**1 ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ПЕЧИ**

**1.1 Расчет горения топлива**

Исходными данными для расчета горения топлива является малосернистый мазут М 40. Характеристика мазута приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.1 – Характеристика мазута

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Составляющие мазута** | **Обозначение** | **Единицы измерения** | **Значение** |
| Углерод | Ср | % | 87,33 |
| Водород | Нр | % | 11,9 |
| Кислород | Ор | % | 0,2 |
| Азот | Nр | % | 0 |
| Сера | Sр | % | 0,39 |
| Влажность | Wр | % | 0,15 |
| Зола | Ар | % | 0,03 |

Определение теплотворной способности топлива , *кДж/кг*,

,

где  - содержание углерода в рабочей массе топлива, %;

 - содержание водорода в рабочей массе топлива, %;

 - содержание серы в рабочей массе топлива, %;

 - содержание кислорода в рабочей массе топлива, %;

 - содержание влаги в рабочей массе топлива, %.

.

Теоретически необходимый объем воздуха , *м3/кг*, необходимый для полного сгорания 1 кг топлива, определяется по формуле

,

.

Теоретический объем трехатомных газов , *м3/кг,*

,

.

Теоретический объем азота , *м3/кг,*

,

где  - содержание азота в рабочей массе топлива, %.

.

Необходимый теоретический объем водяных паров , *м3/кг,*

,

.

Объем продуктов сгорания , *м3/кг,*

,

.

Объем избыточного кислорода, , *м3/кг,* поступающего с воздухом на сжигание топлива

,

где α - коэффициент избытка воздуха.

.

**1.2 Расчет печи кальцинации**

**1.2.1 Тепловой баланс печи**

Приход тепла:

1 Теплота сгорания топлива ,

,

где  - удельный расход топлива, *кг/кг* глинозема;

- низшая теплотворная способность топлива, *кДж/кг* топлива.

.

2 Физическое тепло топлива ,

,

где  - температура топлива, *°С*;

 - средняя теплоемкость топлива, *кДж/кг°С*.

Определяем среднюю теплоемкость топлива:

,

,

.

3 Теплосодержание сухого гидрата ,

,

где 1,53 - расход сухой гидроокиси алюминия для получения 1 кг γ или α-Al2O3, *кг/кг* глинозема;

 - средняя теплоемкость гидраргиллита, *кДж/кг°С*;

 - температура сухой гидроокиси алюминия, *°С*.

.

4 Теплосодержание внешней влаги в гидроокиси алюминия ,

,

где 1,53 - расход сухой гидроокиси алюминия на 1 кг глинозема, *кг/кг*;

 - содержание внешней влаги в гидроокиси алюминия, %;

 - теплоемкость воды, *кДж/кг°С*;

 - температура внешней влаги, *°С*. Принимается равной температуре гидроокиси алюминия.

.

5 Теплосодержание воздуха, поступающего в печь на сжигание топлива ,

,

где α - коэффициент избытка воздуха;

 - количество воздуха, теоретически необходимое для сжигания топлива, *м3/кг*;

 - удельный расход топлива, *кг/кг* глинозема;

 - содержание в общем объеме первичного и вторичного поступающего в печь воздуха, %;

 - средняя теплоемкость первичного воздуха, *кДж/ м3°С*;

 - средняя теплоемкость вторичного воздуха, *кДж/ м3°С*;

 - температура первичного воздуха, *°С*;

 - температура вторичного воздуха, *°С.*

.

6 Теплосодержание пыли из системы пылеулавливания ,

,

где  - количество пыли, поступающей в аппарат из системы пылеулавливания, *кг/кг* глинозема;

 - средняя теплоемкость пыли при данной температур в зависимости от фазового состава, *кДж/кг°С*;

температура пыли, *°С*.

.

Расход тепла:

1 Физическое тепло глинозема, выходящего из печи ,

,

где  - средняя теплоемкость глинозема при данной температуре, *кДж/кг°С*;

 - температура глинозема, *°С*.

.

2 Физическое тепло отходящих газов ,

,

где  - температура дымовых газов, *°С*;

 - средняя теплоемкость трехатомных газов, *кДж/м3°С*;

 - средняя теплоемкость водяных паров, *кДж/ м3°С*;

 - средняя теплоемкость азота, *кДж/ м3°С*;

 - средняя теплоемкость кислорода, *кДж/ м3°С*.



3 Тепло затраченное на реакцию дегидратации и перекристаллизации гидроокиси алюминия ,

,

где  - тепловой эффект реакции образования бемита из гидраргиллита, *кДж/кг* глинозема;

 - тепловой аффект реакции образования γ-Al2O3 из бемита, *кДж/кг* глинозема;

 - тепловой эффект реакции перекристаллизации при переходе из γ-Al2O3 в α-Al2O3, *кДж/кг* глинозема.

По закону Гесса тепловой эффект, реакций может быть вычислен как разность между суммой теплот образования продуктов реакций и суммой теплот образования исходных веществ.

Схематично процесс дегидратации и перекристаллизации гидроокиси алюминия может быть представлен следующим образом:



Таблица 1.2 – Стандартные теплоты образования

|  |  |
| --- | --- |
| **Формула соединения** | **Теплота образования из элементов, кДж/кг глинозема** |
|  | 25209,8333 |
|  | 19347,9412 |
|  | 16073,9902 |
|  | 16394,402 |
|  | 2806,4784 |

Тепловой эффект образования бемита из гидраргиллита



,

где  - стандартная теплота образования гидраргиллита, *кДж/кг*;

 - стандартная теплота образования бемита, *кДж/кг*;

 - стандартная теплота образования воды, *кДж/кг*.

.

Тепловой эффект образования γ-Al2O3 из бемита



,

где  - стандартная теплота образования γ-Al2O3, *кДж/кг*.

.

Тепловой эффект реакции перекристаллизации при переходе из γ-Al2O3 в α-Al2O3



,

где  - стандартная теплота образования α-Al2O3, *кДж/кг*.

.

При образовании 100 % α-Al2O3 из γ-Al2O3 тепловой эффект реакции составляет –320,4118 *кДж/кг*, тогда при образовании 10 % α-Al2O3 тепловой эффект реакции равен –32,0412 *кДж/кг*.

.

4 Затраты тепла на испарение влаги ,

,

где 0,53 - содержание кристаллизованной влаги в гидроокиси алюминия, *кг*;

2258,41 - скрытая теплота испарения воды, *кДж/кг.*

.

5 Затраты тепла на нагрев влаги до температуры отходящих газов ,

,

где 22,4 - объем занимаемый одной грамм-молекулой водяного пара;

18 - молекулярный вес воды;

 - средняя теплоемкость водяных паров при температуре отходящих газов, *кДж/м3°С*;

 - температура водяных паров, °С. Принимается равной температуре отходящих газов в холодном обрезе печи.

.

6 Затраты тепла с воздухом подсоса со стороны холодной головки вращающейся печи ,

,

где  - объем воздуха подсасываемого в печь, *м3/кг*. Принимается равным 11,7 % от теоретически необходимый объем воздуха;

 - средняя теплоемкость воздуха, при температуре дымовых газов, *кДж/м3°С*;

 - средняя теплоемкость подсасываемого воздуха, *кДж/м3°С*;

 - температура подсасываемого воздуха, *°С*.

.

7 Затраты тепла с пылью в систему газоочистки ,

,

где  - количество пыли в отходящих из печи газах, *кг/кг* глинозема;

 - средняя теплоемкость пыли при данной температуре в зависимости от фазового состава, *кДж/кг°С*;

 - температура пыли, *°С*.

.

8 Теплопотери в окружающую среду поверхностью оборудования ,

,

где 0,12 - потери в окружающую среду печью.

.

Таблица 1.3 – Тепловой баланс печи кальцинации

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Приход тепла** | **кДж/кг** | **Расход тепла** | **кДж/кг** |
| 1 Теплота сгорания топлива | 3985,396 | 1 Физическое тепло глинозема, выходящего из печи | 762,37 |
| 2 Физическое тепло топлива | 19,0045 | 2 Физическое тепло отходящих газов | 407,3144 |
| 3 Теплосодержание сухого гидрата | 75,6463 | 3 Тепло затраченное на реакцию дегидратации и перекристал­лизации гидроокиси алюминия | 684,3667 |
| 4 Теплосодержание внешней влаги в гидроокиси алюминия | 28,492 | 4 Затраты тепла на испарение влаги | 1580,887 |
| 5 Теплосодержание воздуха, поступающего в печь на сжигание топлива | 689,2915 | 5 Затраты тепла на нагрев влаги до температуры отходящих газов | 334,3324 |
| 6 Теплосодержание пыли из системы пылеулавливания |  | 6 Затраты тепла с воздухом подсоса со стороны холодной головки вращающейся печи | 386,5196 |
|  |  | 7 Затраты тепла с пылью в систему газоочистки | 612,7678 |
|  |  | 8 Теплопотери в окружающую среду поверхностью оборудования | 478,2476 |
| Итого | 5246,9483 | Итого | 5246,8055 |

**1.2.2 Определение температуры горения топлива**

Теоретическую температуру горения , рассчитывают по формуле:

,

где  - физическое тепло нагретого воздуха, *кДж/кг*;

 - физическое тепло топлива, *кДж/кг*;

 - количество тепла, расходуемого на диссоциацию RО2 и Н2О, *кДж/кг*;

 - потеря тепла от неполноты горения (в данном случае ), *кДж/кг*;

 - объем продуктов сгорания, *м3/кг*;

 - средняя теплоемкость продуктов сгорания, *кДж/м3°С*.

Физическое тепло воздуха при получении 1 кг Al2O3 определяется из формулы, *кДж/кг*,

,

.

Объем газов от горения 0,0955 кг мазута, м3:









 Итого 1,1563 *м3*

где 0,1562; 0,1431 и т. д. - количество продуктов сгорания, образующихся при горении 1 кг мазута.

Принимаем, что  равно 2200 ° С.

Тогда количество тепла, расходуемого на диссоциацию RО2 и Н2О , определяется по формуле:

,

где 12758,55 и 10810,2 - теплоты диссоциации RО2 и Н2О кДж/м3 (приведено к нормальным условиям);

0,03 и 0,18 - степени диссоциации, определяющиеся по графику.

.

Тепло продуктов сгорания при 2200 °С

,

,

,

Принимаем ; при этом .

Принимаем также .

Действительная максимальная температура газов в печи несколько ниже :

,

где  - пирометрический коэффициент, учитывающий реальные условия горения.

Для вращающихся трубчатых печей . Принимаем .

Тогда

,

округленно принимаем 1800 °С.

**1.2.3 Определение основных размеров печи**

Внутренний диаметр барабанной печи , определяется из условия оптимальной скорости движения газового потока в печи по формуле:

.

Принимаем, по данным практики, . Определяем действительное количество газов () при производительности печи 44 т/ч и газовом потоке 2,0779 м3/кг.

Секундное количество отходящих газов, м3/с:

,

при средней температуре газов в печи ,

,

.

Округленно получаем , при этом наружный диаметр .

Длину печи определяют из условия теплообмена в основных зонах печи. Ниже приводится метод зонального теплового расчета печи кальцинации (таблицы 1.4 и 1.5).

Принимаем потери тепла в окружающую среду, кДж: холодильник 40,651; I зона 80,8238; II зона 214,255; III зона 61,694; IV зона 44,477; V зона 36,3468.

Таблица 1.4 – Распределение материалов по зонам, кг

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Зона** | **Температура материала в начале зоны *t'м*, °С** | **Температура материала в конце зоны *t″м*, °С** | **Наименование** | **Твердый материал в слое *Gм*** | **Вода физическая *Gω*** | **Вода гидратная**  | **Пыль *Gп*** | **Всего твердого материала *Gм∙п∙з*** |
| I | 200 | 40 | Поступает: гидроокись пыль из зон II и III | 1,537+0,5350,295 | 0,210 | – | 0,550 | 2,917 |
| Выделяется | 0,535 | 0,210 | – | 0,300 | 0,835 |
| Выходит | 2,082 | – | – | – | 2,082 |
| II | 900 | 200 | Поступает | 2,082 | – | – | 0,150 | 2,232 |
| Выделяется | – | – | 0,532 | 0,550 | 1,082 |
| Выходит | 1,150 | – | – | – | 1,150 |
| III | 1200 | 900 | Поступает | 1,150 | – | – | – | 1,150 |
| Выделяется | – | – | – | 0,150 | 0,150 |
| Выходит | 1,000 | – | – | – | 1,000 |
| IV | 1050 | 1200 | Поступает | 1,000 | – | – | – | 1,000 |
| Выходит | 1,000 | – | – | – | 1,000 |
| V | 700 | 1050 | Поступает | 1,000 | – | – | – | 1,000 |
| Выходит | 1,000 | – | – | – | 1,000 |

Таблица 1.5 – Количества газов на границах зон I–V

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Материал** | **V** | **IV** | **III** | **II** | **II** |
| **поступает** | **выходит** | **поступает** | **выходит** | **поступает** | **выходит** | **поступает** | **выходит** | **поступает** | **выходит** |
| Топливо, кг | 0,0955 | 0,0955 | 0,0955 | – | – | – | – | – | – | – |
| Воздух, кг | 1,0608 | 1,0608 | 1,0608 | – | – | – | – | – | – | – |
| RO2, м3 | – | – | – | 0,1562 | 0,1562 | 0,1562 | 0,1562 | 0,1562 | 0,1562 | 0,1562 |
| H2O, м3 | – | – | – | 0,1431 | 0,1431 | 0,1431 | 0,1431 | 0,8051 | 0,8051 | 1,0647 |
| N2, м3 | – | – | – | 0,8241 | 0,8241 | 0,8241 | 0,8241 | 0,8241 | 0,8241 | 0,8241 |
| O2, м3 | – | – | – | 0,0329 | 0,0329 | 0,0329 | 0,0329 | 0,0329 | 0,0329 | 0,0329 |
| Итого | 1,1563 | 1,1563 | 1,1563 | 1,1563 | 1,1563 | 1,1563 | 1,1563 | 1,8183 | 1,8183 | 2,0779 |
| Пыль, кг | – | – | – | – | – | 0,150 | 0,150 | 0,550 | 0,550 | 0,300 |

Количество тепла, получаемое или отдаваемое материалом, определяется как разность между количествами энергии, полученными материалом к началу и к концу зоны.

Зона I.

Общий расход энергии на нагрев материала к концу зоны I, ,

,

.

Общий расход энергии на нагрев материала к началу зоны I, ,

,

.

Общее количество тепла, , которое необходимо передать материалу:

,



в том числе  - количество тепла, которое, затрачивается на превращение и нагрев неразложившихся исходных веществ и твердых продуктов реакции .

Зона II

,

.

,







Зона III

,





,



Зона IV







Зона V







Таблица 1.5 – Исходные данные для расчета температур газового потока по зонам

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **I** | **II** | **III** | **IV** | **V** |
| , кДж/кг | 1074,1065 | 2483,6644 | 407,7944 | –113,978 | –266,11 |
| , кДж/кг | 80,8238 | 214,255 | 61,694 | 44,477 | 36,3468 |

При последовательном расчете температур газового потока на границах зон известны его начальная температура  и энтальпия . Из расчета находим конечные энтальпию  и температуру :

,

где  - количество тепла, которое газовый поток получил или отдал в данной зоне, *кДж/кг*.

**1.2.4 Температуры газового потока на границах зон**

При сгорании топлива в условиях вращающейся печи не все выделяющееся тепло идет на нагрев продуктов сгорания, часть его передается излучением в зоны, примыкающие с обеих сторон к зоне горения, а также поступает в зону I вследствие рециркуляции продуктов сгорания. Поэтому действительная температура газового потока в зоне горения ниже . Остальные зоны печи также отдают тепло излучением соседним зонам, имеющим более низкую температуру.

При определении энтальпии и температуры газового потока в остальных зонах печи, кроме V и I, необходимо вводить поправку, учитывающую прямую отдачу тепла газовым потоком и степень равномерности его температуры. Такая поправка является функцией критерия *Во*.

Для зоны II вращающейся печи величину , определяют по формуле:

,

где  - количество тепла, отданное в зону I, *кДж/кг*;

 - количество тепла, выделившееся в зоне в результате сгорания топлива, *кДж/кг*;

 -количество тепла, полученное или отданное материалом, *кДж/кг*;

 - потери тепла в окружающую среду, *кДж/кг*;

,

,

,

где  - производительность печи, *т/ч*.

 - теоретическая температура горения, К;

 - диаметр печи внутренний, *м*.

Для зоны III из формулы исключается величина z, а для остальных зон она принимает вид:

.

Определяем значения критерия *Во*, *γ* и *х* для II–IV зон







Переходим к расчету газового потока отдельных зон.

Зона V. Начальную энтальпию газового потока , определяем по формуле:

,

где  - энтальпия глинозема, выходящего из печи и холодильника, *кДж/кг*;

 - энтальпия воздуха, выбрасываемого из холодильника, *кДж/кг*;

 - потеря тепла в окружающую среду холодильником, *кДж/кг*;

 - физическое тепло топлива, поступающего в печь, *кДж/кг*;

 - энтальпия воздуха, поступающего на установку, *кДж/кг*.

.

Начальная температура газового потока определяется методом подбора.

Энтальпия газового потока при 400 и 500 °С, *кДж/кг*:

,

,

,

.

Температура воспламенения газа 1000° С, определяем при этой температуре энтальпию газового потока ,

.

Разность энтальпий газового потока на границах зон ,

,

.

Газовый поток в зоне V получает тепло от охлаждающегося глинозема  и из соседней зоны путем рециркуляции продуктов сгорания и прямой отдачи.

Количество тепла, , получаемое из соседней зоны:

,



Зона IV

,



Зона III

,



Зона II

,



Зона I

,



Определяем температуры газовых потоков.

Зона IV. Энтальпия газового потока:

при 1700 °С



при 1600 °С



.

Зона III. Энтальпия газового потока:

при 1500 °С



при 1400 °С



.

Зона II. Энтальпия газового потока:

при 700 °С



при 600 °С



.

Зона I. Энтальпия газового потока определяется при температуре 250 °С, т.к. ,



Определяем средние температуры материала , по зонам:

,

Зона I.



Зона II.

Зона III.



Зона IV.



Зона V.



Определяем средние температуры газового потока , по зонам:

,

Зона I.



Зона II.

Зона III.



Зона IV.



Зона V.



Определяем состав газовой фазы по зонам.

Зона III: , ,  (при α=1,15), .

Зона II: , 

,

.

Зона I: , 

,

.

Определяем скорость движения материала в печи, коэффициент заполнения печи материалом, значения  и  по зонам.

Скорость движения материала в печи , определяем по формуле:

,

где  - угол наклона печи. При  принимаем, что ;

 - число оборотов печи, *об/мин.* Принимается равным.



Коэффициент заполнения печи материалом  определяем из формулы:

,

где  - среднее количество материала, проходящего через зону, т/ч;

 - средняя объемная масса материала в зоне, т/м3;

 - время работы печи в сутки, ч.

Зона I

,

,

.

Площадь сегмента , (части печи, заполненной материалом):

,

.



где  - центральный угол сегмента, град.

При 



При 



.

,

.

Эффективная длина лучей газового потока ,

,

где  - периметр свободного сечения печи, *м*;

 - площадь свободного сечения печи, *м*.

Определяем периметр свободного сечения печи:



.

Площадь свободного сечения печи определяется по формуле:

,

,

.

Зона II





















Зона III.











Чтобы определить α, задаемся  и .

При 



При 















Зона IV (в зоне V те же значения).





















.

Полученные значения , , ,  сводим в таблицу 1.6 (туда же значения  и , которые рассчитываются ниже).

Таблица 1.6 – Сводные данные

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Зона** | ***φ*, %** | ***lx*, *м*** | ***lд*, *м*** | ***Sэфф*, *м*** | ***εг*** | ***lд.ф*., *м*** |
| I | 11,23 | 3,0 | 3,39 | 3,3 | 0,659 | 9,18 |
| II | 9,41 | 2,86 | 3,18 | 3,35 | 0,536 | 9,39 |
| III | 7,4 | 2,66 | 2,91 | 3,4 | 0,279 | 9,66 |
| IV и V | 7,57 | 2,68 | 2,94 | 3,4 | 0,25 | 9,63 |

Длина дуги футеровки ,

,

Определяем степень черноты газов по формуле:

,

где  - степень черноты излучения диоксида углерода;

 - условная степень черноты излучения водяных паров без поправки на их парциальное давление;

 - поправочный множитель для получения степени черноты водяных паров.

Значения  находятся по графикам в зависимости от температуры и значения  и  [2, рисунок 19-21].

Зона I.







Зона II.







Зона III.







**1.2.5 Определение длины зон**

Длину зон определяем из условия теплообмена.

Зона V.

Средняя скорость газового потока

,



Критерий Рейнольдса:

,

где  - кинематическая вязкость газов при средней температуре.



Критерий Нуссельта:

,



Коэффициент теплоотдачи конвекцией, ,

,

где  - коэффициент теплопроводности газа, *кДж*/(*м·ч·°С*).



Время пребывания частиц материала на футеровке ,

,

.

Время пребывания частиц материала на открытой поверхности слоя ,

,

.

Изменение температуры материала при контакте с футеровкой ,

,



Количество тепла , отдаваемого материалом теплопроводностью:

,



.

Изменение температуры материала , при контакте с газовым потоком:

,



Количество тепла, отдаваемого материалом конвекцией ,

,





Количество тепла, отдаваемого материалом лучеиспусканием ,







Решая уравнение методом подбора, получаем , тогда .

Общее количество тепла , отдаваемое материалом в зоне V:

,

,

Длина зоны ,

,



Длину зоны IV (зоны горения) не рассчитываем, так как обычно ее длина равна длине факела, по опытным данным принимаем  равную 7,0 м [2].

Зона III.



















Количество тепла , отдаваемого материалом теплопроводностью:

,







Количество тепла, отдаваемого материалом конвекцией ,

,





Количество тепла, отдаваемого материалом лучеиспусканием ,





Решая уравнение методом подбора, получаем , тогда .

,



Зона II.

Тепловые потоки ,  и  определяются расчетом теплообмена в рабочем пространстве печи по формулам:

а) тепловой поток на открытую поверхность шихты , (излучение от газов и кладки):

,

где  - приведенный коэффициент излучения от газов и кладки на шихту, .

Определяем приведенный коэффициент излучения от газов и кладки на шихту:

,

где  - степень развития кладки.

Степень развития кладки определяется по следующей формуле:

,







б) тепловой поток на закрытую поверхность шихты , (излучение от кладки):

,

где  - приведенный коэффициент излучения от кладки на шихту, .

 - абсолютная средняя температура кладки, *К*.

Определяем приведенный коэффициент излучения от кладки на шихту:

,

где  - степень черноты кладки; принимаем .



Средняя температура кладки ,

,





в) тепловой поток передаваемый на шихту конвекцией ,

,

где  - условная скорость газов в печи, при нуле градусов Цельсия, *м/с*.

Определяем условную скорость газов в печи:

,





Общий тепловой поток ,

,





Зона I.

Длину зоны сушки , подсчитывают по формуле:



где  - производительность печи по гидроокиси алюминия с учетом оборотной пыли, т/ч;

 - содержание влаги в исходном и конечном гидрате, доли ед. В данном случае ,  (таблица 1.4).

 - допустимое напряжение рабочего пространства сушильной зоны печи по удаляемой влаге, *т*/(*м3·ч*); принимаем .

Тогда



Полная длина печи составит:



Принимаем стандартную печь, изготовляемую отечественной промышленностью размером 4,5×110 м.

**1.3 Выбор форсунки**

Выбор газомазутной форсунки осуществляется исходя из значения расхода топлива. Для данного типа печей необходимо использовать одну форсунку, таким образом, выбираемая форсунка должна быть рассчитана на полный расход топлива. В качестве основного топлива на форсунке используется мазут марки М 40, в качестве резервного газ. Исходя из выше сказанного в соответствии с литературой [6], была выбрана форсунка производительностью от 4 до 6 т/ч. Общий вид форсунки приведен на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Газомазутная форсунка