = *tкл0* = 1019 ˚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.

,

5486879,2783214,5+3046031217333,61028827,8 57471,366252,1

*B=*232,6 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 | 22410 | 91,0 | QМ | 5487 | 22,3 |
| Qфв | 2165 | 8,8 | Qтепл | 305 | 1,2 |
| Qэкз | 53 | 0,2 | Qак | 783 | 3,2 |
|   |  |  | Qизл | 2246 | 9,1 |
|   |  |  | Qп | 57 | 0,2 |
|   |  |  | Qух | 15410 | 62,6 |
|   |  |  | Qнеучт | 339 | 1,4 |
| итого | 24627 | 100 | Итого | 24627 | 100 |

Коэффициент полезного действия печи

Средний удельный расход теплоты

Удельный расход условного топлива (теплота сгорания условного топлива равна 29,33 МДж/кг)

# **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*= 250˚С – температура подогрева воздуха;
* *tух* = ˚С – средняя температура уходящих из печи дымовых газов за цикл нагрева;
* *СО2* = %; *H2O* = %; N2 = 71,52 %; O2 = 1,71% - 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 2195,1 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

(250+20)/2=135.

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. Чисто 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:.

# **Аэродинамический расчет дымового тракта**

Исходные данные для расчета:

Расход воздуха на рекуператор ВB = м3/ч

Температура воздуха на входе в рекуператорt’в= 20°С.

Температура воздуха на выходе из рекуператора t"B=250°С.

Вд=В⬝Vд=232,6⬝10,5112=2444,8 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 0,34 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 0,34х0,34 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=0,58 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 1м):

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.

# **Заключение.**

В ходе выполнения курсового проекта была спроектирована печь и произведен её тепловой расчет, а также расчёт горения топлива, рассчитаны параметры внешнего теплообмена и режим нагрева металла, произведен расчет рекуператора и аэродинамический расчёт воздушного тракта.

Данная печь предназначена для нагрева слитков под нормализацию. Используемое топливо: смесь природного и доменного газов. Нагрев слитков до температуры 1180 ºС происходит за два этапа: нагрев (3,01 ч) и выдержка (0,32 ч), необходимая для выравнивания температуры по сечению слитка. Петлевой рекуператор рассчитан по коридорной схеме и позволяет экономить топливо, осуществляя передачу теплоты дымовых газов обратно в печь.

# **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.