

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Тольяттинский государственный университет»
Институт химии и инженерной экологии
Кафедра «Химия, химические процессы и технологии»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой _____

(личная подпись)

Г. И. Остапенко
(И. О. Фамилия)

« ____ » _____ 20 ____ г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение Бакалаврской работы

Студенту Петрову Илье Алексеевичу

1. Тема : «Оптимизация процесса получения циклогексанола дегидрированием циклогексанола»

2. Срок сдачи студентом готовой работы 16 июня 2017г

3. Исходные данные к работе технологическая схема справочная литература и данные с производства.

4. Содержание текстового документа (перечень подлежащих разработке вопросов) Теоретическая часть – анализ технической и научной информации по дегидрированию циклогексанола. Технологическая часть – выбор технологической схемы дегидрирования циклогексанола расчет материального и теплового баланса.

5.Перечень графического материала и иллюстрационного материала(ориентировочный)

Общие сведения, схема получения циклогексанола дегидрированием циклогексанола, схема реакционного узла, таблицы материального и теплового балансов.

6. Дата выдачи задания на выполнение Бакалаврской работы 6 марта 2017г.

Руководитель выпускной
квалификационной
работы

Задание принял к
исполнению

(подпись)

Е.А.Огонев

(И.О.Фамилия)

(подпись)

И.А.Петров

(И.О.Фамилия)

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»
Институт химии и инженерной экологии
Кафедра «Химия, химические процессы и технологии»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой _____

(личная подпись)

Г. И. Остапенко
(И. О. Фамилия)

« ____ » _____ 20 ____ г.

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН
бакалаврской работы

Студента: Петров Ильи Алексеевич

по теме: Оптимизация процесса получения циклогексанона дегидрированием циклогексанола.

Наименование раздела работы	Плановый срок выполнения раздела	Фактический срок выполнения раздела	Отметка о выполнении	Подпись руководителя
Введение	22.02.2017	23.02.2017	выполнен	
Теоретическая часть	21.03.2017	26.03.2017	выполнен	
Технологическая часть	12.04.2017	12.04.2017	выполнен	
Расчетная часть	14.05.2017	15.05.2017	выполнен	
Выполнение чертежей	03.06.2017	02.06.2017	выполнен	
Выполнение плакатов	04.06.2017	08.06.2017	выполнен	
Заключение	10.06.2017	12.06.2017	выполнен	
Предварительная защита	20.06.2017	20.06.2017	выполнен	
Оформление работы	14.06.2017	14.06.2017	выполнен	

Руководитель выпускной
квалификационной работы

(подпись)

Е.А.Огонев

(И.О.Фамилия)

Задание принял к
исполнению

(подпись)

И.А.Петров

(И.О.Фамилия)

АННОТАЦИЯ

Выпускная квалификационная работа на тему «оптимизация процесса дегидрирования циклогексанола» выполнена на 63 страницах. Данная работа содержит 9 таблиц, 3 рисунка, использовано 22 литературных источника. Графический материал был выполнен на 6 листах формата А1

Дегидрирование циклогексанола, технология дегидрирования циклогексанола, циклогексанол, циклогексанон, технологические расчеты, технологическая схема.

В данной выпускной работе предложена оптимизация процесса дегидрирования циклогексанола до циклогексанона. Данная модернизация увеличит выход продукта и создаст более благоприятные условия.

Цель работы – оптимизация процесса получения циклогексанона дегидрированием циклогексанола.

В теоретической части были рассмотрены основные виды получения сырья и готового продукта, их свойства, способы промышленного получения, и современное состояние патентной литературы.

В технологической части описаны физико химические свойства сырья, готовой продукции, катализаторов.

В расчетной части работы проведены вычисления материального, теплового баланса, основные характеристики аппарата для представленного процесса.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	7
1.1. Парофазное Гидрирование бензола	7
1.2. Каталитическое гидрирование фенола	7
1.3. Дегидрирование циклогексанола	8
1.4. Дегидрирование циклогексанола с использованием разных катализаторов	9
1.6. Патентный обзор	29
2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	41
2.1 Характеристика сырья и готовой продукции	41
2.2. Описание технологической схемы и оборудования	44
3. РАСЧЁТНАЯ ЧАСТЬ	51
3.1 Материальный и тепловой баланс	51
3.2. Энергетический баланс реактора	55
2.3 Аналитический контроль технологического процесса синтеза ДМД	39
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	61
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	62
Приложение 1.	64

ABSTRACT

The title of the graduation work is «The optimization of the cyclohexanol dehydrogenation process»

The graduation work consist of the explanatory note on 63 pages, introduction, including 1 figure, 3 tables, the list of 9 references including 8 foreign sources, 2 appendices, and the graphic part on 6 A1 sheets.

The key issue of the graduation project is the dehydrogenation of cyclohexanol, cyclohexanon, technology system.

This graduation project is about the optimization of the cyclohexanol dehydrogenation to cyclohexanone. This modernization will increase the yield of the product and create more favorable conditions of the process.

In the theoretical part, the main types of raw materials and finished product, their properties, methods of industrial production, and the current status of patent literature are considered.

The technological part, describes the physicochemical properties of raw materials, finished products, catalysts.

In the calculation part of the work calculations of the material, heat balance, the main characteristics of the apparatus for the presented processes are carried out.

This work will allow to optimize the already existing process to increase energy saving. It will also help to reduce energy costs to as well as to increase the useful yield of the product with a relatively deep conversion of cyclohexanol.

ВВЕДЕНИЕ

Циклогексанон получают из циклогексанола окислением кислородом воздуха (окислительное дегидрирование) или каталитическим дегидрированием. Кроме дегидрирования при этом протекают дегидратация циклогексанола в циклогексен, а также расщепление циклогексанола с выделением углерода, водорода и воды.

Процессы дегидрирования имеют очень важное значение в промышленности. Дегидрированием получают ненасыщенные соединения, представляющие большую ценность в качестве мономеров для производства синтетического каучука и пластических масс.

Широкое распространение получил процесс дегидрирования циклогексанола с получением циклогексанона [1].

В данном проекте представлено производство по получению циклогексанона путем дегидрирования циклогексанола. В свою очередь циклогексанон используется как продукт для органического синтеза, а также в качестве растворителя. Кроме того, циклогексанон, производство которого разрабатывается в данном проекте нашел свое применение в получении капролактама.

Окисление проводят в жидкой фазе, однако окислитель - воздух поступает в зону реакции в виде газа, вследствие этого сложность самого химического процесса усугубляется непростыми гидродинамическими условиями его проведения [1].

Целью дипломной работы является:

- 1) Изучение возможных процессов получения циклогексанона
- 2) Изучение процесса дегидрирования циклогексанола на различных катализаторах
- 3) Привести характеристику сырья и готовой продукции
- 4) Предложить способ оптимизации технологии

5) Рассчитать материальный и энергетический балансы

1. ТЕОРИТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1. Парофазное Гидрирование бензола

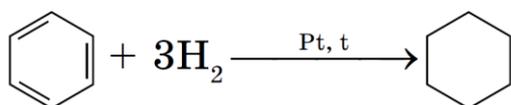
Данный процесс происходит при следующих параметрах:

- 1) 1,6-2,0 МПа (16-20 кгс/см²),
- 2) температуре 125-250 °С на никельсодержащем катализаторе

Используются два типа реакторов.

В трубчатом реакторе съём тепла осуществляется кипящим конденсатом и в колонном реакторе адиабатического типа.

Гидрирования бензола в циклогексан протекает по уравнению:

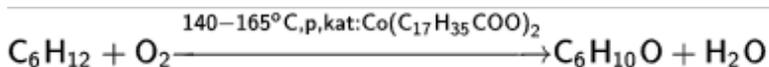


Бензол	Водород	Циклогексан
мол. вес 78	мол. вес 2	мол. вес 84

При этих условиях, поданным ГИАП и ФХИ им. Карпова, равновесии реакции сдвигается полностью в сторону образования циклогексана.

Гидрирование бензола производится водородом из свежей азотноводородной фракции. Возможно также использование реакционного водорода из отделения дегидрирования циклогексанола.

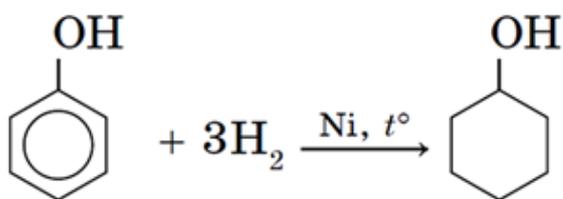
В промышленности циклогексан окисляют кислородом воздуха, чтобы в последствии получить циклогексанон [2].



1.2. Каталитическое гидрирование фенола.

Данный процесс осуществляется в присутствии никелевого или никель-хромового катализатора. Температурные пределы для данной реакции составляют : от 140 до 200 °С[2].

Реакция гидрирования протекает по уравнению:



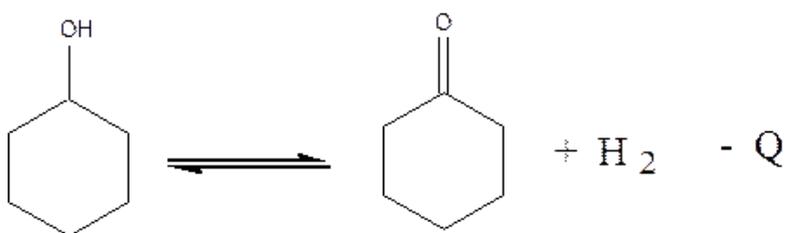
Фенол Водород Циклогексанол
 Моль.вес 94 моль. вес 2 моль. вес 100

Оптимальной температурой является интервал от 150 до 170°C, так как температура сильно влияет на скорость и селективность. Фенольный процесс является одним из основных процессов получения сырья для циклогексанона [2].

1.3. Дегидрирование циклогексанола

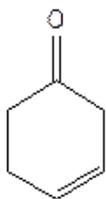
Дегидрирование циклогексанола является основным процессом получения циклогексанона, и происходит в присутствии цинк-хромового катализатора, из-за которого отщепляется водород. Температура данного процесса составляет 420 °С а давление 1 Мпа.

Реакция выглядит следующим образом:

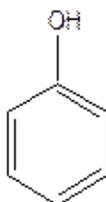


Данный процесс осуществляется с поглощением тепла (эндотермическая реакция). Тепловой эффект реакции составляет 15,42 ккал/моль. Тепло, необходимое для проведения процесса передается горячими дымовыми газами при помощи циркуляции с использованием газодувки [3].

Степень конверсии процесса 60%, Понижение температуры процесса меньше чем 240°C приводит к снижению степени конверсии. Каталитическая объемная скорость по циклогексанолу-ректификату 0,7-0,9 час⁻¹. Выход циклогексанона составляет 97-98%. Совместно с реакцией получения циклогексанона протекают побочные реакции с образованием циклогексена:



фенола:



Также протекают реакции с образованием высококипящих соединений получаемых во время конденсации циклогексанона: циклогексалиден-циклогексанона, дициклогексанона и Т.Д.

При длительном использовании активность цинк-хромового катализатора со временем снижается, Поэтому возникает потребность его регенерации. Регенерацию производят, когда степень конверсии циклогексанола снижается ниже 60% [2].

1.4. Дегидрирование циклогексанола с использованием разных катализаторов

Основную роль в дегидрировании циклогексанола играет катализатор.

Делая выводы на основании изученной литературы можно сделать вывод, что для каждого катализатора имеются свои положительные и отрицательные аспекты.

1) Никелевые катализаторы в основном применяют для процессов гидрирования, так как для дегидрирования они менее пригодны: в их присутствии дегидрирование происходит сразу для фенола [8].

При использовании никель-хромавого катализатора процесс дегидрирования идет в «мягких условиях»: Температура составляет 180-200°C.

Но есть и недостатки данного катализатора, а именно для оптимального

выхода продукта необходимо протекание процесса с разбавителем, например водяным паром при массовом соотношении циклогексанол вода 1:2. И объемная скорость подачи сырья не должна превышать 0,8ч-1ч. В противном случае сильно падает конверсия. Так же в результате понижения объемной скорости до 0,3-1ч, при температуре 200°C, возрастает степень конверсии с 60 до 88% . недостатком является то, что получается много побочных продуктов [2].

2)В присутствии никель-хромового катализатора процесс идет в «мягких условиях»: интервал температур составляет от 180 °С до 200°C, однако необходимо проводить процесс в присутствии инертного разбавителя, например водяного пара [3].

3) Применение чистого цинка показывает хорошие результаты, однако Тпл цинка составляет 419,5°C, что, к сожалению совпадает с температурой дегидрирования [7].

А это означает, что гранулы цинка сплаляются и ведут к ухудшению его каталитического воздействия В следствии данной особеннности цинк применяют на носителях, например, на железе, так как цинк-железный катализатор является дешевым, стабильным в эксплуатации, и обеспечивает высокий выход продукта.

Важнейшим недостатком является то, что данный катализатор активен при давольно высоком интервале температур (400-420°C), введу чего образуется много побочных продуктов. Поэтому данный катализатор применяют только для сырья полученного на основе фенола [3].

4)Цинк железный катализатор активен при давольно высоком интервале температур: от 400 до 420 °С, что обуславливает образование большого количества побочных соединений. Также данный катализатор чувствителен к кислородосодержащим примесям. Поэтому его используют только для сырья, полученного фенольным процессом.

5)Циклогексанол полученный окислением циклогексана нецелесообразен из-за дезактивирующего действия кислородосодержащих примесей: воды,

эфиров, кислот.

б) Цинк-хромовый катализатор благодаря высокой активности выдерживает значительно большие нагрузки чем другие катализаторы, но для него характерен длительный «разбег», то есть для достижения оптимальных условий процесса этому катализатору необходимо пребывать в реакционной массе порядка 120 ч.

Применяют смешанный цинк хромовый катализатор, представляющий собой не восстановленную смесь оксида и хромата цинка. Его высокая активность обуславливается его развитой поверхностью, что в процессе дегидрирования циклогексанона ведет к образованию побочных продуктов и к глубокому превращению циклогексанола [3].

Для катализатора на основе хром-цинка характерен длительный разбег, сопровождающийся ростом избирательности при одновременном падении активности. При дегидрировании циклогексанола, содержащего 94,1% основного вещества и около 6% примесей (преимущественно, кислородосодержащих соединений), стабилизация процесса происходит через 100-120ч постоянной работы. Оптимальными условиями являются $T=360\text{ }^{\circ}\text{C}$, объемная скорость 1,0 [8].

В данных условиях представляется возможность досчитать 95%-ный выход циклогексанона при степени конверсии 80%. из-за высокой активности цинк хромового катализатора он может выдерживать высокие нагрузки по циклогексанону в отличии от других катализаторов. Если повысить объемную скорость до $2,3\text{ч}^{-1}$, то степень конверсии незначительно упадет, а полезный выход может вырасти до 98%, что является одним из лучших показателей [7].

1.5. Спецификация на основное технологическое оборудование

Данная информация представлена в таблице № 1 и взята из Инструкции ИРМ 22-8 цеха циклогексанона № 22 производства капролактама предприятия ОАО «КуйбышевАзот» [5].

Таблица № 1- Спецификация на основное технологическое оборудование

№ пп	Номер позиции по схеме	Наименование оборудования	Количество	Материал, способы антикоррозионной защиты	Техническая характеристика
Отделение дегидрирования циклогексанола					
1.	T-601/1,2	Испаритель циклогексанола	2	Сталь 12X18Н10Т Минвата, окочушивание	Вертикальный кожухотрубчатый аппарат F=126 м ² , D=1000 мм, L=3000 мм, масса 3560 кг Допустимые рабочие условия: трубное пространство: P=0,65 кгс/см ² T=200 °C Среда: циклогексанол - ректификат Межтрубное пространство: P=20 кгс/см ² T=211 °C

№ пп	Номер позиции по схеме	Наименование оборудования	Количество	Материал, способы антикоррозионной защиты	Техническая характеристика
					Среда: водяной пар
1.	T-601/3	Испаритель циклогексанола	1	Сталь 12X18H10T Минвата, оокожушивание	Вертикальный кожухотрубчатый аппарат F=181,34 м ² , Д=1000 мм, L=4640 мм Допустимые рабочие условия: трубное пространство: P=0,65 кгс/см ² T _{вх} =90 °C T _{вых} =200 °C Среда: циклогексанол - ректификат Межтрубное пространство: P=23 кгс/см ² T _{вх} =250 °C T _{вых} =220 °C Среда: водяной пар
2.	C-602/1,2,3	Сепаратор	3	Сталь углеродистая	Вертикальный цилиндрический аппарат

№ пп	Номер позиции по схеме	Наименование оборудования	Количество	Материал, способы антикоррозионной защиты	Техническая характеристика
				ВСт3ст2, Вст3сп5 Минвата, окожущивание	Допустимые рабочие условия: трубное пространство: P= 0,65 кгс/см ² T= от 30 до 200 °С Среда: пары циклогексанол
3.	В-603 /1,2	Воздуходувка	2	Разный	Тип ТВ-80-1,2 Объемная подача – 5000 м ³ /ч T- окружающая среда Среда – атмосферный воздух Электродвигатель: тип ВАО 355м Мощность – 65 кВт Частота вращения – 2950 мин ⁻¹ Исполнение: взрывозащищенное, 1Exd II АТЗ
4.	В-603 /3	Воздуходувка	1	Разный	Тип ТВ-80-1,2 Объемная подача – 6000 м ³ /ч

№ пп	Номер позиции по схеме	Наименование оборудования	Количество	Материал, способы антикоррозионной защиты	Техническая характеристика
					Напор – 1,2 кгс/см ² Т- окружающая среда Среда – атмосферный воздух Электродвигатель: тип ВА 225М2У2 Мощность – 55 кВт Частота вращения – 2955 мин ⁻¹ Исполнение: взрывозащищенное, 1Ехd II АТЗ
5.	В-604 /1,2,3	Газодувка	3	Разный	Тип 610-11-1 нагнетательный центробежный с двумя маслососами Объемная подача – 60000 м ³ /ч Напор – 0,02÷0,045 кгс/см ² Т= не более 400 °С Среда – дымовые газы Электродвигатель: тип ВАО 355м Мощность – 200 кВт

№ пп	Номер позиции по схеме	Наименование оборудования	Количество	Материал, способы антикоррозионной защиты	Техническая характеристика
					Частота вращения – 2970 мин ⁻¹ Исполнение: взрывозащищенное, 1Exd II АТЗ
6.	X-605/1,2	Камера сжигания	2	Сталь углеродистая ВСт3сп2 Внутренняя футеровка	Вертикальный цилиндрический аппарат V=5,75 м ² , D _{нар} =2200 мм, H=7605 мм, D _{вн} =1200 мм Допустимые рабочие условия: P= гидростатическое T=1250 °С Среда: дымовые газы
7.	X-605/3	Камера сжигания	1	Сталь углеродистая ВСт3сп2 Внутренняя футеровка	Вертикальный цилиндрический аппарат V=5,75 м ² , D _{нар} =2200 мм, H=6505 мм, D _{вн} =1400 мм Допустимые рабочие условия: P= 0,6 кгс/см ² T= 1300 °С

№ пп	Номер позиции по схеме	Наименование оборудования	Количество	Материал, способы антикоррозионной защиты	Техническая характеристика
					Среда: дымовые газы
8.	Р-606/3	Реактор дегидрирования	3	Трубки 12Х18Н10Т; Корпус 16ГС-12, Решетки 09Г2С-12	Вертикальный кожухотрубчатый аппарат $V_{тр}=19 \text{ м}^2$, $V_{м/тр}=43 \text{ м}^3$, $H=6630 \text{ мм}$ Допустимые рабочие условия: трубное пространство: $P=0,65 \text{ кгс/см}^2$ $T=420 \text{ }^\circ\text{C}$ Среда: циклогексанон, циклогексанол, водяной пар, водород Межтрубное пространство: $P=0,2 \text{ кгс/см}^2$ $T=470 \text{ }^\circ\text{C}$ Среда: дымовые газы
9.	Т-607/1,2	Подогреватель циклогексанола	2	Сталь углеродистая Днище	Горизонтальный кожухотрубчатый аппарат $F=33 \text{ м}^2$, $D=800 \text{ мм}$, $L=1500$

№ пп	Номер позиции по схеме	Наименование оборудования	Количество	Материал, способы антикоррозионной защиты	Техническая характеристика
				ВКСтЗсп Минвата, окожушивание	мм, Допустимые рабочие условия: трубное пространство: P= 10 кгс/см ² T= до 200 °С Среда: циклогексанол Межтрубное пространство: P= 10 кгс/см ² T= до 200 °С Среда: циклогексанон, циклогексанол, водород, азот, водяной пар
10.	T-607/3	Подогреватель циклогексанола	1	Днище 09Г2С-14 Обечайка 09Г2С-12 Минвата, окожушивание	Горизонтальный кожухотрубчатый аппарат F=38 м ² , D=600 мм, L=2910 мм, Допустимые рабочие условия: трубное пространство: P=0,65 кгс/см ²

№ пп	Номер позиции по схеме	Наименование оборудования	Количество	Материал, способы антикоррозионной защиты	Техническая характеристика
					<p>T=200⁰C</p> <p>Среда: циклогексанол</p> <p>Межтрубное пространство:</p> <p>P=0,65 кгс/см²</p> <p>T=до 250⁰C</p> <p>Среда: циклогексанон, циклогексанол, водород, азот,</p>
11.	T-608/1,2	Перегреватель паров циклогексанола	2	<p>Днище</p> <p>17ГС</p> <p>Обечайка:</p> <p>09Г2С</p> <p>Минвата, оокожушивание</p>	<p>Горизонтальный кожухотрубчатый аппарат F=200 м², Д=800 мм, L=6000 мм, Допустимые рабочие условия:</p> <p>трубное пространство:</p> <p>P= 0,65 кгс/см²</p> <p>T= 400⁰C</p> <p>Среда: циклогексанол, водяной пар</p> <p>Межтрубное пространство:</p> <p>P= 0,65 кгс/см²</p>

№ пп	Номер позиции по схеме	Наименование оборудования	Количество	Материал, способы антикоррозионной защиты	Техническая характеристика
					<p>$T = 400^{\circ}\text{C}$</p> <p>Среда: циклогексанон, циклогексанол, водяной пар</p>
12.	T-608/3	Перегреватель паров циклогексанола	1	<p>Днище 09Г2С-14</p> <p>Обечайка: 09Г2С-12</p> <p>Минвата, окожушивание</p>	<p>Горизонтальный кожухотрубчатый аппарат $F=212 \text{ м}^2$, $D=800 \text{ мм}$, $L=7465 \text{ мм}$, Допустимые рабочие условия:</p> <p>трубное пространство: $P = 0,65 \text{ кгс/см}^2$ $T = 400^{\circ}\text{C}$</p> <p>Среда: циклогексанол,</p> <p>Межтрубное пространство: $P = 0,65 \text{ кгс/см}^2$ $T = 400^{\circ}\text{C}$</p> <p>Среда: циклогексанон, циклогексанол,</p>
13.	T-609/1,2	Конденсатор	2	<p>Обечайка: Сталь углеродистая</p>	<p>Горизонтальный кожухотрубчатый аппарат $F=160 \text{ м}^2$, $D=1000 \text{ мм}$, $L=4000$</p>

№ пп	Номер позиции по схеме	Наименование оборудования	Количество	Материал, способы антикоррозионной защиты	Техническая характеристика
				ВСтЗсп5, Сталь 16ГС-12 Трубки: Ст10	мм, Допустимые рабочие условия: трубное пространство: P= 6 кгс/см ² T= 200 °С Среда: оборотная вода Межтрубное пространство: P= 6 кгс/см ² T= 200 °С Среда: циклогексанон, водород, конденсат
14.	Т-609/3	Конденсатор	1	Обечайка: Сталь 09Г2С-12 Трубки: 12Х18Н10Т	Горизонтальный кожухотрубчатый аппарат F=174,51 м ² , Д=1000 мм, L=4200 мм, Допустимые рабочие условия: трубное пространство: P= 5,4 кгс/см ²

№ пп	Номер позиции по схеме	Наименование оборудования	Количество	Материал, способы антикоррозионной защиты	Техническая характеристика
					<p>T= 100 °С</p> <p>Среда: оборотная вода</p> <p>Межтрубное пространство:</p> <p>P= 0,65 кгс/см²</p> <p>T= 200 °С</p> <p>Среда: циклогексанон, водород, конденсат</p>
15.	C-611 C-615	Сепаратор	2	Сталь углеродистая ВСт3сп2	<p>Вертикальный цилиндрический аппарат</p> <p>V=0,63 м³, Д=900 мм, Н=2040 мм</p> <p>Допустимые рабочие условия:</p> <p>P= не более 0,65 кгс/см²</p> <p>T= не более 180 °С</p> <p>Среда: пары циклогексанона, водород</p>
16.	X-612	Гидрозатвор	1	Сталь углеродистая ВСт3сп4	<p>Вертикальный цилиндрический аппарат</p> <p>V=0,033 м² Д=200 мм, Н=1000 мм</p> <p>Допустимые рабочие условия:</p>

№ пп	Номер позиции по схеме	Наименование оборудования	Количество	Материал, способы антикоррозионной защиты	Техническая характеристика
					<p>$P =$ не более $0,04 \text{ кгс/см}^2$</p> <p>$T =$ не более $40 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>Среда: циклогексанон, циклогексанол</p>
17.	X-613	Гидрозатвор	1	Сталь углеродистая ВСт3сп2	<p>Вертикальный цилиндрический аппарат</p> <p>$V=0,4 \text{ м}^2$ $D=400 \text{ мм}$, $H=3325 \text{ мм}$</p> <p>Допустимые рабочие условия:</p> <p>$P =$ не более $0,04 \text{ кгс/см}^2$</p> <p>$T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>Среда: циклогексанон, циклогексанол</p>
18.	E-614	Сборник циклогексанона - сырца	1	Сталь углеродистая ВСт3сп5 Минвата, окожушивание	<p>Вертикальный цилиндрический аппарат</p> <p>$V= 4,0 \text{ м}^3$, $D=1600 \text{ мм}$, $H=2000 \text{ мм}$</p> <p>Допустимые рабочие условия по паспорту:</p> <p>$P = 0,04 \text{ кгс/см}^2$</p> <p>$T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>Среда: циклогексанон, циклогексанол</p>

№ пп	Номер позиции по схеме	Наименование оборудования	Количество	Материал, способы антикоррозионной защиты	Техническая характеристика
19.	С-615/2	Сепаратор	1	Сталь углеродистая ВСтЗсп5	Вертикальный цилиндрический аппарат V=0,63 м ³ , Д=900 мм, Н=2040 мм Допустимые рабочие условия: Р= не более 0,65 кгс/см ² Т= не более 100 °С Среда: пары циклогексанона, водород
20.	Т-616 Т-640	Аммиачный испаритель	2	Сталь углеродистая ВСтЗсп5 Минвата, окожушивание	Горизонтальный кожухотрубчатый аппарат F=32 м ² Д=500 мм, L=4000 мм Допустимые рабочие условия: трубное пространство: Р= 4,0 кгс/см ² Т= до 40 (55) °С Среда: реакционный водород, пары циклогексанона, циклогексанола Межтрубное пространство: Р= 15 (23) кгс/см ²

№ пп	Номер позиции по схеме	Наименование оборудования	Количество	Материал, способы антикоррозионной защиты	Техническая характеристика
					Т= от -40 до +40 °С Среда: аммиак
21.	Т-616/2	Аммиачный испаритель	1	Обечайка 09Г2С-12 Днище 09Г2С-14 Трубки Ст20 Минвата, окожушивание	Горизонтальный кожухотрубчатый аппарат F=54 м ² Д=600 мм, L=3830 мм Допустимые рабочие условия: трубное пространство: P= 0,65 кгс/см ² T= 100 °С Среда: реакционный водород, пары циклогексанона, циклогексанола Межтрубное пространство: P= 4,5 кгс/см ² T= от -40 до +40 °С Среда: аммиак
22.	Н-619	Насос центробежный	2	Разный	Тип 1ЦГ 25/50-7,5-1С Объемная подача = 25 м ³ /ч

№ пп	Номер позиции по схеме	Наименование оборудования	Количество	Материал, способы антикоррозионной защиты	Техническая характеристика
		для циклогексанона - сырца			Напор = 50 м вод. ст. Среда = циклогексанон, циклогексанол Мощность = 4,0 кВт Частота вращения = 2900 мин ⁻¹ Исполнение: взрывозащищенное, 1Exd II АТЗ
23.	X-625	Гидрозатвор	2	Сталь углеродистая ВСт3сп2	Вертикальный цилиндрический аппарат V=0,63 м ³ , Д-600 мм, Н-2200 мм Допустимые рабочие условия: P= 400 мм вод. ст. T= 20÷30 °С Среда: азот, вода, пары органики
24.	E-626	Дренажный бак	1	Сталь углеродистая ВСт3сп5	Вертикальный цилиндрический аппарат V=0,4 м ³ , Д=800 мм, Н=800 мм Допустимые рабочие условия: P= 0,04 кгс/см ²

№ пп	Номер позиции по схеме	Наименование оборудования	Количество	Материал, способы антикоррозионной защиты	Техническая характеристика
					<p>$T = 30^{\circ}\text{C}$</p> <p>Среда: вода, циклогексанон, циклогексанол</p>
25.	Н-627	Насос центробежный для дренажной жидкости	1	Разный	<p>Тип 2АИ1С 3х2</p> <p>Объемная подача = $2 \div 6 \text{ м}^3/\text{ч}$</p> <p>Напор = $40 \div 50 \text{ м вод. ст.}$</p> <p>$T = \text{не более } 40^{\circ}\text{C}$</p> <p>Среда = циклогексанон, циклогексанол, вода</p> <p>Электродвигатель: тип ВАО 32-2</p> <p>Мощность = 4 кВт</p> <p>Частота вращения = 2900 мин^{-1}</p> <p>Исполнение: взрывозащищенное, 1Exd II АТЗ</p>
26.	С-639	Сепаратор водяного пара	2	Сталь углеродистая Днище Ст20К	<p>Вертикальный цилиндрический аппарат</p> <p>$V = 0,7 \text{ м}^3$, $D_{\text{н}} = 630 \text{ мм}$, $H = 3305 \text{ мм}$</p>

№ пп	Номер позиции по схеме	Наименование оборудования	Количество	Материал, способы антикоррозионной защиты	Техническая характеристика
				ВКСт3сп5	Допустимые рабочие условия: $P = 7,0 \text{ кгс/см}^2$ $T = 164 \text{ }^\circ\text{C}$ Среда: конденсат, пар

1.6. Патентный обзор

Источники информации патентного обзора: [9], [10], [11], [12], [13], [14].

Таблица № 2 –Патентный обзор.

Название, номер, дата патента.	Авторы патента	Описание патента
Способ модернизации установки для производства циклогексанона Номер заявки WO/2016/096844 Дата заявки: 23.06.2016	TINGE, Johan Thomas; (NL). VERSCHUREN, Iris; (NL).	Реферат: Процесс конструирования второго химического завода, при этом вторая химическая установка подходит для разделения циклогексанона из второй смеси, что вторая смесь включает продукты реакции от гидрирования фенола, при этом указанный способ включает: а) обеспечение первого химического завода, причем первая химическая установка подходит для разделения циклогексанона из первой смеси, при этом первая смесь содержит продукты реакции окисления циклогексана Во-первых, установка включает: i) дистилляционной колонны (с), подходящего для отгонки циклогексана верхнего погона; ii) отгонку верхнего погона дистилляционной колонны, пригодный для окисления циклогексана, циклогексанон; iii) блок (а), подходящего для

		<p>окисления циклогексана; иiv) блок рекуперации тепла (B) подходящие для рекуперации тепла из отходящего газа из блока окисления циклогексана, пригодный для окисления циклогексана;b) отключение в первом химическом заводе , Указанной дистилляционной колонны (с), подходящего для отгонки подвесной циклогексана, упомянутый блок окисления циклогексана (А) и упомянутый блок утилизации тепла), при этом вторая химическая установка включает дистилляционную колонну (F) подходящие для отгонки циклогексанона повторно от первого верхнего погона химического завода, в котором каждое из первого и второго химического завода химическая установка содержит перегонную колонну (E) подходящие для отгонки служебные компоненты, имеющие более низкую температуру кипения, чем циклогексанон Дистилляционная колонна (G) подходит для отгонки воздушной смеси, содержащей циклогексанол и циклогексанон в мас: мас отношение,</p>
--	--	--

		по меньшей мере, 4: 1; и дегидрирования циклогексанола блока (н), подходящие для дегидрирования циклогексанола в циклогексанон.
--	--	---

Продолжение таблицы № 2

Название, номер, дата патента.	Авторы патента	Описание патента
Способ получения циклогексанона дистиляцией Номер публикации: 20110054142 Дата публикации: 03.03.2011	Horsels Marleen Parton Rudy Francols Maria Jozef Tinge Johan Thomas	Реферат: Настоящее изобретение относится к способу непрерывного получения циклогексанона из фенола с использованием катализатора, содержащего по меньшей мере один каталитически активный металл, выбранный из платины и палладия, содержащего а) гидрирование фенола с образованием потока продукта, содержащего циклогексанон и непрореагировавший фенол; б) отделение по меньшей мере части потока продукта Или, по меньшей мере, часть потока продукта, из которых один или более компонентов, имеющих более низкую температуру кипения, чем у циклогексанона были удалены, на первую фракцию,

		<p>содержащую циклогексанон, и вторую фракцию, содержащую фенол и циклогексанол, с использованием дистилляции;с) разделение второй фракции на третью фракцию, обогащенную циклогексанолом, и четвертую фракцию, обогащенную фенолом и, с использованием дистилляции;d)-обработку по крайней мере части четвертой фракции на дополнительной стадии дистилляции, образуя пятую фракцию и шестую фракцию, причем пятая фракция обогащена по фенолу по сравнению с шестой фракции, и где шестая фракция содержит побочные продукты с более высокой точкой кипения, чем фенол и фенол, в котором этапd) проводят в вакуумную дистилляционную колонну, снабженную тарелок в нижней части колонны, при этом в верхней части колонны, те В части над загрузочным отверстием, упаковочный материал присутствует вместо тарелок в, по меньшей мере, часть указанной верхней части, упаковочный материал имеет сравнимую или улучшенную эффективность</p>
--	--	--

		разделения, и обеспечивает уменьшение падения давления, по меньшей мере, на 30%, предпочтительно более чем на 50%, по сравнению со случаем с тарелками в верхней части, при прочих аналогичных условиях дистилляции.
--	--	--

Продолжение таблицы № 2

Название, номер, дата патента.	Авторы патента	Описание патента
<p>Способ получения катализатора дегидрирования циклогексанона и циклогексанола в газовой фазе</p> <p>Номер публикации: 104437488</p> <p>Дата публикации: 25.03.2015</p>	<p>SUN ZHONGHUA</p> <p>YIN YUSHENG</p> <p>ZHANG HAO</p> <p>YUAN HAORAN</p> <p>WU JIENUA</p> <p>LYU FENG</p>	<p>Реферат:</p> <p>Настоящее изобретение принадлежит к технической области производства катализатора, и обеспечивает способ получения циклогексанола, циклогексанона дегидрирования катализатора газовой фазы. Основным ингредиентом катализатора по изобретению является Cu/SiO₂, способ получения представляет собой способ фракционного осаждения и, в частности, включает следующие этапы: проведение осаждения на определенное количество осадителя и силиказоль</p> <p>Раствор нитрата меди, с добавлением в раствор для осаждения, промывания, отделения твердых веществ</p>

		от жидкости, сушку, обжарку и затем таблетирования для формирования. Катализатор имеет характеристики, высокую активность, высокую селективность, небольшой доли и тому подобное.
--	--	---

Продолжение таблицы № 2

Название, номер, дата патента.	Авторы патента	Описание патента
Способ получения циклогексанона Множественной дисциплине Номер публикации: 20110028675 Дата публикации : 03.02.2011	Van Dortmont Godefridus Maria J. Horsels Marleen Parton Rudy Francois Maria Jozef Tinge Johan Thomas	Реферат: Настоящее изобретение относится к способу непрерывного получения циклогексанона из фенола с использованием катализатора, содержащего по меньшей мере один каталитически активный металл, выбранный из платины и палладия, включающий гидрирование фенола с образованием потока продукта, содержащего циклогексанон и непрореагировавший фенол; разделение по меньшей мере части потока продукта, или, по меньшей мере, часть потока продукта, из которых один или более компонентов, имеющих более низкую температуру кипения, чем у циклогексанона были удалены На первую фракцию,

		<p>содержащую циклогексанон, и вторую фракцию, содержащую фенол и циклогексанол, с использованием дистилляции; разделение второй фракции на третью фракцию, обогащенную циклогексанолом, и четвертую фракцию, обогащенную фенолом, с использованием дистилляции; -обработку по крайней мере части четвертой фракции на дополнительной стадии дистилляции, образуя пятую фракцию и шестую фракцию, причем пятая фракция обогащена по фенолу по сравнению с шестой фракции И где шестая фракция содержит побочные продукты с более высокой точкой кипения, чем фенол и фенол; и этот способ характеризуется в дополнительную стадию непрерывного или периодического отделения по меньшей мере части шестой фракции еще дополнительной стадии дистилляции, в результате чего образуется седьмая фракция и восемь фракции, причем седьмая фракция обогащена по фенолу по сравнению с восемью фракции И в котором восемь фракция</p>
--	--	---

		содержит побочные продукты с более высокой точкой кипения, чем фенол.
--	--	---

Продолжение таблицы № 2

Название, номер, дата патента.	Авторы патента	Описание патента
Способ получения циклогексанона из циклогексанола Номер заявки: 15227255 Дата заявки: 03.08.2016	Деннис Айзеле Бита Филлипи	Реферат: Предлагается способ формирования циклогексанона из циклогексанола, в котором два или более реактора дегидрирования циклогексанола и связанные с ними конденсаторы последовательно соединены последовательно, чтобы увеличить относительную концентрацию циклогексанона в формованном продукте с использованием принципа Ле Шателье.

Продолжение таблицы № 2

Процесс производства смеси содержащей циклогексанола и циклогексанон Номер заявки: 15175465 Дата заявки: 06.07.2015	Мартинес Вильемус Рудольф Мария Тинге Йохан Томас	Реферат: Непрерывный способ получения смеси, включающей циклогексанон и циклогексанол, путем гидрирования фенола, причем этот процесс выполняется в многотрубном реакторе, отличающийся тем, что указанный многотрубный реактор используется для
---	---	---

		дегидрирования циклогексанола; Химический завод, подходящий для гидрирования фенола, содержащий многотрубный реактор; Циклогексанон, полученный на химической установке, содержащей многотрубный реактор; И процесс создания такого растения.
--	--	---

Продолжение таблицы № 2

Название, номер, дата патента.	Авторы патента	Описание патента
СПОСОБ ДЕГИДРИРОВАНИЯ ЦИКЛОГЕКСАНОЛА В ЦИКЛОГЕКСАНОН Заявка: 2012152038/04, 04.12.2012	Садивский Сергей Ярославович (RU), Ардамаков Сергей Витальевич (RU), Хусаенов Ильдар Фаезрахимович (RU)	Реферат: Изобретение относится к способу дегидрирования циклогексанола в циклогексанон. Предложенный способ дегидрирования циклогексанола в циклогексанон осуществляют в газовой фазе при повышенной температуре в присутствии катализатора, содержащего активные компоненты, на 56÷88 мас.% состоящие из оксида цинка и на 8,0÷39,0 мас.% из карбоната кальция. При этом применяемый катализатор используют в виде каталитической системы с

		<p>чередованием по ходу газа трех слоев различной высоты, заполненных в различных соотношениях катализатора и керамики. Первый - защитно-распределительный - слой состоит из керамики высотой 10÷20 см. Второй слой зоны зажигания основной реакции состоит из катализатора и керамики в соотношении 1:1 с высотой слоя в диаметр газохода дымовых газов. Третий слой зоны основной реакции состоит из катализатора и керамики в соотношении 3:1 с высотой слоя, равной высоте аппарата до первого входа газохода. Предложенный способ позволяет избежать нежелательного протекания побочных реакций, предотвратить коксование катализатора и увеличить срок его службы. 2 з.п. ф-лы, 1 табл.</p>
--	--	---

Приложение к таблице

Газофазный процесс дегидрирования циклогексанола в циклогексанон осуществляется при повышенной температуре с использованием катализатора состоящего из активных компонентов: 56÷88мас.% состоящий из оксида цинка и на 8,0÷39,0мас.% из карбоната кальция. Применяется с чередованием слоев отличающихся по высоте в различных соотношениях керамики и катализатора: Первым слоем является защитно-распределительный состоящий из керамики с высотой 10÷20 см, и второй слой является зоной зажигания целевой реакции из керамики и катализатора в соотношении 1:1 с высотой слоя соответствующей диаметру газохода. Третий слой состоит из соотношения 3:1 катализатора к керамике с высотой слоя соответствующей высоте аппарата до первого входа газохода.

Данный способ отличается тем, что процесс осуществляется в температурном интервале от 320 до 440°C и объемной скорости подачи сырья 1,5÷2,0 ч⁻¹, а также, что перед запуском процесса в реактор пропускают азот в течении 6÷8 часов с поддержанием температуры от 320 до 350°C. Данные по исследованию данного процесса представлены в таблице № 3

Таблица № 3- Результаты экспериментальных исследований.

Технологические параметры процесса дегидрирования					
Параметры процесса	1	2	3	4	5
Температура процесса, °С	370-380	350-360	320-330	430-440	350
Объемная скорость, ч ⁻¹	1,5	1,5	1,5	2	1
Выход циклогексанона, мас. %	84,4	86,5	85,9	83,5	82,4
Конверсия, %	88,8	89,5	88,2	88,1	87,6
Селективность, %	96,0	97,7	98,6	95,5	94,6
Остаточный циклогексанол, %	9,7	9,1	10,2	10,3	10,7
Выход дианона, %	1,8	0,5	0,3	1,3	2,6
Сумма побочных, %	4,1	3,9	3,6	4,9	4,3
Выход на режим, ч	8	8	8	8	14

2.ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Характеристика сырья и готового продукта.

Технический циклогексан получаемый гидрированием бензола

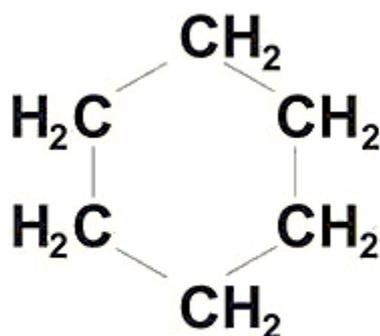
Циклогексан технический выпускается по ГОСТ 14198-78.

Настоящий стандарт распространяется на технический циклогексан, получаемый гидрированием бензола.

Формулы:

Эмпирическая формула C_6H_{12}

Структурная формула



Молекулярная масса – 84,16.

Циклогексан – бесцветная, легко воспламеняющаяся жидкость

Плотность при 20 °С- 778,5 кг/м³

Температура кипения

при 760 мм рт. Ст. +80,7 °С

Температура плавления -6,2-6,6 °С

В воде циклогексан практически не растворим, его растворимость в воде при 58 °С составляет 0,035 % вес [2][6][8].

Растворимость воды в циклогексане при температуре 19 °С составляет 0,01% вес.

С водой циклогексана образует азеатропную смесь (при содержании воды 9 %), кипящую при температуре 68,95 °С.

Упругость паров циклогексана:

При температуре:

20 °С –76,9 мм рт. ст.

40 °С –161,7 мм рт. ст.

80 °С –741,3 мм рт. ст.

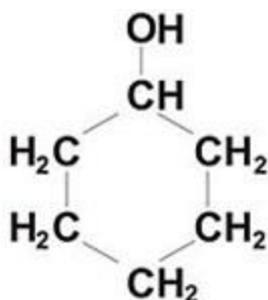
100 °С –703 мм рт. ст.

150 °С –4123 мм рт. ст.

При работе агрегата гидрирования фенола на никельсодержащем катализаторе, готовым продуктом является циклогексанол – технический.

Эмпирическая формула $C_6H_{12}O$

Структурная формула



Молекулярный вес -100,16

Плотность при 25 °С -945 кг/м³

Температура кипения при 760 мм рт. Ст .-+161,1 °С

температура плавления +24 °С

температура вспышки +67 °С

Присутствие небольших количеств воды или циклогексанона резко понижает температуру плавления циклогексанола.

Растворимость циклогексанола

в воде при T=11 °С 5,65 %

Растворимость воды в циклогексаноле

при T=11 °С 11,27 %

С водой циклогексанол образует азеотропную смесь состава:

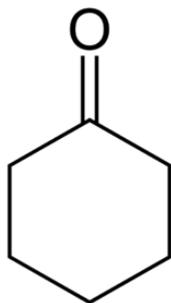
Вода – 70,4 %

Циклогесанол –29,6 %

Температура кипения азеотропной смеси при давлении 760 мм рт. ст. +

97,8 °С [5][6]

Циклогексанон



Химическая формула $C_6H_{10}O$.

Горючая, бесцветная, маслянистая жидкость с ацетоно-мятным запахом.

В водерастворим плохо.

Удельный вес -0,948 г/см³

Температура кипения -+155,6 °С

Температура плавления - 40,2 °С

Температура вспышки -+40 °С

Температура самовоспламенения -+495 °С.

Пределы взрываемости паров в смеси с воздухом -1,3÷9,0 % об.

Пары тяжелее воздуха в 3,38 раза

Молекулярный вес - 98,14

ПДК - 30,0 мг/м³

Относится ко 3 классу опасности по степени воздействия на организм

[5][7].

Катализатор цинк-кальциевый:

БАСФ Н5-15 (фирмы БАСФ) представляет собой соединения: CaO, ZnO, Na₂O, графит, спрессованные в таблетки серого цвета размера 7x7x3 Не горюч, плохо растворим в воде, без запаха.

Насыпной вес: 980 кг/м³ (отработанный).

Состав: ZnO -54,0 %;

CaO -44,7 %;

Na₂O -0,59 %;

C -12,2 % [6][5]

Катализатор цинк-хромовый

Представляет собой смесь окиси цинка с хромом, спрессованную в таблетки размером 9x9 мм, зеленовато-желтоватого цвета. Содержание цинка в пересчете на окись цинка 55,5, содержание хрома шестивалентного 34,0 %

Насыпной вес не более 2,1 кг/л.

Пожаровзрывобезопасен

ПДК - 0,01 мг/м³ (в пересчете на CrO₃) [6][5]

2.2. Описание технологической схемы и оборудования.

Для переработки циклогексанола–ректификата в циклогексанон–сырец на стадии дегидрирования предусмотрено три агрегата дегидрирования. Мощность агрегата по циклогексанолу 6000 кг/ч.

Мощность агрегата лимитируется производительностью газодувки поз. В-604 и давлением пара реагирующей смеси в реакторе поз. Р- 606.

Количество анола-ректификата подаваемого на позицию агрегата дегидрирования измеряется диафрагмой и автоматически поддерживается регулятором FIRC-607, который установлен на линии подачи сырья в подогреватель Т-607, где подогревается до 90 °С , за счет теплоты передаваемой парами за Т-608.

Сырье(анол-ректификат) поступает в трубное пространство Т-601 (испаритель), где происходит его испарение и перегревание до Т=200°С. (Пар давления 2 Мпа).

Далее анол-ректификат в паровой фазе поступает в сепаратор поз. С-602, где происходит отделение паров от капельного анола-ректификата. Уровень жидкой фазы в сепараторе поз. С-602 замеряется по прибору поз. LIАh-611 и максимальное значение передается на центральный пункт управления.

Из С-602 (сепаратор) сырье поступает в Т-608 (теплообменник подогреватель), где подогревается до Т=340°С. Пары сырья из Т-608 (перегреватель) поступают в Р-606 (реактор дегидрирования).

Пары анола-ректификата из перегревателя поз. Т-608 поступают в трубное пространство реактора дегидрирования поз. Р-606.

Реакция дегидрирования анола-ректификата в анон-сырец происходит в присутствии катализатора цинк-кальциевого (фирмы БАСФ) или цинк-хромового при температурном режиме не более 420 °С. [5]

Тепло к катиализатору подводится из Х-605 (камера сгорания)

Снижение перепада температур между зоной катализатора и греющим газом осуществляется циркуляцией дымовых газов:

К форсункам Х-605 подается смесь из природного газа и воздуха, которая нагнетается из В-603 (воздуходувка) .

При одновременной работе всех агрегатов необходима , работа двух воздуходувок, одна из которых находится в резерве.

Температура в топке составляет 1240°С ,так как сжигают природный газ и избыточный воздух. Расход воздуха в Х-605 задается автоматически, и расход газа и воздуха определяется из необходимости процентного содержания кислорода в циркулирующих газах. Оно не должно превышать 11%. (соотношение газ воздух 1 ÷ 21,7).

Природный газ (давление 0,6 МПа) редуцируется клапаном до давления не более 0,2 МПа (2,0 кгс /см²) и через клапан FIRC –606 с давлением 0,03 Мпа подается к горелкам Х-605.

Газы с Т= 1250 °С , наверху камеры сжигание смешиваются с газами из В-604 с Т=340-475 °С . Данная смесь поступает в Р-606.Отдав тепло газы поступают на В-604. Избыток газа сбрасывается регулятором давления.

Температура реакционной зоны постоянна за счет расхода природного газа к форсункам Х-605.

В целях обеспечения безопасных условий работы агрегатов дегидрирования, предусмотрены следующие блокировки :

Закрывается отсекагель на общем коллекторе природного газа, при :

а) снижении давления воздуха на нагнетании воздуходувки поз. В-603 до 0,005 МПа (0,05 кгс/см², 500 мм.в.ст.)

б) снижение давления природного газа в общем коллекторе до $P=0,05$ МПа ($0,5$ кгс/см²)

в) остановка воздуходувки поз. В-603.

Закрывается отсекающий на агрегатном коллекторе природного газа, при

а) остановке циркуляционной газодувки поз. В-604.

б) повышении температуры дымовых газов до 500°C

в) понижении температуры дымовых газов до 340°C

г) понижении давления дымовых газов на нагнетании газодувки поз. В-604/1,2 до $0,002$ МПа ($0,02$ кгс/см²) и газодувки поз. В-604/3 до $0,001$ МПа ($0,01$ кгс/см²).

3. Остановка циркуляционной газодувки поз. В-604/1,2,3, при:

- повышении температуры подшипников газодувки до 70°C ;
- понижении давления масла на подшипники газодувки до $0,02$ МПа ($0,2$ кгс/см²)

4. Остановка циркуляционной газодувки поз. В-604/1,2 также при: - повышении температуры подшипников электродвигателя газодувки до 90°C

5. Закрывается отсекающий на линии анола-ректификата на 3 агрегат, при:

- остановке газодувки поз. В-604/3
- понижении давления дымовых газов на нагнетании газодувки поз. В-604/3 до $0,001$ МПа ($0,01$ кгс/см²). [5]

- повышении температуры циркуляционных дымовых газов до 500°C
- понижении температуры циркуляционных дымовых газов до 340°C .

6. Включается резервный маслонасос газодувки поз. В-604/1,2,3 при:

- снижении давления в системе маслосмазки до $0,025$ МПа ($0,25$ кгс/см²)

Далее, реакционная смесь из Р-606 с $T=400^{\circ}\text{C}$, поступает в Т-608, где происходит охлаждение смеси до 210°C , передавая свою теплоту на перегрев паров анола-ректификата, поступающего в Р-606. [5]

Далее реакционная смесь охлаждается до $T=90^{\circ}\text{C}$ за счет отдачи тепла исходному анолу-ректификату в подогревателе Т-607.

Из Т-607 реакционная смесь подается в Т-609 (холодильник

конденсатор),

где продукты реакции дегидрирования охлаждаются до $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$

В трубное пространство Т-609 поступает вода и в межтрубном пространстве реакционная смесь разделяется на фазы.

Жидкая фаза – циклогексанон-сырец (циклогексанол циклогексанол, вода, примеси) из холодильника-конденсатора поз.Т-609 направляется через гидрозатвор поз. Х-613 в сборник анона-сырца поз. Е-614. Высота затвора в гидрозатворе поз. Х-613 равна 3,3 м и рассчитана на давление в холодильнике-конденсаторе поз.Т-609 не более 0,03 МПа (0,3 кгс/см²). Из сборника анона-сырца поз. Е-614 анон-сырец насосом поз. Н-619 откачивается на склад. [5]

Уровень анона-сырца в сборнике поз. Е-614 замеряется, регулируется и автоматически поддерживается регулятором уровня Н-619.

Водород, образовавшийся в результате реакции дегидрирования и из Т-609 с $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ поступает в трубное пространство испарителей Т-616, где продукты охлаждаются до $T = 3-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. [5]

Уровень жидкого аммиака в аммиачном холодильнике поз. Т-616 поддерживается постоянным автоматически с помощью регулятора уровня, клапан которого установлен на линии подачи жидкого аммиака в аммиачный холодильник. Эта смесь поступает в С-615. Из сепараторов поз. С-615 сконденсировавшиеся пары анона-сырца и циклогексанола отделяются от водорода и через гидрозатвор поз. Х-613 сливаются в сборник анона-сырца поз. Е-614.

В сборник анона-сырца Е-614 и в Х-613 (гидрозатвор) поступает азот Р= 400 мм вод.ст. с целью получения «азотной подушки». Водород (реакционной) из С-615 направляется в корпус 704 на гидрирование бензола. [5]

Все гидрозатворы и емкости содержащие органические продукты, находятся под давлением азота. Азотная подушка в гидрозатворах и емкостях создается за счет давление азота 0,04 кгс/см², получаемого из азота давление 6 кгс/см² с помощью регулятора давления и поддерживается гидрозатвором. Для опорожнения аппаратов имеется дренажная емкость поз. Е-626. Дренажные

стоки из емкости поз. Е-626 насосом подаются по линию анона-сырца от насосов Н-619 [5].

Регенерация катализатора

В процессе работы реактора дегидрирования происходит выделение продуктов осмола, в результате чего снижается активность катализатора. Регенерация цинк-хромового катализатора производится 1 раз в 2-3 месяца, когда степень конверсии циклогексанона снижается ниже 60 %.

Регенерация цинк-кальциевого катализатора БАСФ Н5-15, производится по необходимости, для продления срока службы.

Регенерация происходит в две стадии:

1. Прожиг катализатора азото-воздушной смесью.
2. Восстановление водородом.

Восстановление водородом цинк-кальциевого катализатора БАСФ Н5-15 не производится. [5]

Прожиг катализатора азото-воздушной смесью.

Перед подачей азото-воздушной смеси прекращается подача анола-ректификата в теплообменник поз. Т-607, затем продукт из теплообменника поз.Т-607 дренируется на всас насоса Н-619, который продолжает откачивать продукты дегидрирования из сборника поз.Е-614 с температурой не более 45°С

Агрегат продувается азотом по линии анола до отсутствия горючих компонентов в отходящем газе, что определяется по анализу. [5]

Прожиг катализатора производится азотом с содержанием кислорода не более 8 % объемных при температуре не более 400 °С. При содержании в азоте кислорода менее 0,5 % объемных в азот добавляется воздух. Подготовка смеси азота с кислородом производится вручную. Азот давление 6 кгс/см² и воздух с давлением 13-16 кгс/см² от коллектора подаются через регулирующие вентили, дросселируются до давления не более 0,65 кгс/см² и смешиваются в небольших количествах по показаниям расходомеров для азота и воздуха. Содержание кислорода в азотно-воздушной смеси определяется автоматически с проверкой лабораторным путем и должно быть не более 8 % объемных. [5]

Азотно-воздушная смесь подается в линию анола-ректификата перед теплообменником поз. Т-607 и далее через подогреватель анола поз. Т-601, а перегреватель поз. Т-608 в реактор поз. Р-606 и далее с температурой не более 400 °С поступает в межтрубное пространство перегревателя поз. Т-608, где отдает свое тепло на подогрев азотно-воздушной смеси, которая идет в трубном пространстве и далее проходит межтрубное пространство холодильника поз. Т-609.

В холодильнике поз. Т-609 азотно-воздушная смесь охлаждается до температуры не более 40 °С за счет подачи в трубное пространство охлаждающей оборотной воды. Охлажденная газовая смесь проходит через аммиачный холодильник, где дополнительно охлаждается и направляется через сепаратор поз. С-611 в атмосферу. Жидкая фаза направляется через гидрозатвор в дренажную ёмкость. [5]

Уровень аммиака в холодильнике поддерживается автоматически регулятором уровня и клапаном которого, установлен на линии подачи жидкого аммиака. Регенерация считается законченной при содержании CO_2 в азотовоздушной смеси на выходе из холодильника поз. Т-609 не более 0,2 % объемных.

Восстановление водород катализатора производится при температуре не более 410 °С водородом, поступающем с давлением не более 24 кгс/см² в отделение дегидрирования из цеха С помощью регулятора давления и клапана, установленного на линии водорода, давление понижается до 2 кгс/см². Снижение давления до 0,65 кгс/см². производится вручную дроссельным вентилем, после чего водород поступает в линию анола-ректификат перед теплообменником поз. Т-607.

Подача водорода на восстановление производится после прекращения подачи воздуха и обязательной продувки агрегата от кислорода чистым азотом.

При восстановлении катализатора необходимо строго следить за температурным режимом в зоне катализатора реактора поз. Р-606. В случае

увеличения температуры в реакторе более 410°C подача водорода прекращается и увеличивается подача азота. [5]

Чертеж технологической схемы представлен на приложении 1.

3. РАСЧЁТНАЯ ЧАСТЬ

3.1 Материальный и тепловой баланс

Для расчета материального баланса возьмем данные по работе предприятия ПАО «КуйбышевАзот»[5][21].

Для переработки циклогексанола – ректификата в циклогексанон – сырец на стадии дегидрирования предусмотрено три агрегата дегидрирования. Мощность агрегата по циклогексанолу 6000 кг/ч

Исходный процесс:

Таблица № 4- данные по нагрузке действующего реактора на предприятии «КуйбышевАзот».

Производительность циклогексанолу, кг/ч	по	6000
Состав реакционной смеси: моль %		
циклогексанон		70
циклогексанол		25
гексен		5

Молярные массы веществ:

$$M_r(C_6H_{11}OH) = 100 \text{ кг/кмоль}$$

$$M_r(C_6H_{10}O) = 98 \text{ кг/кмоль}$$

$$M_r(C_6H_{10}) = 82 \text{ кг/кмоль}$$

$$M_r(H_2O) = 18 \text{ кг/кмоль}$$

$$M_r(H_2) = 2 \text{ кг/кмоль}$$

1. Производительность реактора по циклогексанолу:

$$P_P = 6000 \text{ кг/ч}$$

$$W_{Pp} = 60 \text{ кмоль/ч}$$

2. Состав реакционной смеси:

циклогексанола:

$$M(\text{Анола}) = \frac{m(\text{анола})}{Mr(\text{анола})} \cdot 25\% = \frac{6000}{100} \times 25\% = 1500 \text{ кг / ч}$$

$$W(\text{Анола}) = \frac{m(\text{анола})}{Mr(\text{анола})} = \frac{1500}{100} = 15 \text{ кмоль / ч}$$

циклогексанона:

$$W(\text{Анона}) = W_{\text{пп}}(\text{анола}) \times 0,7 = 60 \times 0,7 = 42 \text{ кмоль / ч}$$

C₆H₁₀O в реакционной смеси 70% от общего числа моль.

$$M(\text{Анона}) = W(\text{анола}) \times Mr(\text{анона}) = 42 \times 98 = 4116 \text{ кг / ч}$$

циклогексен: его в реакционной смеси 5%

W (C₆H₁₀) - 5%

$$W(\text{гексена}) = W_{\text{пп}}(\text{анола}) \times 0,05 = 60 \times 0,05 = 3 \text{ кмоль / ч}$$

$$M(\text{гексена}) = W(\text{гексена}) \times Mr(\text{гексена}) = 3 \times 82 = 246 \text{ кг / ч}$$

Количество полученной воды.

$$W(\text{воды}) = W(\text{гексена}) = 3 \text{ кмоль / ч}$$

$$M(\text{воды}) = W(\text{воды}) \times Mr(\text{воды}) = 3 \times 18 = 54 \text{ кг / ч}$$

Количество и масса полученного водорода:

$$W(\text{водорода}) = W(\text{анола}) = 48 \text{ кмоль / ч}$$

$$M(\text{водорода}) = W(\text{водорода}) \times Mr(\text{водорода}) = 48 \times 2 = 96 \text{ кг / ч}$$

$$W(\text{H}_2) = W(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}) = 48 \text{ кмоль/час, } m(\text{H}) = 48 \times 2 = 96 \text{ кг/час}$$

Оптимизации процесса состоит в замене катализатора, т.к. при его замене вырастает конверсия циклогексанола по сравнению с уже действующим процессом. Расчеты делаем на основе патента.

Из него делаем вывод что самой оптимальной температурой является интервал 350-360 °С.

Таблица № 5- Теоритические данные по нагрузке оптимизированного процесса

Производительность циклогексанолу, кг/ч	по	6000
Состав реакционной смеси: моль %		
циклогексанон		89,5
циклогексанол		6,6
гексен		3,9

Молярные массы веществ:

$$M_r(C_6H_{11}OH) = 100 \text{ кг/кмоль}$$

$$M_r(C_6H_{10}O) = 98 \text{ кг/кмоль}$$

$$M_r(C_6H_{10}) = 82 \text{ кг/кмоль}$$

$$M_r(H_2O) = 18 \text{ кг/кмоль}$$

$$M_r(H_2) = 2 \text{ кг/кмоль}$$

1. Производительность реактора по циклогексанолу:

$$PP = 6000 \text{ кг/ч}$$

$$W_{пр} = 60 \text{ кмоль/ч}$$

2. Состав реакционной смеси:

циклогексанол:

$$M(Анол) = \frac{m(анола)}{M_r(анола)} \cdot 6,6\% = \frac{6000}{100} \times 6,6\% = 396 \text{ кг/ч}$$

$$W(Анол) = \frac{m(анола)}{M_r(анола)} = \frac{396}{100} = 3,96 \text{ кмоль/ч}$$

циклогексанон:

$$W(\text{Анона}) = W_{\text{пп}}(\text{анола}) \times 0,7 = 60 \times 0,895 = 53,7 \text{ кмоль/ч}$$

$\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}$ в реакционной смеси 89,5% от общего числа моль.

$$M(\text{Анона}) = W(\text{анола}) \times Mr(\text{анола}) = 53,7 \times 98 = 5262,6 \text{ кг/ч}$$

циклогексен: его в реакционной смеси 3,9 %

$$W(\text{C}_6\text{H}_{10}) = 3,9 \%$$

$$W(\text{гексена}) = W_{\text{пп}}(\text{анола}) \times 0,039 = 60 \times 0,039 = 2,34 \text{ кмоль/ч}$$

$$M(\text{гексена}) = W(\text{гексена}) \times Mr(\text{гексена}) = 2,34 \times 82 = 191,88 \text{ кг/ч}$$

Количество полученной воды.

$$W(\text{воды}) = W(\text{гексена}) = 2,34 \text{ кмоль/ч}$$

$$M(\text{воды}) = W(\text{воды}) \times Mr(\text{воды}) = 2,34 \times 18 = 42,12 \text{ кг/ч}$$

Количество и масса полученного водорода:

$$W(\text{водорода}) = W(\text{анола}) = 53,7 \text{ кмоль/ч}$$

$$M(\text{водорода}) = W(\text{водорода}) \times Mr(\text{водорода}) = 53,7 \times 2 = 107,4 \text{ кг/ч}$$

Таблица № 6 Материальный баланс действующего процесса

Наименование компонента	Приход		Наименование компонента	Расход	
	Кг/ч	%, масс		кг	%, масс
Циклогексанол	6000	100	Циклогексанол	1500	25
			Циклогексанон	4116	68,6
			Циклогексен	246	4,1
			Вода	54	0,9
			Водород	84	1,4
Итого	6000	100	Итого	6000	100

Таблица № 7 Материальный баланс оптимизированного процесса

Наименование компонента	Приход		Наименование компонента	Расход	
	г/ч	%, масс		кг	%, масс
Циклогексанол	6000	100	Циклогексанол	396	6,6
			Циклогексанон	5262,6	87,71
			Циклогексен	191,88	3,198
			Вода	42,12	0,702
			Водород	107,4	1,79
Итого	6000	100	Итого	6000	100

3.2. Энергетический баланс реактора

Тепловой эффект реакции при стандартных условиях

Любой тепловой баланс [15] основывается на законе сохранения энергии, согласно которому количество теплоты, поступающей в процесс, равно количеству теплоты, исходящему из процесса:

$$\Sigma Q' = \Sigma Q''$$

При составлении теплового баланса стоит учесть, что к данному реактору подводится тепло, и есть потери теплоты в окружающую среду, следовательно данный тепловой баланс стоит рассчитывать, как сумму теплота исходных веществ и подводимого тепла, к сумме исходящего тепла и тепла ушедшего в атмосферу.

Таким образом, уравнение теплового баланса имеет следующий вид

$$Q_{\text{исх}} + Q_{\text{т}} = Q_{\text{прод}} + Q_{\text{п}}$$

Расчетная часть:

1) величины теплот образования веществ

$$\Delta H_{\text{обр}} \text{C}_6\text{H}_{11}\text{OH} = 352,9 \text{ кДж/кмоль}$$

$$\Delta H_{\text{обр}} \text{C}_6\text{H}_{10} = - 7,1176 \text{ кДж/кмоль}$$

$$\Delta H_{\text{обр}} \text{C}_6\text{H}_{10}\text{O} = - 7,1176 \text{ кДж/кмоль}$$

$$\Delta H_{\text{обр}} \text{H}_2 = - 285,8 \text{ кДж/кмоль}$$

$$\Delta H_{\text{обр}} \text{H}_2\text{O} = - 285,840 \text{ кДж/кмоль}$$

2) тепловой эффект реакции (изменение энтальпии реакции) при стандартных условиях (25⁰С)

$$\Delta H_{298} = -352,9 + 285,80 + 7,1176 + 7,1176 + 285,840 = 205,97552 \text{ кДж/кмоль}$$

Изменение энтальпии экзотермической реакции показывается с отрицательным знаком.

$$\Delta H_{298} = - 285,840 \text{ кДж}$$

Физическое тепло реагентов

Физическое тепло реагентов может быть найдено по одной из формул [15]:

$$Q_{\Phi} = n \cdot c \cdot \Delta t;$$

$$Q_{\Phi} = m \cdot c \cdot \Delta t;$$

$$Q_{\Phi} = v \cdot c \cdot \Delta t;$$

$$Q_{\Phi} = n \cdot \Delta H$$

где n – количество вещества, кмоль;

m – Масса вещества, кг;

v – Объем вещества (газа), м³;

c – Теплоемкость вещества при соответствующей температуре,

(кДж/кмоль*град, кДж/кг*град, кДж/м³*град)

H – теплосодержание продуктов при данной температуре, кДж/кмоль;

t – температура реагентов (обычно ⁰С).

Количество реагентов берется по данным материального баланса.

Температура реагентов приводится в задании или принимается на

основании литературных данных.

Теплоемкости веществ берутся по справочным данным:

$$C = a + (b \cdot T) + (c'/T^2)$$

Общая формула будет иметь вид $-51,72 + (0,598 \cdot T) + (-0,000230/T^2)$

$$T = 723$$

Для рабочего реактора

$$C_p(\text{H}_2\text{O}) = 30 + (10,71 \cdot T) + (0,33/T^2) = 30 + 7743,33 + 63130 \cdot 10^{-7} = 7803,96$$

кДж/кмоль*град

$$C_p(\text{H}_2) = 37 + (0,00059 \cdot T) + (-0,71/T^2) = 37 + 0,42657 + 0,136 = 37,43$$

кДж/кмоль*град

$$C_p = 51,72 + 432,354 \text{ кДж/кмоль*град}$$

$$C_p(\text{C}_6\text{H}_{11}\text{OH}) = 484,074 \text{ кДж/кмоль*град}$$

$$C_p(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}) = 484,074 \text{ кДж/кмоль*град}$$

$$C_p(\text{C}_6\text{H}_{10}) = 484,074 \text{ кДж/кмоль*град}$$

Физическое тепло реагентов в кДж:

$$Q(\text{C}_6\text{H}_{11}\text{OH}) = 60 \cdot 484,074 + 4,4 \cdot 10^{-10} \cdot 400 = 29044,44 \text{ кДж:}$$

$$Q(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}) = 42 \cdot 484,074 + 4,4 \cdot 10^{-10} \cdot 400 = 20331,11 \text{ кДж:}$$

$$Q(\text{C}_6\text{H}_{10}) = 3 \cdot 484,074 + 4,4 \cdot 10^{-10} \cdot 400 = 1452,22 \text{ кДж:}$$

$$Q(\text{H}_2\text{O}) = 3 \cdot 7803,96 + 4,4 \cdot 10^{-10} \cdot 400 = 23411,88 \text{ кДж:}$$

$$Q(\text{H}_2) = 42 \cdot 37,43 + 4,4 \cdot 10^{-10} \cdot 400 = 1572,06 \text{ кДж:}$$

Тепловой баланс процесса

Полученные расчетные данные представляются в таблице

$$Q_{\text{исх}} + Q_T = Q_{\text{вых}} + Q_{\text{пот}}$$

$$Q_{\text{исх}} = Q(\text{C}_6\text{H}_{11}\text{OH}) = 29044,44 \text{ кДж}$$

$$Q_{\text{ВЫХ}} = C(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}) + C(\text{C}_6\text{H}_{10}) + Q(\text{H}_2\text{O}) + Q(\text{H}_2) = 20331,11 + 1452,22 + 23411,88 + 1572,06 = 46767,27 \text{ кДж}$$

$$Q_{\text{T}} = (Q_{\text{ИСХ}} - Q_{\text{ВЫХ}}) / 0,9$$

При этом тепловые потери составят:

$$Q_{\text{П}} = Q_{\text{T}} \cdot 0,1$$

$$Q_{\text{ПОТ}} = 1969,203 \text{ кДж}$$

$$Q_{\text{T}} = 19692,03 \text{ кДж}$$

Для оптимизированного реактора:

Температура несколько ниже, и составляет 633 К

Теплоемкости веществ берутся по справочным данным:

$$C_p = a + (b \cdot T) + (c'/T^2)$$

Общая формула будет иметь вид: $51,72 + (0,598 \cdot T) + (-0,000230/T^2)$

$$C_p(\text{H}_2\text{O}) = 30 + (10,71 \cdot T) + (0,33/T^2) = 30 + 7,743 + 8,24 \cdot 10^{-7} = 6779,43$$

кДж/кмоль*град

$$C_p(\text{H}_2) = 37 + (0,00059 \cdot T) + (-0,71/T^2) = 37 + 0,42657 + 0,136 = 37,37$$

кДж/кмоль*град

$$C_p = 430,25 \text{ кДж/кмоль*град}$$

$$C_p(\text{C}_6\text{H}_{11}\text{OH}) = 430,25 \text{ кДж/кмоль*град}$$

$$C_p(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}) = 430,25 \text{ кДж/кмоль*град}$$

$$C_p(\text{C}_6\text{H}_{10}) = 430,25 \text{ кДж/кмоль*град}$$

Физическое тепло реагентов в кДж

$$Q(\text{C}_6\text{H}_{11}\text{OH}) = 60 \cdot 430,25 + 4,4 \cdot 10^{-10} \cdot 400 = 25815 \text{ кДж:}$$

$$Q(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}) = 53,7 \cdot 430,25 + 4,4 \cdot 10^{-10} \cdot 400 = 23104,43 \text{ кДж:}$$

$$Q(\text{C}_6\text{H}_{10}) = 2,34 \cdot 430,25 + 4,4 \cdot 10^{-10} \cdot 400 = 1006,79 \text{ кДж:}$$

$$Q(\text{H}_2\text{O}) = 2,34 * 6779,43 + 4.4 * 10^{-10} * 400 = 15863.87 \text{ кДж:}$$

$$Q(\text{H}_2) = 53,7 * 37,37 + 4.4 * 10^{-10} * 400 = 2006.8 \text{ кДж:}$$

Общее количество физического тепла на входе в аппарат составляет кДж

Тепловой баланс процесса

$$Q_{\text{исх}} + Q_{\text{T}} = Q_{\text{вых}} + Q_{\text{пот}}$$

$$Q_{\text{исх}} = Q(\text{C}_6\text{H}_{11}\text{OH}) = 29044,44 \text{ кДж}$$

$$Q_{\text{вых}} = C(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}) + C(\text{C}_6\text{H}_{10}) + Q(\text{H}_2\text{O}) + Q(\text{H}_2) = 23104.43 + 1006.79 + 15863.87 + 2006.8 = 41981.09 \text{ кДж}$$

Необходимо подвести теплоты для обогрева:

$$Q_{\text{T}} = (Q_{\text{исх}} - Q_{\text{вых}}) / 0.9$$

При этом тепловые потери составят:

$$Q_{\text{п}} = Q_{\text{T}} * 0,1$$

$$Q_{\text{п}} = 1796,32 \text{ кДж}$$

$$Q_{\text{T}} = 17963,41 \text{ кДж}$$

Таблица № 8 – Тепловой баланс для действующего процесса.

Приход тепла	кДж	Расход тепла	кДж
$Q_{\text{исх}}$	29044,44	$Q_{\text{кон}}$	46767,27
Q_{T}	17962,32	$Q_{\text{п}}$	1969,203
Итого	48736,47	Итого	48736,47

Таблица № 9 – Тепловой баланс для оптимизированного процесса.

Приход тепла	кДж	Расход тепла	кДж
$Q_{\text{исх}}$	25815	$Q_{\text{кон}}$	41981.09
Q_{T}	17962,41	$Q_{\text{п}}$	1796,32
Итого	43777,24	Итого	43777,41

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной бакалаврской работе представлена оптимизация процесса получения циклогексанона дегидрированием циклогексанола

По итогам работы:

Изучены литературные данные по процессам получения циклогексанона, свойствам этих процессов и условиями их проведения.

Оптимизирован технологический процесс получения циклогексанона, представлена аппаратурно-технологическая схема производства.

Проведены расчеты материального, теплового баланса выбранных процессов.

Представленная работа позволяет увеличить полезный выход на уже имеющемся производстве.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Издательство “Наука” (художественное оформление) . / Рецензенты академик Н.П.Федоренко , член-корреспондент РАН А.Л. Лапидус, 2003
2. Химическая энциклопедия: в 5 т. – М.: БРЭ, 1988 – 1998.
3. Зефирова Н.С. и др.т.5 Три-Ятр // Химическая энциклопедия. — М.: Большая Российская Энциклопедия, 1998. — 783 с
4. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии, - В, 2ч.- М.: Химия, 1995.
5. Инструкция ИРМ 22-8 цеха циклогексанона № 22 производства капролактама предприятия ОАО «КуйбышевАзот».
6. Седьмое издание: «Краткий справочник физико-химических величин» под редакцией К.П. Мищенко и А.А. Равделя, Л.: Химия, 1974 г. – 200 стр
7. Синович А. Д., Павлов Г. П. Фенолы // Химическая энциклопедия: в 5 т / Зефирова Н. С. (гл. ред.). — М.: Большая Российская энциклопедия, 1998. — Т. 5: Три—Ятр. — 783 с.
8. Новый справочник химика и технолога. Радиоактивные вещества. Вредные вещества. Гигиенические нормативы / Редкол.: Москвин А. В. и др.. — СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2004. — 1142 с.
9. A process for the production of a mixture comprising cyclohexanol and cyclohexanone Патент DE № WO/2016/096844 МПК: B1 опуб 23.06.2016
10. A process for revamping a plant for the production of cyclohexanone Патент NL № WO/2016/09684 опубл. 23.06.2016
- 11.Process and System for Making Cyclohexanone Патент US № 20170152201 МПК: A1 опубл. 1.06.2017
- 12.Phenyl Cyclohexanone Derivatives and Methods of making and using them Патент US № WO/2017/087388 МПК: A1 опубл. 26.05.2017
- 13.Способ дегидрирования циклогексанола в циклогексанон Патент RU №:

2012152038/04, опубл 4.12.2012

14. Cyclohexanone production process with multiple post- distillation

Патент №12808808 МПК: В2 опубл. 16.12.2008

15. Грошева Л. П. Учебное пособие «Принципы составления энергетического (теплового) баланса и тепловые расчеты химико-технологических процессов». – НГУ, 2006.

16. Проектирование и расчет аппаратов основного органического и нефтехимического синтеза. Под ред. Проф. Лебедева Н. Н., -М.: Химия, 1995.

17. Огородников С. К. Справочник нефтехимика. В двух томах. Т. 1 / Под ред. С. К. Огородникова. – Л. : Химия, 1978. –

18. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии, Л.: Химия, 1987. – 576 с.

19. Беляев В.М., Миронов В.М. Расчет и конструирование основного оборудования отрасли: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 288 с.

20. Гибкие автоматизированные производственные системы в химической промышленности; Учебник для вузов. — М.: Химия, 1990. 320 с.; ил. кЯВН 5—7245—0236—4

21. Бесков В.С. Общая химическая технология Учебник для вузов - М.: Академкнига, 2005. - 452 с

22. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии, Л.: Химия, 1987. – 576 с

