**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ НЕФТИ И ГАЗА им. И.М. ГУБКИНА**

**КАФЕДРА ГАЗОХИМИИ**

**ГРИГОРЬЕВА Н.А., ЖАГФАРОВ Ф.Г.**

**ПИРОЛИЗ УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ**

**Методические указания по выполнению курсового проектирования по курсу «Технология углеводородных газов»**

**Под редакцией проф. Лапидуса А.Л.**

**Москва - 2006**

1. **ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

Курсовой проект по технологии углеводородных газов выполняется в соответствии с учебным планом и имеет своей целью закрепление студентами знаний, полученных при изучении теоретического курса, более глубокое ознакомление с технологией конкретных производств, приобретение навыков по расчету и проектированию технологических установок и основных аппаратов.

Курсовой проект оформляется в виде пояснительной записки и технологической схемы процесса, выполненной в формате А3 и включаемой в состав расчетно-пояснительной записки.

Расчетно-пояснительная записка оформляется с соблюдением требований, содержащихся в методических указаниях [1].

Исходные данные для расчета курсового проекта студент берет из материалов, полученных при прохождении производственной практики.

**II. СТРУКТУРА РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ**

**2.1. Титульный лист**

**2.2. Оглавление**

**2.3. Введение**

Значение процесса пиролиза, основные направления использования этилена и других продуктов пиролиза.

**2.4. Литературный обзор**

Краткий обзор литературы по методам проведения процесса пиролиза: сырье процесса, физико-химические основы процесса, особенности технологического оформления.

**2.5. Технологическая схема процесса пиролиза.**

Описание технологической схемы с указанием технологических режимов и назначения отдельных аппаратов

**2.6. Расчет материального баланса**

**2.7. Расчет тепловых балансов**

**2.8. Расчет основного оборудования**

**2.9. Список использованной литературы**

1. **Расчет материального баланса процесса пиролиза**

***Исходные данные (из приложения 1)***

1)Производительность установки по товарному этилену ***Gтэ т/год (задается преподавателем – руководителем курсового проекта).***

2)Число часов работы установки в году ***n, ч****.*

3)Потери этилена в отделении пиролиза и газоразделения ***П, % масс.***

4)Коэффициент извлечения этилена ***К, %***

5)Состав газа пиролиза нефтяного сырья:

6) Cостав газа пиролиза газообразного сырья:

1. Производительность установки по этилену с учетом потерь:

***Gгод’=Gтгод 100/(100-П) , т/год,***

***где Gтгод- производительность установки по товарному этилену, т/год***

***П – потери этилена в отделении пиролиза и газоразделения, % масс.***

# 2. Мощность с учетом глубины отбора:

***Gго= Gгод’/К , т/год***

***где К – коэффициент извлечения этилена, %***

3. Часовая производительность установки по этилену:

***Gэ= Gго 1000/n , кг/ч***

***где n – число часов работы установки в году, ч***

4. Часовой расход бензина:

***Gбенз=, кг/ч***

***где Хбс2н4 и Хбс2н6 – массовая доля этилена и этана пиролиза бензина соответственно***

***Хэтс2н4 – массовая доля этилена в продуктах пиролиза этана***

***у – конверсия этана***

# 5. Часовая загрузка этановой печи

***G’Э=кг/ч***

*где уэт – конверсия этана*

*Gвыхэт= G’Экг/ч*

***Gрецэт= G’Э - Gвыхэт, кг/ч***

***где Gрецэт – количество рециркулирующего этана***

*Gвыхэт – количество выходящего этана*

# Выполненные расчеты приведены в таблице 1.

 Таблица 1

# Материальный баланс установки пиролиза бензина

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **выход****прод.** | **выход при пиролизе бензина** | **выход при пиролизе этана** | **всего с уст-ки** | **Выход на пропущенный бензин** |
| **комп-ты** | **кг/ч**  | **%масс** | **кг/ч** | **%масс** | **кг/ч** | **%масс** | **кг/ч** | **%масс** |

**4. Расчет теплового эффекта процесса пиролиза**

***Исходные данные:***

1) Компонентный состав бензиновой фракции, поступающий на установку пиролиза

2) Состав пироконденсата

3) Выход пироконденсата, % масс на бензин

4) Состав тяжелой смолы пиролиза (выход 4,4 %масс на бензин)

***Qp=(), ккал/ч***

***где ΔНf – теплота образования вещества, ккал/моль***

***Ni – мольная доля вещества***

# В расчете на 1 кг пиролизуемого бензина

***Q=Qp/Gб , ккал/кг, кДж/кг.***

**5. Расчет трубчатого реактора пиролиза**

***Исходные данные:***

1. Производительность печи по сырью ***G****, кг/ч*
2. Температура бензина на входе ***Т1****, К*
3. Температура парогазовой смеси на выходе ***Т2****, К*
4. Разбавление водяным паром , % масс на сырье.
5. Количество водяного пара ***Z, кг/ч***

**5.1 Расчет процесса горения*.*[**2, стр 155**]**

Состав топлива

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| ***комп-ты*** | ***мол.масса*** | ***об.доля*** | ***М\*r*** | ***%масс,q*** |
| СН4 | 16 |  |  |  |
| Н2 | 2 |  |  |  |
| *итого* |  | Mrср.=11.8 | 100.00 |

Низшая теплота сгорания топлива: [2, стр 155]

*Qнр=360,33 CH4+251,2 H2,*

Где СН4, Н2 – содержание соответствующих компонентов в топливе, % об.

Плотность газа при н.у. 

*Qнр= Qнр/ρ*

Элементарный состав топлива в % масс.

****

*ni –* число атомов углерода в данном компоненте топливе.

Содержание углерода: 

Содержание водорода: 

*mi –* число атомов водорода в данном компоненте топлива.

*Mi-* молекулярная масса.

*Проверка: С+Н=100 %масс.*

Теоретическое количество воздуха, необходимое для сжигания 1 кг газа:



Коэффициент избытка воздуха для газовых горелок акустического типа (АГГ) составляет 1,05-1,08;

Количество продуктов сгорания, образующихся при сжигании 1 кг топлива:

 

 */кг*

* *

* *

Суммарное количество продуктов сгорания: 

*Проверка:* 

Суммарный объем продуктов сгорания:

Плотность продуктов сгорания при н.у.: 

Энтальпия продуктов сгорания на 1 кг топлива при различных температурах находим по уравнению:



Т – температура продуктов сгорания,

Сi – средняя массовая теплоемкость продуктов сгорания, кДж/кгК

В результате расчета получены следующие данные:

|  |  |
| --- | --- |
| *T, K* | *qt, кДж/кг* |
| 273 |  |
| 300 |  |
| 500 |  |
| 700 |  |
| 1100 |  |
| 1500 |  |
| 1900 |  |

Определение числа печей [2]



- простой печи, ч

- простой цеха, ч

## 5.2. Полезная тепловая нагрузка печи [8, стр320]

### **Расход тепла на реакцию пиролиза**



***Расход тепла на подогрев бензина*** от 100 0С (373 К) до 1750С (448К).



,- энтальпии бензина при соответствующих температурах[9].

***Расход тепла на испарение бензина***



***Расход тепла на подогрев паробензиновой смеси*** от 1750С (448 К) до 5070С (780 К)



[9]

[9]

 ***Расход тепла на подогрев парогазовой смеси*** от 5070С (780 К) до 8350С (1108 К)



***Расход тепла на подогрев химически очищенной воды*** для ЗИА от 1200С (393 К) до 1800С (453 К) [10]



Полезное тепло печи:



Количество радиантного тепла печи:



5.3. Расчет радиантной камеры.

***КПД печи, расход топлива*** [2,cтр 209]



Потери тепла печью в окружающую среду *qпот* примем равными 7% от рабочей теплоты сгорания топлива *Qнр*, в том числе, в камере радиации 5%, в камере конвекции 2%.

Примем температуру уходящих из печи дымовых газов *Тух=528 К,* тогда по графику *q-T* [2,рис 2.16] найдем их энтальпию: *qух, кДж/кг*

Расход топлива:



*Определение температуры дымовых газов, покидающих радиантную камеру*

# Из уравнения теплового баланса топки



- КПД топки, равный 1-0,05=0,95

Энтальпия уходящих из нее дымовых газов



По графику зависимости *q-Т* [2,рис 2.16] этой энтальпии соответствует температура *Тп К (0С)*

###### Поверхность нагрева радиантных труб и размеры камеры радиации

# Поверхность нагрева радиантных труб

*Fp=Qp/qp*

*qp-*теплонапряжение радиантных труб, принимаем *qp=80 кВт/м2* [11,стр105]

Выбираем змеевик типа [11,стр147]

Он состоит из 10 труб. Первые 4-ре трубы с диаметром D= 658 мм объединены в два D = 114 9мм, и эти две в одну трубу D= 1599,5 мм. Труб большего диаметра в змеевике четыре.

Длина прямого участка трубы 12,2 м, общая длина 13 м.

Общая длина змеевика 78 м.

Материал всех труб НК-40, (25% Сu, 20%Ni, 0.35-0.45% C). Предельно допустимая температура стенки труб 1040С. Трубы изготовлены методом центробежного литья. Поверхность нагрева конвекционных змеевиков 2952 м2, радиантных –206 м2.

Поверхность нагрева одного змеевика

*Fp=4 0,065 *

Число параллельных потоков сырья в печи (для одной камеры) или число змеевиков

принимаем *n=*

Шаг размещения труб *S=2dn*

Число труб в одной камере радиации *т=4\*10=40*

Высота радиантной камеры *h=lтр=13м*

Ширина радиантной камеры *а=2ат+dn,* где *ат*- расстояние от излучающих стен до трубного экрана, *ат=0,6 – 1*, принимаем *ат=1,0*

*а=2 1,0+0,159=2,159м*

Длина радиантной камеры *в=(m-1)S+2lт,* где *lт-* расстояние от крайних труб до стен топки *lт=0,3м*

*В=(20-1)2 0,065+(10-1)0,114 2+(20-1)2 0,159+2 0,3=11,2м*

Объем камеры радиации *Vt=h a b=13 2,159 11,2=256,1 м3*

# Теплонапряжение топочного объема печи



Для обеспечения равномерного обогрева каждой трубы экрана по окружности и по длине, принимаем для проектируемой печи, газовые горелки акустического типа [11, стр 149]. Устанавливаем 24 горелки типа АГГ –2 по 12 штук в обеих боковых стенах радиантной камеры, в три яруса по 4-ре штуки в каждой.

Характеристика АГГ –2:

Тепловая мошность 160 – 500 кДж/ч,

Диапазон расхода топлива 50 – 150 м3/ч,

Коэффициент избытка воздуха 1,05 – 1,08,

Позволяют использовать газ смешанного состава.

Кинетический расчет радиантной части змеевика реактора.

Часть рабочей поверхности нагрева, приходящаяся на зону реакции в змеевике

м2

На зону реакции приходится 

Объем зоны реакции



Определение молекулярной массы бензина см. в Приложении 5.

Коэффициент увеличения объема газообразной реакционной смеси в результате реакции



Весовое соотношение водяного пара и углеводородов в сырье Z=0.5

Объем паров бензина, подаваемого в реактор

/*ч*

*V1*– количество бензина проходящее через один змеевик в одной камере печи в 1 час.

# Температура на выходе из зоны реакции *835 С*

Среднее абсолютное давление в зоне реакции змеевика *Р=3 атм.*

**Расчет времени пребывания парогазовой смеси в зоне реакции** [2]



Массовая скорость парогазовой смеси в трубах *D=0.1590.0095 м*



Площадь поверхности нагрева трубы *D=0.1590.0095 м*

*Fp=0.159 12.2=6.1м2*

*Fp’=4 6.1=24.4м2*

*24,4-22,0=2,4м2 , Lлишняя=2,4/0,159=4,8м*

На основании литературных данных [2, стр125] перепад давления в реакционном змеевике составляет *245 103 – 343 103Па*

Принимаем = 335 103

Давление на выходе из реактора Рк=160 103

Давление в начале змеевика

*Рн=Рк+=160 103+335 103=495 103Па*

На зону реакции приходится 3 трубы *D=0.1590.0095м* и *7,3 м* от 4-ой трубы *D=0.159.*

Плотность парогазовой смеси в начале зоны реакции при н.у.



*где: Мвх=Мпг0,667+Мвода 0,333*

При Т=973 К, Р=270 103Па



Плотность парогазовой смеси в конце реакционной зоны

*Т=1108 К*

*Р=160 103Па*.



Линейная скорость парогазовой смеси

В начале зоны реакции 

В конце зоны реакции 

Средняя скорость 

Длина зоны реакции 

Время контакта 

Объем зоны реакции



Число требуемых труб в зоне реакции змеевика

Объем трубы *D=0.1590.0095м*

*V=d2внLтр/4=0,785 0,142 12,2=0,19м3*

*V’=4 0.19=0.75м3 0,75-0,25=0,23м3 –* лишний объем

*Lлишн=0,23/0,7850,142=7,9м*

Следовательно на зону реакции приходится 3 трубы *D=0.1590.0095м.*

## 5.4. Расчет камеры конвекции

# Тепловая нагрузка камеры конвекции

*Qk=Qполезн+Qp, кВт*

Тепло Qk расходуется на:

* подогрев бензина от 100 С до 175 С
* испарение бензина
* подогрев паробензиновой смеси от 175 С до 507 С
* подогрев химически очищенной воды для ЗИА от 120 С до 180 С

В камере конвекции имеются три змеевика, расположенные снизу вверх:

* змеевик для нагрева паробензиновой смеси от 175 С до 507 С,
* змеевик для нагрева химически очищенной воды для ЗИА от 120 С до 180 С,
* змеевик для нагрева и испарения бензина.

*Змеевик для нагрева паробензиновой смеси от 175 С до 507 С*

Расчет конечной температуры дымовых газов *t1*

*Qk=Qn=B Cpm (Tnep-t1)*

*Cpmдг=* *кДж/кгК*

*T1=Tnep-*

 Поверхность нагрева конвекционных труб



Коэффициент теплопередачи в конвекционной камере



Коэффициент теплоотдачи излучением от 3-х атомных газов к трубам рассчитываются по уравнению Нельсона



Средняя температура дымовых газов





Коэффициент теплоотдачи конвекцией при шахматном расположении труб



*Е=f(tcp)*, по графику [15,стр473] находим *Е=23,2*

Массовая скорость движения газов



В- расход топлива, кг/ч

Свободное сечение для прохода дымовых газов

*F=[(n-1)S1+2a-nd]l*

Принимаем число труб в одном горизонтальном ряду *п=8,*

Размер труб *D=0.1020.006м* из стали 1218НТ,

Расстояние между осями труб *S1=2d=0.25м*

Расстояние по оси крайней трубы до стенки *а=S1/2=0.125м*

Длина трубы *l=9м*

*F=[(8-1)0,25+20,125-8 0,102]9=10,66 м2*



=*37,97Вт/м2К*

*К*

Средний температурный напор



Поверхность нагрева конвекционных труб зоны нагрева паробензиновой смеси от 175 С до 507 С



Число труб  принимаем 166 труб

Число рядов *м=166/8=21*

Высота зоны нагрева *h=(m-1)S2, S2=S131/2/2=0.22м*

*h=(21-1)0.22=4м*

Ширина камеры конвекции *Qk=(n-1)S1+3d=2м*

*Змеевик для нагрева химически очищенной воды для ЗИА от 120С до 180С*

*Cpm=*,*кДж/кгК*

*T2=Tnep-*

 Поверхность нагрева конвекционных труб



Средняя температура дымовых газов



*Е=f(tcp)*, по графику [15,стр473] находим *Е=22*

Выбираем трубы D=0,0790,009м сталь 20

Расстояние между осями труб *S1=2d=0.16м*

Расстояние по оси крайней трубы до стенки *а=S1/2=0.08м*

Длина трубы *l=9м*

*F=[(12-1)0,16+2 0,08-12 0,079]9=8,75 м2*



=*46,3Вт/м2К*

*К*

Средний температурный напор



Поверхность нагрева



Число труб  принимаем 55 труб

Число рядов *м=55/12=5*

Высота зоны нагрева *h=(m-1)S2, S2=S131/2/2=0.14м*

*h=(5-1)0.14=0,5м*

*Змеевик для нагрева и испарения от 100 С до 175 С бензиновой фракции*

Расчет конечной температуры дымовых газов *t1*

*Tух=T2-*

Средняя температура дымовых газов



*Е=f(tcp)*, по графику [15,стр473] находим *Е=19,3*

Выбираю трубы D=0,1020,006м сталь 1218НТ

Число труб в одном горизонтальном ряду *п=8*

Расстояние между осями труб *S1=2d=0.25м*

Расстояние по оси крайней трубы до стенки *а=S1/2=0.125м*

Длина трубы *l=9м*

*F=[(8-1)0,25+2 0,125-8 0,102]9=10,66 м2*



=*32,9Вт/м2К*

*К*

Средний температурный напор



Поверхность нагрева



Число труб  принимаем 170 труб

Число рядов *м=22*

Высота зоны нагрева *h=(m-1)S2, S2=S131/2/2=0.22м*

*h=(22-1)0.22=4,62м*

Общая высота камеры конвекции

*H=4+0.5+4.62=9.46м*

## 6. Расчёт ЗАКАЛОЧНО-ИСПАРИТЕЛЬНОГО АППАРАТА (ЗИА)

Расчёт для одной камеры печи.

***Исходные данные:***

1. Количество парогазовой смеси на входе в ЗИА: *G пг , кг/ч* в том числе:

*Gпг , кг/ч* - количество пирогаза

*Gвп, кг/ч* - количество водяного пара

1. Температура пирогаза

на входе в первую зону ЗИА *Т1', К*

на выходе из первой зоны ЗИА *Т2', К*

на выходе из второй зоны ЗИА *Т4', К*

на выходе из третьей зоны ЗИА *Т6', К*

1. Температура химически очищенной воды (оС)

на входе в первую зону ЗИА *Т1', К*

на выходе из первой зоны ЗИА *Т2', К*

на входе во вторую зону ЗИА *Т3', К*

на выходе из второй зоны ЗИА *Т4', К*

на входе в третью зону ЗИА *Т5', К*

на выходе из третьей зоны ЗИА *Т6', К*

**Расчёт:**

 Принимаем [11, с.119-120]:

Массовую скорость паров пирогаза на входе в ЗИА: *W=60кг/(м2. с)*

Размер трубы *ф 32х3.5 мм* [11, с.119-120]:

Секундный расход паров *G пг =Gмб/3600, где*

*Gмб – количество пирогаза по материальному балансу, кг*

*G пг =30000/3600=8.4 кг/с*

Площадь свободного сечения всех трубок *fп = G пг /W=8.4/60 = 0,14 м2*

Площадь свободного сечения одной трубки

*f1= r2 =   м2*

Количество труб в трубном пучке *n = fn/f1*

тепловая нагрузка ЗИА *Q= G пг(qt вх - qt вых)*

##### Расчет энтальпии парогазовой смеси на входе и выходе см. в приложении 6.

*Q ,кВт*

Количество водяного пара высокого давления, вырабатываемого в ЗИА:

*Gвп в.д.= Q/r* ,

где теплота парообразования при *Т=324.5 , Р=12 МПа*

*r = 1167.8 кДж/кг* [9]

Количество котловой воды для получения водяного пара высокого давления

*Gводы=  Gвп в.д*

Средний температурный напор [ 2 ,cтр.135]

*tср=  К*

Коэффициент теплопередачи

*к = * ,

где толщина стенки *cт=0.0035 м*

Коэффициент теплопроводности стали*ст=38 Вт/(м К)* [12,c.516]

Коэффициент теплоотдачи от пирогаза к внутренней поверхности трубы

**[ 2,c.113]

Средняя температура пирогаза в ЗИА:

*Тср= К*

Принимаем критерий *Pr* [11, c.133]

Плотность пирогаза при н.у. *н.у. = 1.14 кг/м2*

Скорость пирогаза

*Wпг= W/ср , где W=60 кг/(м2 с)*

*кг/м3*

Критерий Рейнольдса

*Re= *

С целью некоторого упрощения расчёта кинематическую вязкость паров пирогаза принимаем равной  этана:

*ср=3.4 10-5 м2/с* [ 11 ,c. 29]

Теплопроводность пирогаза [ 2 ,c.138]

*1= Вт/(м К)*

Коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности трубы к кипящей воде [ 11, c.138]

**

где давление генерируемого пара *рп=12 МПа*

теплонапряжённость поверхности принимаем *q*

Коэффициент теплопередачи при отсутствии оребрения и чистых поверхностях труб

*к = Вт/(м2 . К)*

Необходимая поверхность теплообмена

*F= м2*

(сравнить с каталогом)

#  **Приложения**

#  Приложение 1

***Исходные данные для расчета***

1)Производительность установки по товарному этилену ***Gтэ 300000 т/год.***

2)Число часов работы установки в году ***n, 8000 ч****.*

3)Потери этилена в отделении пиролиза и газоразделения ***П,1,5 % масс.***

4)Коэффициент извлечения этилена ***К,80 %***

5)Состав газа пиролиза бензина:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| компонент | Хi1 | Хi2 | Хi3 |
| водород | 0,009 | 0,009 | 0,009 |
| метан | 0,165 | 0,165 | 0,165 |
| СО | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005 |
| СО2 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| ацетилен | 0,003 | 0,003 | 0,003 |
| этилен | 0,27 | 0,27 | 0,27 |
| этан | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| пропан | 0,006 | 0,006 | 0,006 |
| пропилен | 0,155 | 0,155 | 0,155 |
| аллен | 0,007 | 0,007 | 0,007 |
| бутан | 0,032 | 0,032 | 0,032 |
| суммарные бутены, в т.ч. | 0,037 | 0,037 | 0,037 |
| бутен-1 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| бутен-2 | 0,012 | 0,012 | 0,012 |
| цис,транс-бутены | 0,015 | 0,015 | 0,015 |
| бутадиен | 0,003 | 0,003 | 0,003 |
| фракция С5 | 0,009 | 0,009 | 0,009 |
| фракция С6 | 0,006 | 0,006 | 0,006 |
| **жиз.продукты, в т.ч.** | 0,2145 | 0,2145 | 0,2145 |
| легкая смола | 0,1695 | 0,1695 | 0,1695 |
| тяжелая смола | 0,045 | 0,045 | 0,045 |
| кокс+потери | 0,032 | 0,032 | 0,032 |
| итого | 1 | 1 | 1 |

6) Cостав газа пиролиза этана:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| компонент | Хi1 | Хi2 | Хi3 |
| водород | 3,3 | 3,3 | 3,3 |
| метан | 6,5 | 6,5 | 6,5 |
| со | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| со2 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| ацетилен | 0,22 | 0,22 | 0,22 |
| этилен | 44 | 44 | 44 |
| этан | 41 | 41 | 41 |
| пропилен | 1 | 1 | 1 |
| пропан | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| бутан | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| бутен | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| бутадиен | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| жид.прод | 2,6 | 2,6 | 2,6 |
| итого | 100 | 100 | 100 |

Приложение 2.

Компонентный состав бензиновой фракции, поступающий на установку пиролиза

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *комп-ты* | *сод-ие. Х1.% масс* | *сод-ие. Х2.% масс* | *сод-ие. Х3.% масс* | *мол.масса* | *кол-во* | *Ni, кмоль/ч* | *тепл.обр-я ккал/кг* | *Ni\*H1108* |
| бутан | 0,61 | 0,61 | 0.61 |  |  |  | -37370 |  |
| пентан | 6,64 | 6,64 | 6.64 |  |  |  | -43330 |  |
| гексан | 8,69 | 8,69 | 8.69 |  |  |  | -49340 |  |
| гептан | 8,72 | 8,72 | 8.72 |  |  |  | -55330 |  |
| октан | 6,09 | 6,09 | 6.09 |  |  |  | -61320 |  |
| нонан | 2,12 | 2,12 | 2.12 |  |  |  | -67320 |  |
| изопентан | 2,57 | 2,57 | 2.57 |  |  |  | -44990 |  |
| 3метилпентан | 2,3 | 2,3 | 2.3 |  |  |  | -50400 |  |
| 2метилгексан | 6,95 | 6,95 | 6.95 |  |  |  | -57040 |  |
| 2.3-диметилгексан | 2,8 | 2,8 | 2.8 |  |  |  | -64710 |  |
| 2-метилоктан | 2,75 | 2,75 | 2.75 |  |  |  | -68640 |  |
| 2-метилгептан | 3,34 | 3,34 | 3.34 |  |  |  | -63000 |  |
| 2.3-диметилгептан | 3,61 | 3,61 | 3.61 |  |  |  | -70510 |  |
| циклопентан | 1,32 | 1,32 | 1.32 |  |  |  | -26870 |  |
| метилциклопентан | 6,23 | 6,23 | 6.23 |  |  |  | -34560 |  |
| 1.2-диметилциклопентан | 5,08 | 5,08 | 5.08 |  |  |  | -42230 |  |
| 1.1.3-триметилциклопентан | 5,84 | 5,84 | 5.84 |  |  |  | -41110 |  |
| циклогексан | 3,08 | 3,08 | 3.08 |  |  |  | -37000 |  |
| метилциклогексан | 7,34 | 7,34 | 7.34 |  |  |  | -44750 |  |
| этилциклогексан | 1,96 | 1,96 | 1.96 |  |  |  | -49670 |  |
| 1.3-диметилциклогексан | 3,89 | 3,89 | 3.89 |  |  |  | -51100 |  |
| 1-метил.4-этилциклогексан | 1,87 | 1,87 | 1.87 |  |  |  | -42000 |  |
| бензол | 0,31 | 0,31 | 0.31 |  |  |  | 14660 |  |
| метилбензол | 1,83 | 1,83 | 1.83 |  |  |  | 5960 |  |
| этилбензол | 0,98 | 0,98 | 0.98 |  |  |  | -160 |  |
| 1.4-диметилбензол | 3,08 | 3,08 | 3.08 |  |  |  | -3800 |  |
|  | 100 | 100 | 100 |  |  |  |  |  |

Приложение 3

 Состав пироконденсата (выход 21,45 % масс на бензин)[7]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *компоненты* | *выход на* *пироконд, % масс* | *выход на**бензин, %масс* |
| *фр.С5 в тч:* |  |  |
| изопентан | 1.90 | 0.42 |
| циклопентан | 0.40 | 0.09 |
| 2метилбутен-1 | 0.80 | 0.18 |
| пентен-1 | 0.50 | 0.11 |
| пентен-2транс | 0.40 | 0.09 |
| пентен-2цис | 0.20 | 0.04 |
| 2-метилбутен-2 | 0.30 | 0.07 |
| изопрен | 2.70 | 0.60 |
| циклопентадиен | 4.50 | 1.00 |
| пентадиен-1,3транс | 1.00 | 0.22 |
| пентадиен-1,3цис | 0.60 | 0.13 |
| пентадиен-1,4 | 0.20 | 0.04 |
| *бензол* | 30.00 | 6.66 |
| *олефины С6 в тч:* |  |  |
| гексен-1 | 1.00 | 0.22 |
| гексен-2цис | 1.10 | 0.24 |
| гексен-2транс | 1.10 | 0.24 |
| гексен-3транс | 1.10 | 0.24 |
| циклогексен | 1.00 | 0.22 |
| 2-метилпентен-2 | 1.10 | 0.24 |
| *алканы С6 в тч* |  | 0.00 |
| гексан | 0.60 | 0.13 |
| 2-метилпентан | 0.20 | 0.04 |
| 2,2диметилбутан | 0.30 | 0.07 |
| циклогексан | 0.60 | 0.13 |
| 3-метилпентан | 0.30 | 0.07 |
| *толуол* | 18.60 | 4.13 |
| *гептен-1* | 2.30 | 0.51 |
| *алканы С7 в тч:* |  |  |
| гептан | 0.20 | 0.04 |
| 3-метилгексан | 0.20 | 0.04 |
| 2-метилгексан | 0.10 | 0.02 |
| *о-ксилол* | 2.50 | 0.56 |
| *п-ксилол* | 3.80 | 0.84 |
| *м-ксилол* | 2.10 | 0.47 |
| *этилбензол* | 0.50 | 0.11 |
| *стирол* | 4.70 | 1.04 |
| *октен-1* | 1.20 | 0.27 |
| *алканы С8 в тч* |  |  |
| октан | 0.10 | 0.02 |
| 3-метилгептан | 0.05 | 0.01 |
| 2,3диметилгексан | 0.05 | 0.01 |
| *фр.С9 в тч* |  |  |
| ИПБ | 0.10 | 0.02 |
| н-пропилбензол | 0.30 | 0.07 |
| мезитилен | 0.20 | 0.04 |
| п-этилтолуол | 0.40 | 0.09 |
| м-этилтолуол | 1.00 | 0.22 |
| о-этилтолуол | 2.40 | 0.53 |
| псевдокумол | 0.70 | 0.16 |
| L-метилстирол | 2.50 | 0.56 |
| дициклопентадиен | 1.00 | 0.22 |
| п-винилтолуол | 0.50 | 0.11 |
| м-винилтолуол | 0.30 | 0.07 |
| о-винилтолуол | 0.30 | 0.07 |
|  | 0.20 | 0.04 |
| b-метилстирол-транс | 1.00 | 0.22 |
| инден | 0.10 | 0.02 |
| нафталин | 0.30 | 0.07 |
| нонан | 0.20 | 0.04 |
| 2,6диметилгептан | 0.10 | 0.02 |
| нонен-1 | 0.10 | 0.02 |
| *итого* | 100.00 | 21,45 |

Приложение 4

Состав тяжелой смолы пиролиза (выход 4,4 %масс на бензин) [7]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *компоненты* | *выход на**т.смолу, %масс* | *выход на**бензин, %масс* |
| Lметилнафталин | 5.56 | 0.25 |
| b-метилнафталин | 26.89 | 1.21 |
| 1,2-диметилнафталин | 4.89 | 0.22 |
| алкилнафталины | 33.56 | 1.51 |
| бифенил | 13.11 | 0.59 |
| фенантрен | 6.22 | 0.28 |
| флуорен | 8.44 | 0.38 |
| антрацен | 1.33 | 0.06 |
| *итого* | 100.00 | 4.50 |

Приложение 4.

Расчет теплового эффекта продуктов пиролиза

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *компоненты* | *мол.масса* | *содержание* | *кол-во* | *Ni, кмоль/ч* | *тепл.обр* | *Ni\*H ккал/ч* |
|  |  | %масс | Gi,кг/ч |  | H |  |
| продукты пиролиза |  |  |  |  |  |  |
| водород | 2 |  |  |  | 0 |  |
| метан | 16 |  |  |  | -21580 |  |
| ацетилен | 26 |  |  |  | 53130 |  |
| этилен | 28 |  |  |  | 9040 |  |
| этан | 30 |  |  |  | -25480 |  |
| пропин | 40 |  |  |  | 43070 |  |
| пропен | 42 |  |  |  | -430 |  |
| пропан | 44 |  |  |  | -31040 |  |
| бутадиен | 54 |  |  |  | 22610 |  |
| бутен | 56 |  |  |  | -6110 |  |
| бутан | 58 |  |  |  | -3730 |  |
| жидкие продукты в тч |  |  |  |  |  |  |
| легкие в тч: |  |  |  |  |  |  |
| *фр.С5 в тч:* |  |  |  |  |  |  |
| изопентан | 72 |  |  |  | -44990 |  |
| циклопентан | 70 |  |  |  | -26870 |  |
| 2метилбутен-1 | 70 |  |  |  | -15620 |  |
| пентен-1 | 70 |  |  |  | -12070 |  |
| пентен-2транс | 70 |  |  |  | -15060 |  |
| пентен-2цис | 70 |  |  |  | -14550 |  |
| 2-метилбутен-2 | 70 |  |  |  | -18050 |  |
| изопрен | 68 |  |  |  | 13500 |  |
| циклопентадиен | 66 |  |  |  | 28310 |  |
| пентадиен-1,3транс | 68 |  |  |  | 13680 |  |
| пентадиен-1,3цис | 68 |  |  |  | 12990 |  |
| пентадиен-1,4 | 68 |  |  |  | 20260 |  |
| *бензол* | 78 |  |  |  | 14660 |  |
| *олефины С6 в тч:* |  |  |  |  |  |  |
| гексен-1 | 84 |  |  |  | -18120 |  |
| гексен-2цис | 84 |  |  |  | -21310 |  |
| гексен-2транс | 84 |  |  |  | -21340 |  |
| гексен-3транс | 84 |  |  |  | -21210 |  |
| циклогексен | 82 |  |  |  | -7660 |  |
| 2-метилпентен-2 | 84 |  |  |  | -23020 |  |
| *алканы С6 в тч* |  |  |  |  |  |  |
| гексан | 86 |  |  |  | -49340 |  |
| 2-метилпентан | 86 |  |  |  | -50660 |  |
| 2,2диметилбутан | 86 |  |  |  | -53180 |  |
| циклогексан | 84 |  |  |  | -37000 |  |
| 3-метилпентан | 86 |  |  |  | -50400 |  |
| *толуол* | 92 |  |  |  | 5960 |  |
| *гептен-1* | 98 |  |  |  | -24130 |  |
| *алканы С7 в тч:* |  |  |  |  |  |  |
| гептан | 100 |  |  |  | -55330 |  |
| 3-метилгексан | 100 |  |  |  | -56400 |  |
| 2-метилгексан | 100 |  |  |  | -57040 |  |
| *о-ксилол* | 106 |  |  |  | -2930 |  |
| *п-ксилол* | 106 |  |  |  | -3800 |  |
| *м-ксилол* | 106 |  |  |  | -3780 |  |
| *этилбензол* | 106 |  |  |  | -160 |  |
| *стирол* | 104 |  |  |  | 29710 |  |
| *октен-1* | 112 |  |  |  | -30130 |  |
| *алканы С8 в тч* |  |  |  |  |  |  |
| октан | 114 |  |  |  | -61320 |  |
| 3-метилгептан | 114 |  |  |  | -62320 |  |
| 2,3диметилгексан | 114 |  |  |  | -64710 |  |
| *фр.С9 в тч* |  |  |  |  |  |  |
| ИПБ | 120 |  |  |  | -7170 |  |
| н-пропилбензол | 120 |  |  |  | -6410 |  |
| мезитилен | 120 |  |  |  | -13250 |  |
| п-этилтолуол | 120 |  |  |  | -9630 |  |
| м-этилтолуол | 120 |  |  |  | -9070 |  |
| о-этилтолуол | 120 |  |  |  | -7950 |  |
| псевдокумол | 120 |  |  |  | -12560 |  |
| L-метилстирол | 118 |  |  |  | 20000 |  |
| дициклопентадиен | 104 |  |  |  | 48300 |  |
| п-винилтолуол | 118 |  |  |  | 20400 |  |
| м-винилтолуол | 118 |  |  |  | 20600 |  |
| о-винилтолуол | 118 |  |  |  | 21300 |  |
|  | 120 |  |  |  | -11680 |  |
| b-метилстирол-транс | 118 |  |  |  | 21270 |  |
| инден | 116 |  |  |  | 71330 |  |
| нафталин | 128 |  |  |  | 30260 |  |
| нонан | 128 |  |  |  | -67230 |  |
| 2,6диметилгептан | 128 |  |  |  | -70510 |  |
| нонен-1 | 126 |  |  |  | -36120 |  |
| тяжелые в тч |  |  |  |  |  |  |
| Lметилнафталин | 142 |  |  |  | 21610 |  |
| b-метилнафталин | 142 |  |  |  | 21130 |  |
| 1,2-диметилнафталин | 156 |  |  |  | 12930 |  |
| алкилнафталины | 156 |  |  |  | 12010 |  |
| бифенил | 154 |  |  |  | 36860 |  |
| фенантрен | 178 |  |  |  | 137370 |  |
| флуорен | 166 |  |  |  | 114340 |  |
| антрацен | 178 |  |  |  | 134730 |  |
| *итого:* |  |  |  |  |  |  |

Приложении 5.

Определение молекулярной массы бензина.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| комп-ты | сод-ие. Хi.% масс | мол.масса | кол-во, кг/ч | Ni,кмоль/ч | мольн.доля | ni\*Mr |
| бутан |  |  |  |  |  |  |
| пентан |  |  |  |  |  |  |
| гексан |  |  |  |  |  |  |
| гептан |  |  |  |  |  |  |
| октан |  |  |  |  |  |  |
| нонан |  |  |  |  |  |  |
| изопентан |  |  |  |  |  |  |
| 3метилпентан |  |  |  |  |  |  |
| 2метилгексан |  |  |  |  |  |  |
| 2.3-диметилгексан |  |  |  |  |  |  |
| 2-метилоктан |  |  |  |  |  |  |
| 2-метилгептан |  |  |  |  |  |  |
| 2.3-диметилгептан |  |  |  |  |  |  |
| циклопентан |  |  |  |  |  |  |
| метилциклопентан |  |  |  |  |  |  |
| 1.2-диметилциклопентан |  |  |  |  |  |  |
| 1.1.3-триметилциклопентан |  |  |  |  |  |  |
| циклогексан |  |  |  |  |  |  |
| метилциклогексан |  |  |  |  |  |  |
| этилциклогексан |  |  |  |  |  |  |
| 1.3-диметилциклогексан |  |  |  |  |  |  |
| 1-метил.4-этилциклогексан |  |  |  |  |  |  |
| бензол |  |  |  |  |  |  |
| метилбензол |  |  |  |  |  |  |
| этилбензол |  |  |  |  |  |  |
| 1.4-диметилбензол |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |

##### Приложении 6.

##### Расчет энтальпии парогазовой смеси на входе и выходе

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *компоненты* | *содержание**%масс* | *q при 633К,ккал/кг* | *q\*xi/100* | *q при 1108К,ккал/кг* | *q\*xi/100* |
| *продукты пиролиза* |  |  |  |  |  |
| водород |  | 2180.7 |  | 3875.42 |  |
| метан |  | 374 |  | 841.75 |  |
| ацетилен |  | 253.5 |  | 532.3 |  |
| этилен |  | 252 |  | 616.5 |  |
| этан |  | 292 |  | 718 |  |
| пропин |  | 291 |  | 708 |  |
| пропен |  | 247.3 |  | 607.2 |  |
| пропан |  | 272.8 |  | 688.8 |  |
| бутадиен |  | 232.4 |  | 559.9 |  |
| бутен |  | 247.6 |  | 615 |  |
| бутан |  | 272 |  | 681.8 |  |
| *жидкие продукты в тч* |  |  |  |  |
| легкие в тч: |  |  |  |  |  |
| *фр.С5 в тч:* |  |  |  |  |  |
| изопентан |  | 264.4 |  | 672.9 |  |
| циклопентан |  | 209.7 |  | 580.3 |  |
| 2метилбутен-1 |  | 251 |  | 624.8 |  |
| пентен-1 |  | 252 |  | 623.9 |  |
| пентен-2транс |  | 246.8 |  | 615.6 |  |
| пентен-2цис |  | 240 |  | 607.7 |  |
| 2-метилбутен-2 |  | 240.4 |  | 607 |  |
| изопрен |  | 238.2 |  | 584.1 |  |
| циклопентадиен |  | 243.1 |  | 585.6 |  |
| пентадиен-1,3транс |  | 236.9 |  | 580.8 |  |
| пентадиен-1,3цис |  | 226.7 |  | 566.2 |  |
| пентадиен-1,4 |  | 243.1 |  | 585.6 |  |
| *бензол* |  | 174.3 |  | 457.8 |  |
| *олефины С6 в тч:* |  |  |  |  |  |
| гексен-1 |  | 252.6 |  | 627.2 |  |
| гексен-2цис |  | 244.6 |  | 522.6 |  |
| гексен-2транс |  | 250.6 |  | 529,8 |  |
| гексен-3транс |  | 249.8 |  | 529.8 |  |
| циклогексен |  | 212.8 |  | 569.5 |  |
| 2-метилпентен-2 |  | 242.2 |  | 520.2 |  |
| *алканы С6 в тч* |  |  |  |  |  |
| гексан |  | 266.7 |  | 669.7 |  |
| 2-метилпентан |  | 262.7 |  | 566.3 |  |
| 2,2диметилбутан |  | 260.5 |  | 565.1 |  |
| циклогексан |  | 217.8 |  | 610.1 |  |
| 3-метилпентан |  | 266.6 |  | 567.4 |  |
| *толуол* |  | 184.3 |  | 481.8 |  |
| *гептен-1* |  | 253 |  | 629.7 |  |
| *алканы С7 в тч:* |  |  |  |  |  |
| гептан |  | 265.3 |  | 666.3 |  |
| 3-метилгексан |  | 262.2 |  | 564 |  |
| 2-метилгексан |  | 262.2 |  | 567 |  |
| *о-ксилол* |  | 198.2 |  | 507.2 |  |
| *п-ксилол* |  | 192.6 |  | 499.9 |  |
| *м-ксилол* |  | 193.3 |  | 629.6 |  |
| *этилбензол* |  | 195.9 |  | 467.1 |  |
| *стирол* |  | 186.3 |  | 475.5 |  |
| *октен-1* |  | 253.5 |  | 643.2 |  |
| *алканы С8 в тч* |  |  |  |  |  |
| октан |  | 264.2 |  | 663.6 |  |
| 3-метилгептан |  | 261.1 |  | 564.9 |  |
| 2,3диметилгексан |  | 266.9 |  | 569.3 |  |
| *фр.С9 в тч* |  |  |  |  |  |
| ИПБ |  | 202 |  | 522.9 |  |
| н-пропилбензол |  | 204.9 |  | 524.5 |  |
| мезитилен |  | 198.8 |  | 513.8 |  |
| п-этилтолуол |  | 193.8 |  | 492.2 |  |
| м-этилтолуол |  | 193.8 |  | 492.2 |  |
| о-этилтолуол |  | 193.8 |  | 492.2 |  |
| псевдокумол |  | 205.2 |  | 517 |  |
| L-метилстирол |  | 193.8 |  | 493.9 |  |
| дициклопентадиен |  | 192.1 |  | 491 |  |
| п-винилтолуол |  | 193.8 |  | 492.2 |  |
| м-винилтолуол |  | 193.8 |  | 492.2 |  |
| о-винилтолуол |  | 193.8 |  | 492.2 |  |
|  |  | 105 |  | 516.1 |  |
| b-метилстирол-транс |  | 194 |  | 493.9 |  |
| инден |  | 192 |  | 491 |  |
| нафталин |  | 197.6 |  | 439.2 |  |
| нонан |  | 263.3 |  | 661.5 |  |
| 2,6диметилгептан |  | 263.3 |  | 661.5 |  |
| нонен-1 |  | 253.8 |  | 633.1 |  |
| тяжелые в тч |  |  |  |  |  |
| Lметилнафталин |  | 176.5 |  | 461 |  |
| b-метилнафталин |  | 176.3 |  | 459.6 |  |
| 1,2-диметилнафталин |  | 183.6 |  | 477.6 |  |
| алкилнафталины |  | 183.6 |  | 477.6 |  |
| бифенил |  | 182 |  | 475.2 |  |
| фенантрен |  | 183.1 |  | 321.5 |  |
| флуорен |  | 138 |  | 365 |  |
| антрацен |  | 181 |  | 360 |  |
| итого: |  |  |  |  |  |

**7. Список рекомендуемой литературы**

1. Адельсон С.В./Процессы и аппараты нефтепереработки и нефтехимии; М.: Химия, 1963, -309с.;
2. Кузнецов А.А, Кагерманов С.М, Судаков Е.Н.,/Расчеты процессов и аппаратов нефтеперерабатывающей промышленности. Изд. 2-е переработ. И дополнен.Л.,”Химия”, 1974,-344с.
3. Бахшинян Ц.А./Трубчатые печи с излучающими стенками топки. – М. ГОСИНТИ, 1960,-192с.
4. Масальский К.Е., Годик В.М./Пиролизные установки(проектирование и эксплуатация), М., Изд. “Химия”, 1968,-144с.
5. Адельсон С.В., Никонов В.И./Пиролиз углеводородного сырья, М. 1983.
6. Мухина Т.Н., Барабанов Н.Л., Бабаш С.Е. и др.,/Пиролиз углеводородного сырья; М.: Химия, 1987, - 240с.;
7. Беренц А.Д., Воль-Эйнштейн А.Б., Мухина Т.Н. и др./Переработка жидких продуктов пиролиза, М.”Химия”, 1985,-212с.
8. МасальскийК.Е., Годик В.М.,/Пиролизные установки(проектирование и эксплуатация), М., Изд. “Химия”, 1968,-144с.
9. Осинина О.Г./Определение физико-химических и тепловых характеристик нефтепродуктов, углеводородов и некоторых газов.
10. Варгафтик Н.Б./Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей, М. “Наука”,1972,-720с.
11. Богаров Ю.Н., Масальский К.Е., Гершова И.Ш./Конструктивное оформление печей пиролиза, М.,ИНИИТЭ нефтехимия, 1972,-44с.
12. Серебряков Б.Р., Масагутов Р.М., Правдин В.Г. и др., /Новые процессы органического синтеза; М.: Химия, 1989, -400с.;
13. Адельсон С.В., /Технологический расчёт и конструктивное оформление нефтезаводских печей; Л., 1952, -239с.;
14. Скобло А.И., Трегубова И.А., Молоканов Ю.К./Процессы и аппараты нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности – 3-е изд., перераб. И дополнен. М., ООО“Недра-Бизнесцентр”,2000,-677с.
15. Казанская А.С., Скобло В.А./Расчеты химических равновесий, М. Высшая школа, 1974,-288с.
16. Физико-химические свойства индивидуальных углеводородов/Под редакцией Татевского В.М. М.Гостоптехиздат, 1960.
17. Адельсон С.В., Паушкин Я.М., Вишняков Т.П./Технология нефтехимического синтеза, Учебн. Пособие для ВУЗов –2-е изд. Перер., М.”Химия”, 1985,- 608с.