

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра

«Химическая технология и ресурсосбережение»

(наименование)

18.03.01 Химическая технология

(код и наименование направления подготовки)

Химическая технология органических и неорганических веществ

(направленность (профиль))

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Оптимизация технологии подготовки изопрен-изопентановой шихты производства  
изопренового каучука

Обучающийся

Д.О. Меркушина

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Ю.В. Чариков

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2022

## Аннотация

Бакалаврская работа изложена на 44 страницах, включает 5 рисунков, 7 таблиц, 1 приложение и 26 литературных источников.

Ключевые слова: азеотропная осушка, изопентан, изопрен, изопентан-изопреновая шихта, теплообменник, ректификационная колонна.

В выпускной квалификационной работе объектом исследования является установка перегонки производства синтетического изопренового каучука предприятия ООО «Тольяттикачук».

В рамках данной бакалаврской работы проведена расчетная работа по оптимизации установки перегонки производства синтетического изопренового каучука предприятия ООО «Тольяттикачук».

В литературном обзоре рассмотрены физико-химические закономерности протекания процесса азеотропной осушки изопентан-изопреновой шихты.

Рассчитаны материальный баланс процесса азеотропной осушки изопентан-изопреновой шихты.

Рассчитаны тепловые балансы и выполнен конструктивный расчет ректификационной колонны и теплообменников.

Область применения: результаты исследования можно использовать на установке перегонки производства синтетического изопренового каучука предприятия ООО «Тольяттикачук».

## Содержание

Введение.....	4
1 Теоретическая часть.....	6
1.1 История развития процесса разделения газов.....	6
1.2 Анализ технологии азеотропной осушки изопентан-изопреновой шихты.....	7
1.3 Краткие теоретические основы процесса.....	10
1.4 Обоснование выбранной технологии производства.....	11
1.5 Варианты аппаратурного оформления процесса.....	12
1.6 Физико-химические закономерности процесса.....	13
2 Технологическая часть.....	15
2.1 Характеристика сырья и продуктов.....	15
2.2 Описание технологической схемы.....	16
3 Расчетная часть.....	23
3.1 Материальный баланс.....	23
3.2 Энергетический баланс колонны №4.....	26
3.3 Конструктивный расчет колонны №4.....	27
3.4 Расчет теплообменников на производственную мощность.....	33
3.5 Расчет теплообменника проектной мощности.....	36
Заключение.....	40
Список используемых источников.....	41
Приложение А Технологическая схема азеотропной осушки изопрен-изопентановой шихты.....	44

## Введение

ООО «Тольяттикаучук» - один из крупнейших производителей синтетического каучука в России. На данном предприятии идет выпуск трех видов каучуков: бутилкаучуки, сополимерные и изопреновые каучуки, - а также мономеры, фракции и высокооктановые компоненты для моторных топлив.

Изопреновый каучук – более однородный, чистый, прозрачный каучук. Используется в технических изделиях, одним из главных потребителей изопренового каучука являются производители автомобильных шин.

В 2020 году «Тольяттикаучук», входящий в Группу «Татнефть», побил свой рекорд по выпуску каучука – 208 тысяч тонн. Для повышения производительности был проведен ряд мероприятий, например, сокращение сроков остановочного ремонта, сокращение часов потерь от внеплановых остановов по СКИ. Так же отмечается, что имеет место быть и снижение затрат по сырью.

Стадия азеотропной осушки изопентан-изопреновой шихты – ключевая стадия производства изопренового каучука. Так как с этой стадии начинается производство синтетического каучука.

На предприятии «Тольяттикаучук» в качестве растворителя применяют изопентан, так как наблюдается высокая степень превращения, а в качестве мономера – изопрен. Растворитель циркулирует в процессе и после содержит некоторое количество изопрена (2-3 вес. %), но это не мешает повторному его использованию.

«К изопентану и изопрену предъявляются очень серьезные требования по чистоте продукта. Ведь примеси, сопутствующие изопрену, оказывают негативное влияние на кинетику полимеризации и микроструктуру полимера.

Например, димеры изопрена влияют главным образом на микроструктуру полимера, а изобутилен снижает скорость полимеризации. ЦПД в количестве 0,01% снижает скорость процесса и молекулярный вес

полимера «сухой остаток», при содержании 0,1% происходит полное отравление каталитического комплекса.

Ацетиленистые и диеновые углеводороды приводят к увеличению индукционного периода и существенному снижению скорости полимеризации, аналогично влияют серу- и кислородсодержащие примеси. В присутствии диэтилового эфира или спирта наблюдается снижение молекулярного веса полимера» [1].

Рост спроса на синтетический изопреновый каучук формирует необходимость повышения мощности производств по его выпуску. Технология, положенная в основу производства многостадийна, поэтому требуется интенсификация процессов лимитирующих стадий, к которым относится, в частности, подготовка сырья.

Целью работы является увеличение производительности установки азеотропной осушки изопентан-изопреновой шихты путем замены теплообменника на примере ООО «Тольяттикаучук».

Для достижения данной цели ставятся следующие задачи:

- изучить назначение процесса, физико-химических закономерностей протекания процесса;
- выявить технологическую проблему и предложить способ ее решения;
- рассчитать материальный и тепловой баланс;
- выполнить конструктивный расчет ректификационной колонны и теплообменников.

## 1 Теоретическая часть

### 1.1 История развития процесса разделения газов

Более 130 лет известно, что изопрен является основным звеном макромолекул натурального каучука, однако до конца 1940-х годов ни один синтетический каучук не мог по комплексу свойств заменить натуральный. Ситуация в корне изменилась после открытия К. Циглером и Дж. Натта новых каталитических систем для стереоспецифической полимеризации ненасыщенных углеводородов. В результате усилий ученых многих стран (США, СССР, Италии и др.) были разработаны эффективные способы получения *цис*-1,4-полиизопрена, являющегося структурным аналогом и заменителем натурального каучука. Мировые мощности по производству синтетического изопренового каучука сегодня превышают 1,3 млн т/год.

Наиболее простой вариант получения изопрена - извлечение из фракций C<sub>5</sub> пиролиза нефти, содержащей обычно 15-20% изопрена. Эта фракция образуется в качестве побочного продукта при получении этилена и пропилена в количествах, не превышающих 15-20% от выхода этилена.

В истории развития процесса разделения газов можно выделить три этапа:

- первый этап – «Эра газового бензина» относится к 20-40-м годам XX века. В этот период процесс разделения газов был направлен на абсорбционное извлечение газа – газолина - из газового бензина, как компонента моторного топлива. Использовались схемы масляной абсорбции при температурах 15-45°C и невысоких давлениях – 0,6-1,2МПа;
- второй этап – «Эра пропана» относится к 50-60-м годам XX века. В этот период увеличился спрос на сжиженные газы, используемые в качестве компонентов моторного топлива и сырья для нефтехимии, в основном для производства синтетического каучука. Вводится

низкотемпературная абсорбция с температурой до  $-45^{\circ}\text{C}$  и давлением до 7,4 МПа;

- третий этап – «Эра этана» начался в США и Канаде в конце 1960-х годов. Этан используется как сырье пиролиза с целью получения этилена.

Установки газоразделения используют для подготовки газового сырья и разделения получаемой продукции [10].

## **1.2 Анализ технологии азеотропной осушки изопентан-изопреновой шихты**

«Ректификация в производстве изопренового каучука предназначена для приготовления и азеотропной осушки изопентан-изопреновой шихты. Так как влага является ядом для процесса полимеризации. В присутствии влаги более 0,0005 % масс. значительно снижается скорость полимеризации, снижается вязкости полиизопрена, увеличивается гель-фракция и при контакте с компонентами катализатора и полимеризатом приводит к образованию структурированного полимера» [21].

«Молекулярные связи между компонентами смеси могут приводить к образованию систем растворителей, которые имеют постоянную точку кипения при данной концентрации компонентов смеси. Температура кипения может быть выше или ниже, чем точка кипения отдельных компонентов. Такие смеси называются азеотропными или азеотропами.

Аппараты, служащие для проведения ректификации, - ректификационные колонны - состоят из колонны, где осуществляется противоточное контактирование пара и жидкости, и устройств, в которых происходит испарение жидкости и конденсация пара, - куба и дефлегматора. Колонна представляет собой вертикально стоящий полый цилиндр, внутри которого установлены тарелки (контактные устройства различной конструкции) или помещен фигурный кусковой материал - насадка.

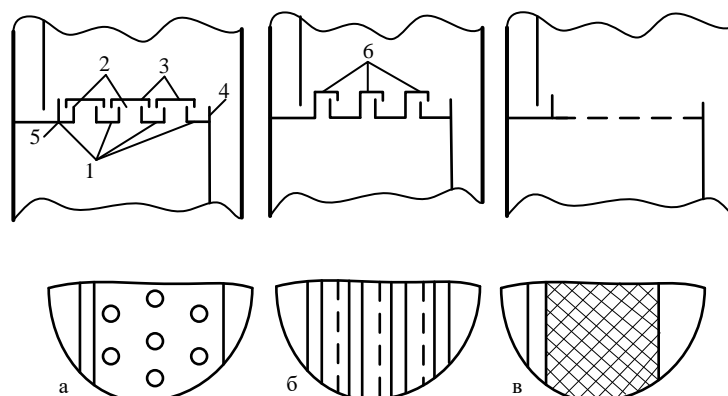
Конструкцию ректификационной колонны определяют:

- требуемая степень разделения;
- условия эксплуатации: периодическая или непрерывная;
- тип контактного устройства: насадка или тарелка;
- количество равновесных фаз» [26].

Выбранный тип внутренних компонентов будет определять высоту и диаметр колонны для заданной пошрины, поскольку различные конструкции имеют различные потенциал и эффективность.

Определяющим в геометрических размерах колонны (высота и диаметр) является тип контактного устройства колонны (насадки или тарелки), поскольку различные конструкции имеют разный потенциал и эффективности [25].

Куб и дефлегматор - это обычно кожухотрубные теплообменники. Назначение тарелок и насадки - развитие межфазной поверхности и улучшение контакта между жидкостью и паром. Тарелки, как правило, снабжаются устройством для перелива жидкости. Конструкции трёх типов переливных тарелок показаны на рисунке 1. В качестве насадки ректификационных колонн обычно используются кольца, наружный диаметр которых равен их высоте. Наиболее распространены кольца Рашига.



а - колпачковая (1 - основание со слоем жидкости; 2 - патрубки для прохода пара; 3 - колпачки; 4, 5 - переливные устройства); б - из S-образных элементов (6); в - сетчатая.

Рисунок 1 - Схема тарелок с переливным устройством



На данной установке азеотропной осушки используется колонна с колпачковыми тарелками.

«Колпачковые тарелки (рисунок 2) менее чувствительны к загрязнениям и отличаются более высоким интервалом устойчивой работы. Газ на тарелку поступает по патрубкам, разбиваясь, затем прорезями колпачка на большое число отдельных струй. Далее газ проходит через слой жидкости, перетекающей по тарелке от одного сливного устройства к другому» [15].

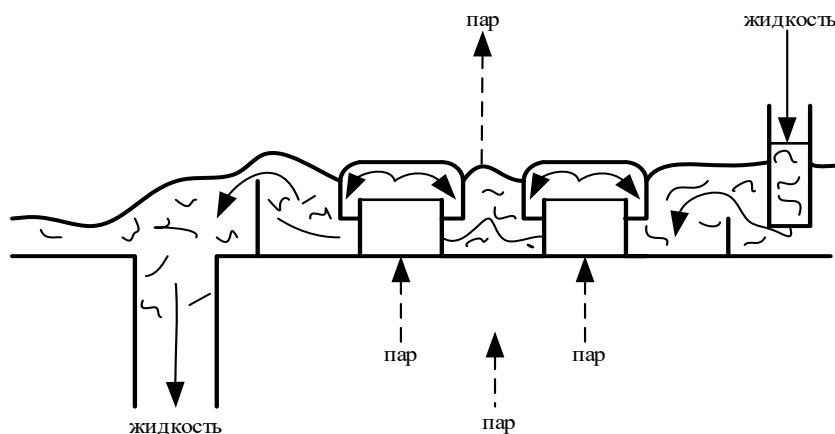


Рисунок 2 – Схема колпачковой тарелки

«Достоинства колпачковых тарелок:

- превосходят ситчатые и решетчатые тарелки по площади поверхности контакта фаз в барботажном слое, жидкость не стекает через отверстия даже при низком расходе газа;
- превосходят ситчатые и решетчатые тарелки по ширине интервала рабочих скоростей газа.

Недостатки колпачковых тарелок:

- отличаются высокой стоимостью изготовления, что значительно ограничивает их использование;
- высокое гидравлическое сопротивление по сравнению с решётчатыми и ситчатыми тарелками» [18].

«Под воздействием нагревателя исходная смесь испаряется. Пар проходит через колпачки, контактирует с жидкостью, немного при этом

охлаждается и частично конденсируется, а жидкость при этом охлаждается и частично испаряется. По мере движения пара вверх по колонне пар теряет менее летучий компонент и обогащается более летучим. Жидкость обогащается менее летучим и стекает вниз по переливным устройствам. При достаточном количестве тарелок достигается разделение смеси на компоненты. Конденсат на выходе представляет собой практически чистый легколетучий компонент, а жидкость в котле - труднолетучий» [19].

Процесс ректификации любой идеальной или не идеальной многокомпонентной смеси является в действительности совокупностью нескольких процессов ректификации отдельных пар компонентов, протекающих совместно, но не с одинаковой трудностью.

Ректификация может протекать при атмосферном давлении, а также при давлениях выше и ниже атмосферного. Под вакуумом ректификацию проводят, когда разделению подлежат высококипящие жидкие смеси.

Повышенные давления используются для разделения смесей, которые находятся в газообразном состоянии при более низком давлении. Степень разделения смеси жидкостей на составляющие компоненты и чистота получаемых дистиллята и кубового остатка зависят от того, насколько развита поверхность фазового контакта.

### **1.3 Краткие теоретические основы процесса**

«Для разделения газов используют следующие методы:

- метод конденсации основан на различной способности углеводородов к конденсации, при этом конденсируются в первую очередь высококипящие компоненты, во вторую-низкокипящие. Недостаток метода: низкие степени извлечения конденсатообразующих компонентов из тощих газов;
- метод абсорбции основан на использовании жидкого поглотителя – абсорбента, который растворяет тяжелые углеводороды, отгоняемые

- затем в десорбере. Недостаток метода: трудность регенерации растворителя за счет содержания в абсорбенте метана и этана, а также более низкая степень разделения, по сравнению с ректификационным методом;
- метод адсорбции основан на различной поглощаемости углеводородов поверхностью твердого поглотителя – адсорбента. Недостаток метода: низкая степень разделения;
  - метод ректификации основан на разделении смеси компонентов, отличающихся по температуре кипения. Она осуществляется путем противоточного многоступенчатого или непрерывного контактирования паров жидкости. Наличие жидкой фазы в системе является необходимым условием процесса. Недостаток метода: высокая стоимость оборудования и повышенный расход электроэнергии» [12].

#### **1.4 Обоснование выбранной технологии производства**

Процесс полимеризации изопрена-мономера осуществляется в разных алифатических и ароматических углеводородах, которые растворяют образовавшийся полимер.

В большинстве случаев скорость процесса полимеризации симбатна скорости растворения полимера в растворителе. При невысокой скорости растворения полимер обволакивает активные центры катализатора, что приводит к снижению скорости процесса полимеризации.

Самыми лучшими растворителями в процессе подготовки шихты являются такие известные растворители, как: пентан, гексан, гептан. Следующие растворители по актуальности в применении процесса получения полиизопренового каучука это такие растворители как: изопентан, бутан, изооктан. Испытанные растворители не существенно влияют на микроструктуру полиизопренового каучука. При использовании бензола и изопентана в качестве растворителей наблюдается более высокая скорость

полимеризации, но на ООО «Тольяттикаучук» нашел применение изопентановый растворитель. Для технологического оформления процесса изопентан считается более удобным растворителем.

В сравнении с другими растворителями изопентан обладает такими достоинствами как: невысокая вязкость полимеризата, возможность образования высокомолекулярного полимера в течение всего процесса полимеризации, а также обладает низкой температурой кипения, которая облегчает процесс выделения каучука.

### **1.5 Варианты аппаратурного оформления процесса**

«Аппаратурное оформление подготовки изопентан-изопреновой шихты имеет ряд особенностей:

- полимеризация изопрена, образованного разложением 4,4-диметил-1,3 диоксана на катализаторе, работающем в циклическом режиме: контактирование, с последующим выделением изопрена из углеводородного конденсата и контактного газа, а также регенерация катализатора в присутствии воздуха и водяного пара с образованием газов регенерации, в среде углеводородного растворителя - изопентана и катализатора Циглера-Натта, вводимого в ароматическом растворителе;
- обработка раствора полимера, отмывка от продуктов разложения катализатора, стабилизация, водная дегазация каучука и переработка отогнанного при дегазации углеводородного растворителя, ароматического растворителя катализатора, углеводородов  $C_4$  и незаполимеризовавшегося изопрена;
- ректификация, заключающаяся в азеотропной осушке и в отгонке углеводородов  $C_4$ , в выделении возвратной изопентан-изопреновой фракции и отделении оставшихся углеводородов  $C_5$  от тяжелокипящих углеводородов, с использованием для подвода теплоты, необходимой

для ректификации при переработке возвратных продуктов, горячего парового конденсата и водяного пара, с последующим направлением выделенной изопентан-изопреновой фракции на приготовление шихты для полимеризации;

- приготовление шихты включает в себя: азеотропную осушку шихты, отгонку оставшихся углеводородов  $C_5$  и ароматического растворителя от тяжелокипящих углеводородов и сушку каучука» [14].

## 1.6 Физико-химические закономерности процесса

По одной из классификаций химические реакции подразделяют по молекулярности. Молекулярность реакции определяется числом молекул, участвующих в элементарном акте химического взаимодействия [16].

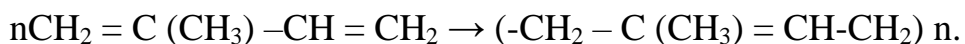
Синтетический каучук – тип искусственно созданного полимерного материала, который действует как эластомер. Имеет высокую гибкость полимерных цепей, за счет этого при воздействии на полимер он не меняет ни форму, ни размер.

По отдельным характеристика синтетические каучуки могут превосходить натуральный. Только по эластичности натуральный каучук еще не смог превзойти, а это важнейшее свойство для такой продукции, как авиационные или автомобильные шины.

При эксплуатации они всегда испытывают огромную деформацию – как растяжение, так и сжатие, что вызывает межмолекулярное трение, нагревание и потерю качеств. То есть чем выше эластичность резины, тем прочнее изделие. По этой причине натуральный каучук еще не вышел из употребления и используется для производства шин высокоскоростных и тяжелых самолетов и автомобилей [22].

Обычный каучук, полученный в природе, имеет формулу  $(C_5H_8)_n$ . Изопреновый каучук образуется во время реакции полимеризации.

Полимеризация протекает следующим образом:



Исходным материалом для получения изопрена может быть пентан:  $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3$ , потому что при нагревании с катализаторами он тоже превращается в изопентан.

«Изопрен – это не насыщенный углеводород, принадлежащий к диеновой серии. Это летучая бесцветная жидкость. Изопреновый каучук является природным мономером. В органических растворителях растворяется. С этиловым спиртом, например, можно смешивать любое соотношение. Но в воде растворяется плохо.

При полимеризации он легко образует структурное звено изопренового каучука, в результате чего образуются изопреновая гуттаперча и каучуки. По химическим свойствам изопрен представляет собой типичный сопряженный диен, который вступает в реакции замещения, присоединения, комплексообразования, циклизации, теломеризации. Активен в реакции с электрофилами и диенофилами» [23].

«Натуральный каучук-это полимер натурального происхождения, в основании которого лежит полиизопрен, после вулканизации из него получают резину. Позднее резина стала использоваться в качестве основного материала при изготовлении широкого спектра инструментов для использования в домашних условиях или использования снаружи дома и даже обуви из резинового материала» [18].

Вывод: в данном разделе рассмотрена история развития процесса газоразделения, основы процесса, а также обоснование технологии подготовки изопрен - изопентановой шихты. Варианты его аппаратного оформления.

## 2 Технологическая часть

### 2.1 Характеристика сырья и продуктов

«Полимеризация изопрена может проводиться в различных алифатических и ароматических углеводородах, хорошо растворяющих образующийся полимер. Из известных растворителей наилучшими являются пентан, гексан, гептан. За ними следуют изопентан, бутан, изооктан. Существенного влияния данные растворители на микроструктуру полиизопрена не оказывают. Но наиболее высока скорость полимеризации при использовании бензола и изопентана, но в промышленности нашел применение последний.

Достоинства пентана: сравнительно невысокая вязкость полимеризата, возможность получения высокомолекулярного полимера в течение всего периода полимеризации, низкая температура кипения, что облегчает процесс выделения каучука.

Для приготовления шихты изопрен-ректификат и растворитель смешивают в рассчитанных количествах с возвратной изопентан-изопреновой фракцией, прошедшей необходимую очистку. Контроль за концентрацией изопрена в шихте осуществляется автоматическим хроматографом» [19].

Ниже приведена таблица 1, в которой приведены нормы на сырье и кубовый продукт. Данные показания отражаются в анализах, выполняемых центральной заводской лабораторией, периодичностью 1 раз в 12 часов.

Таблица 1 – Характеристика сырья, материалов и полупродуктов

Наименование показателя	Регламентируемые показатели
Изопрен-ректификат (прозрачная жидкость)	<p>Высший сорт</p> <p>Массовая доля, %:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- изопрена, не менее 99,0;</li> <li>- суммы бутенов и пентенов, не более 1,0;</li> <li>- цикlopентадиена (ЦПД), не более 0,0001</li> </ul> <p>а-ацетиленовых углеводородов, не более 0,0002;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- карбонильных соединений, не более 0,0002;</li> <li>- содержание нерастворимой влаги отс.;</li> <li>- перекисных соединений (не активный кислород), не более 0,0005</li> </ul>
Возвратная изопентан-изопреновая фракция (прозрачная жидкость)	<p>Углеводородный состав:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- массовая доля углеводородов C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub>, %, не более 0,2;</li> <li>- массовая доля углеводородов C<sub>6</sub>и выше отс.</li> </ul> <p>Массовая доля влаги, %, не более 0,001.</p> <p>Массовая доля микропримесей, %, не более:</p> <p>циклопентадиена, карбонильных соединений, а-ацетиленовых углеводородов, МТБЭ- не норм.</p>
Осушенная изопентан-изопреновая шихта	<p>Массовая доля:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- влаги не более 0,0005 %</li> <li>- изопрена 15-19 %</li> <li>- изоамиленов не регламентируется</li> <li>- изопентана не регламентируется</li> <li>- карбонильных соединений не более 0,0003 %</li> <li>- ацетиленовых Соединений не более 0,0002 %</li> <li>- цикlopентадиена не более 0,0001 %</li> </ul>

## 2.2 Описание технологической схемы

«Возвратная изопентан-изопреновая фракция (ВИИФ) поступает на установку приготовления изопентан-изопреновой шихты из товарно-сырьевого цеха в трубопровод приготовления изопентан-изопреновой шихты (ИИШ).



Содержание влаги в ВИИФ допустимо до 0,0005 %, контроль данного показателя проводится методом выморозки периодичностью 3 часа, выморозку проводит технологический персонал установки.

Содержание изопрена в ВИИФ проводится автоматически - хроматографом, а также 2 раза в сутки производится аналитический контроль центральной заводской лабораторией (ЦЗЛ).

В трубопровод приготовления ИИШ поступает изопрен из емкости №1 насосом №2, из товарно-сырьевого цеха.

Приготовление изопентан-изопреновой шихты производится на основании расчета. Формулы расчета представлены ниже.

Количество изопрена-ректификата, которое необходимо для приготовления ИИШ, т/час:

$$A_1 = A \cdot \frac{C_1 - C_2}{C_1 - C_2} \quad (1)$$

Количество изопентан-изопреновой фракции, которое необходимо для приготовления шихты, т/час:

$$A_2 = A \cdot \frac{C_1 - C}{C_1 - C_2} \quad (2)$$

где  $A$  – количество шихты, которое необходимо приготовить, (т/час);

$A_1$  – количество изопрена-ректификата, которое необходимо подать на приготовление ИИШ, (т/час);

$A_2$  – количество изопентан-изопреновой фракции, которое необходимо для приготовления ИИШ, (т/час);

$C$  – концентрация изопрена в ИИШ (% масс.) задается распоряжением;

$C_1$  – концентрация изопрена в изопрене-ректификате (% масс.);

$C_2$  – концентрация изопрена в ИИФ (% масс.).

Пример расчета:

$A=60$  т/час

$C=16$  % масс.

$$A_1 = 60 \cdot \frac{16 - 4}{99 - 4} = 7,6 \text{ т/час};$$

$C_1=99$  % масс.

$C_2=4$  % масс.

$$A_2 = 60 \cdot \frac{99 - 16}{99 - 4} = 52,4 \text{ т/час};$$

При изменении количества подаваемой шихты, концентраций изопрена в изопрене-ректификате, в ВИИФ и в осушенной ИИШ необходимо выполнить перерасчет подачи компонентов для приготовления ИИШ.

Изопентан-изопреновая шихта с содержанием изопрена  $15 \div 19$  % масс. через межтрубное пространство рекуператора №3, где она подогревается за счет тепла кубового продукта колонны №4, и далее подается в колонну азеотропной осушки ИИШ №4.

В колонне №4 проводится азеотропная осушка ИИШ от растворенной в ней влаги.

Обогрев колонны №4 осуществляется выносным кипятильником №5, в межтрубное пространство которого подается пар давлением  $6 \text{ кгс/см}^2$ .

Из куба колонны №4 поднимаются пары углеводородов и воды. Между жидкостью и парами углеводородов на тарелках происходит массообмен, в результате которого из жидкой фазы испаряется азеотроп (нераздельно кипящая смесь паров изопентана, изопрена и воды с температурой кипения  $26$  °С). То есть, изопентан-изопреновая шихта по мере стекания вниз по колонне освобождается от влаги, а поднимающиеся вверх пары насыщаются влагой.

С верха колонны №4 пары изопентана, изопрена и воды (азеотроп) поступают в межтрубное пространство дефлегматора №8, то, что не сконденсировалось в дефлегматоре №8, далее поступает в рассольный конденсатор №9 на дополнительную конденсацию.

Углеводородный конденсат из дефлегматора №8 и конденсатора №9 поступают в сборник №10, где происходит расслоение углеводородов и воды.

Из сборника №10 верхний углеводородный слой насосом №11 подается на орошение колонны №4 в качестве флегмы. Избыток углеводородов из сборника №10 насосом №11 отправляется на очистку.

Осушенная изопентан-изопреновая шихта из куба колонны №4, пройдя через трубное пространство рекуператора №3 и отдавая тепло ВИИФ, поступающей на питание колонны №4, насосом №7 подается на дальнейшее охлаждение в теплообменник №6, охлаждаемый обратной (захоленной) водой» [20].

Технологическая схема приведена на рисунке 3, так же приведена в приложении А.

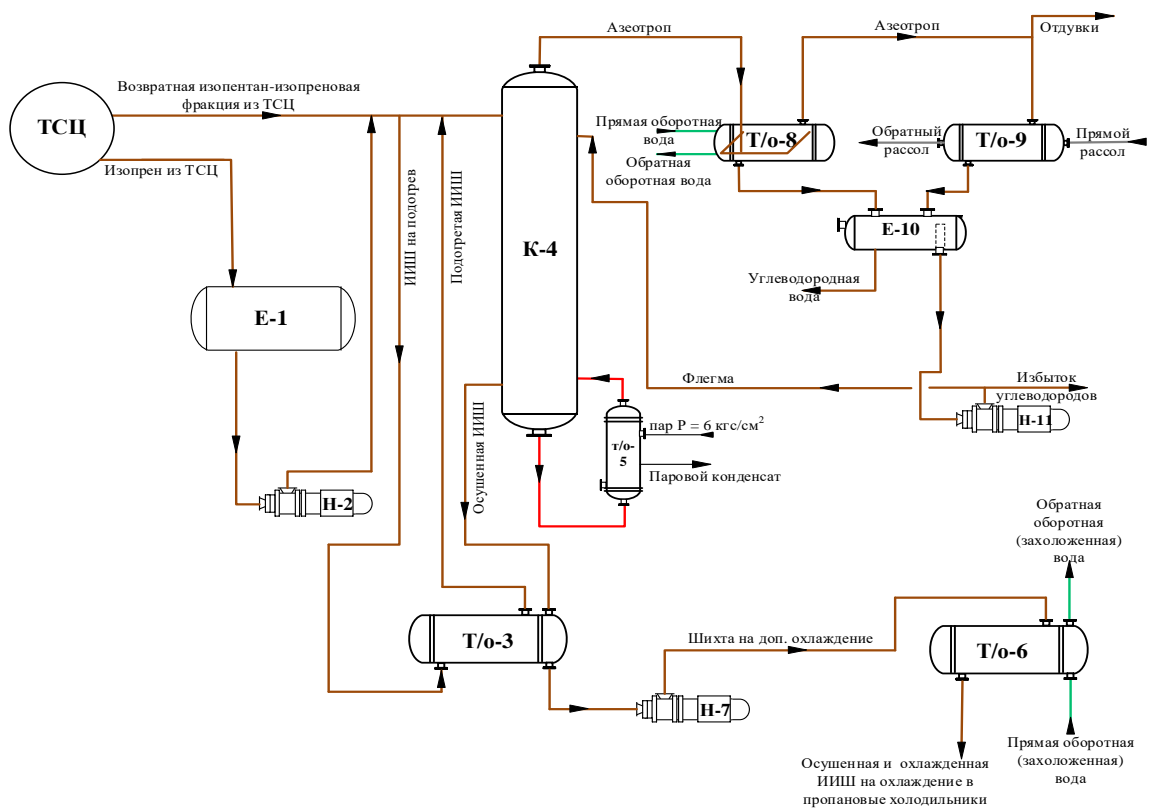


Рисунок 3 – Технологическая схема

### 2.3 Обоснование выбора модернизации

В связи с постоянно растущим спросом на изопреновый каучук требуется увеличение мощности стадии азеотропной осушки изопрен-изопентановой шихты. При работе колонны наблюдается ухудшение качества получаемого продукта. Это связано с недостаточным подводом тепловой энергии в процесс. Данное обстоятельство может быть исправлено за счет более полного теплообмена в рекуперативном теплообменнике (напишите его номер). Таким образом, в процесс вернется большая часть тепла вторичных энергоресурсов.

В выпускной квалификационной работе с целью интенсификации процесса предложена модернизация теплообменной аппаратуры: замена кожухотрубного теплообменника на пластинчатый. За счет замены теплообменника увеличится поверхность теплообмена, следовательно, появляется возможность увеличения производительности установки.

Необходимость замены теплообменников связана с тем, что увеличение производительности пластинчатого теплообменника потребует меньших затрат: удельная поверхность теплообмена пластинчатых теплообменников гораздо больше чем у кожухотрубчатых, что позволяет при тех же габаритных размерах добиться более полного перераспределения тепла между потоками, в условиях пространственных ограничений существующей установки. Допустимые температуры теплоносителей от минус 30 °С до 180 °С, давление до 1,6 МПа [15].

Пластинчатые теплообменники имеют ряд преимуществ по сравнению с кожухотрубными:

- высокий коэффициент теплопередачи. Пластинчатый теплообменник имеет небольшую длину пути потока жидкости. Сама же пластина в форме гофры, поэтому направление и скорость потока жидкости постоянно изменяются, в связи с этим турбулентность может быть

- достигнута при малом расходе, соответственно и коэффициент теплопередачи выше, чем в кожухотрубчатом теплообменнике;
- отличная адаптивность. Требуемая площадь теплопередачи может быть достигнута путем увеличения или уменьшения пластин теплообменника. Теплообменник может быть разделен на несколько блоков для одновременного нагрева или охлаждения нескольких жидкостей;
  - компактность и малая металлоемкость. Площадь теплопередачи на кубический метр может достигать 250 м<sup>2</sup>, а на квадратный метр поверхности теплопередачи приходится всего около 15 кг металла;
  - эффективная теплопередача, за счет высокого коэффициента и низкой металлоемкости (от 85% до более 90%);
  - простота очистки, монтажа и демонтажа;
  - небольшой коэффициент загрязнения. За счет турбулентности потока осаждение на стенках загрязняющих компонентов незначительно, это способствует медленному корродированию металла, из которого изготовлен теплообменник;
  - пластинчатые теплообменники изготавливаются из листового металла, поэтому цена ниже, чем на тот же вид кожухотрубчатого теплообменника [24].

«Поверхность теплообмена пластинчатого теплообменника (рисунок 4) состоит из гофрированных пластин с четырьмя отверстиями по углам. Проложив между пластинами специальные фасонные прокладки и прижимая пластины друг к другу, можно образовать канал синусоидального профиля, по которому жидкость может перетекать из верхнего левого отверстия в нижнее левое.

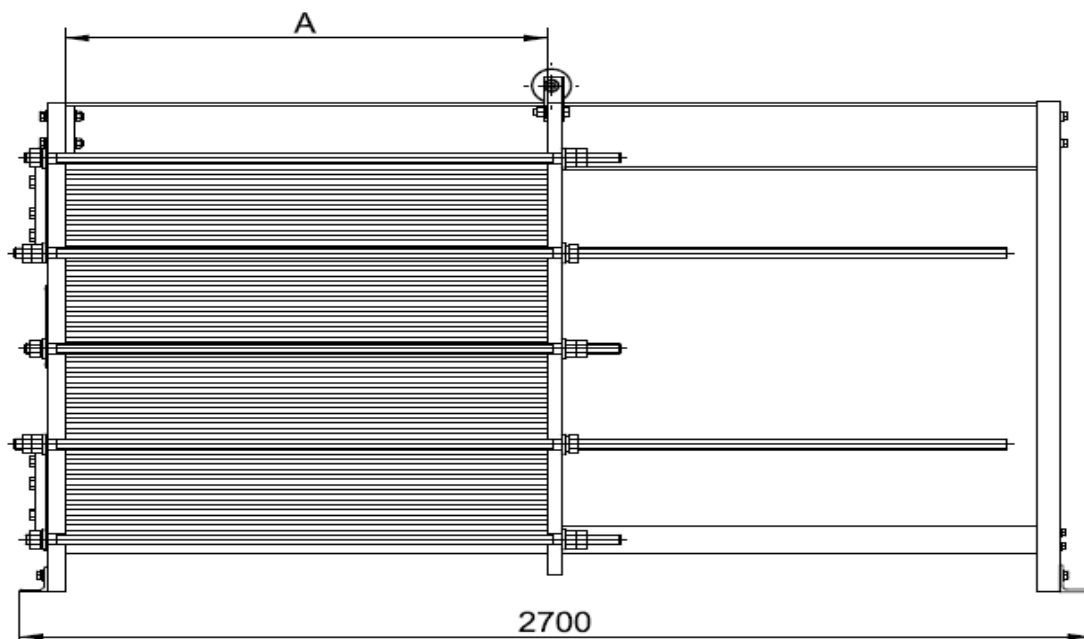


Рисунок 4 –Эскиз пластинчатого теплообменника

Эти два отверстия объединены общей большой прокладкой, в то время как два других отверстия окружены малыми (кольцевыми) прокладками, и из них жидкость не может ни выходить, ни входить в канал. Если к двум сжатым пластинам прижать еще одну пластину, объединив прокладкой нижнее правое отверстие с верхним правым, то будет образовано два канала. В первом, между пластинами, один теплоноситель перетекает сверху вниз, а во втором канале, между пластинами, другой теплоноситель проходит снизу-вверх. Продолжая прибавлять пластины и прокладки справа и слева от образованного пакета, можно увеличивать число параллельных каналов и поверхность теплообмена. Ширина синусоидального канала лежит в пределах от одного до нескольких миллиметров, и жидкость быстро прогревается по всей толщине слоя. Этому способствует искусственная турбулизация потока на поворотах в канале, вызывающая увеличение коэффициента теплоотдачи» [18].

Вывод: в данной главе описан технологический процесс проектируемой установки, описано преимущество пластинчатого теплообменника перед кожухотрубчатым.

### 3 Расчетная часть

#### 3.1 Материальный баланс

Представлена схема (рисунок 5) колонны с указанием материальных потоков

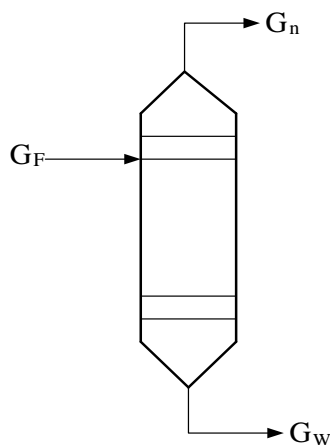


Рисунок 5 – Схема материальных потоков колонны

Исходные данные:

Производительность установки – 120 000 т/год

Число рабочих дней – 345 дней (8 280 часов)

Часовая производительность – 14 492, 754 кг/час

Состав фракции представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Состав фракции, в % масс

Компонент	% масс.
1	2
Изопрен	16,0
Изопентан	70,8
Изоамилены	12,1
Пентан	0,46
C <sub>4</sub>	0,632
Влага	0,008

Ограничения по влаге куба и дистиллята:

куб – не более 0,0005%

дистиллят – не более 0,001%

Решая систему уравнений 1-6, найдем расход куба, расход дистиллята, так же массовые доли, в %.

$$F_{\text{мас}} \cdot C_{\text{мас}1} = D_{\text{мас}} \cdot Y_{\text{мас}1} + R_{\text{мас}} \cdot X_{\text{мас}1} \quad (1)$$

$$F_{\text{мас}} \cdot C_{\text{мас}2} = D_{\text{мас}} \cdot Y_{\text{мас}2} + R_{\text{мас}} \cdot X_{\text{мас}2} \quad (2)$$

$$F_{\text{мас}} \cdot C_{\text{мас}3} = D_{\text{мас}} \cdot Y_{\text{мас}3} + R_{\text{мас}} \cdot X_{\text{мас}3} \quad (3)$$

$$F_{\text{мас}} \cdot C_{\text{мас}4} = D_{\text{мас}} \cdot Y_{\text{мас}4} + R_{\text{мас}} \cdot X_{\text{мас}4} \quad (4)$$

$$F_{\text{мас}} \cdot C_{\text{мас}5} = D_{\text{мас}} \cdot Y_{\text{мас}5} + R_{\text{мас}} \cdot X_{\text{мас}5} \quad (5)$$

$$F_{\text{мас}} \cdot C_{\text{мас}6} = D_{\text{мас}} \cdot Y_{\text{мас}6} + R_{\text{мас}} \cdot X_{\text{мас}6} \quad (6)$$

$F_{\text{мас}}$  – расход питания;

$C_{\text{мас}}$  – массовые доли компонентов во фракции, в % масс;

$D_{\text{мас}}$  – расход дистиллята;

$Y_{\text{мас}}$  – массовые доли компонентов в дистилляте, в % масс;

$R_{\text{мас}}$  – расход куба;

$X_{\text{мас}}$  – массовые доли компонентов в кубе, в % масс.

$$R_{\text{мас}} = 3\,654,914 \text{ кг/ч}$$

$$D_{\text{мас}} = 10\,837,840 \text{ кг/ч}$$

Состав компонентов в кубе приведен в таблице 3, в % масс.

Таблица 3– Состав компонентов в кубе

Компонент	% масс.
1	2
Изопрен	17,0
Изопентан	70,0
Изоамилены	12,3
Пентан	0,5
C <sub>4</sub>	0,1995
Влага	0,0005

Состав компонентов в дистилляте приведен в таблице 4, в % масс.



Таблица 4 – Состав компонентов в дистилляте

Компонент	% масс.
1	2
Изопрен	16,0
Изопентан	72,6
Изоамилены	10,413
Пентан	0,68
С <sub>4</sub>	0,307
Влага	0,001

Производим перерасчет на сырье, материальный баланс колонны №4 приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Материальный баланс колоны №4

Статьи прихода	кг/ч	% масс.	т/год	Статьи расхода	кг/ч	% масс.	т/год
1	2	3	4	5	6	7	8
ИИФ:	14 492,75	100,00	120 000	Дистиллят:	10 837,84	63,76464	89 737,84
Изопрен	2 318,84	16,0	19 200	Изопрен	1 478,59	10,20224	12 242,69
Изопентан	10 260,86	70,8	84 960	Изопентан	6 709,08	46,29266	55 551,19
Изоамилены	1 753,62	12,1	14 520	Изоамилены	962,28	6,639745	7 967,69
Пентан	66,67	0,46	552	Пентан	62,84	0,433595	520,31
С <sub>4</sub>	91,59	0,632	758	С <sub>4</sub>	28,37	0,195755	234,91
Влага	1,16	0,008	10	Влага	0,09	0,000638	0,77
-	-	-	-	Кубовый остаток:	3 654,91	36,23536	30 262,66
-	-	-	-	Изопрен	840,2549	5,79776	6 957,31
-	-	-	-	Изопентан	3 551,788	24,50734	29 408,81
-	-	-	-	Изоамилены	791,3411	5,460255	6 552,31
-	-	-	-	Пентан	3,826811	0,026405	31,69
-	-	-	-	С <sub>4</sub>	63,2239	0,436245	523,49
-	-	-	-	Влага	1,066956	0,007362	8,83
Итого:	14 492,75	100	120 000	Итого:	14 492,75	100	120 000

### 3.2 Энергетический баланс колонны №4

Для расчета энергетического баланса колонны необходимо определить количество тепла, вносимое в колонну №4 сырьем, флегмой и количеством тепла, выносимое из колонны кубовой жидкостью, парами и флегмой. По разности отводимого и вводимого тепла, рассчитывают тепло, которое необходимо подвести в куб водяным паром.

Количество теплоты рассчитывается по формуле, ккал·кг/ч:

$$Q = G \cdot c \cdot t \quad (7)$$

где  $G$  – количество потока, кг/ч

$c$  – удельная теплоемкость,

$t$  – температура, °С

Расчетные данные, необходимые для расчета энергетического баланса сведены в таблицу 6.

Таблица 6 – Энергетический баланс колонны №4

Компонент	G, кг/ч	t, °С	c, ккал/°С	Q ккал·кг/ч
Приход:				
ИИФ:	14 492, 75	25		191 729, 49
Изопрен	2 318, 84	25	0,64	37 101, 43
Изо-пентан	10 260, 86	25	0,547	140 317, 31
Изо-амилены	1 753, 62	25	0,283	12 406, 88
Пентан	66, 66663	25	0,574	956, 67
C <sub>4</sub>	91, 59415	25	0,401	918, 23
Влага	1, 15942	25	1	28, 99
Флегма:	889, 745	45		16 727, 68
Изопрен	121, 3862	45	0,364	1 988, 31
Изо-пентан	550, 7896	45	0,547	13 557, 69
Изо-амилены	78, 99962	45	0,283	1 006, 06
Пентан	5, 158909	45	0,574	133, 25
C <sub>4</sub>	2, 329091	45	0,401	42, 03
Влага	0,007591	45	1	0, 34
Итого:	15 382, 50	-	-	208 457, 17

Продолжение таблицы 6

Дистиллят:	10 837, 84	52	-	235 452, 68
Изопрен	1 478, 585	52	0,364	27 986, 66
Изо-пентан	6 709, 08	52	0,547	190 833, 06
Изо-амилены	962, 2816	52	0,283	14 160, 94
Пентан	62, 839984	52	0,574	1 875, 64
C <sub>4</sub>	28, 37028	52	0,401	591, 58
Влага	0, 092464	52	1	4, 81
Флегма:	889, 745	52		19 329, 76
Изопрен	121, 3862	52	0,364	2 297, 60
Изо-пентан	550, 7896	52	0,547	15 666, 66
Изо-амилены	78, 99962	52	0,283	1 162, 56
Пентан	5, 158909	52	0,574	153, 98
C <sub>4</sub>	2, 329091	52	0,401	48, 57
Влага	0,007591	52	1	0,39
Куб.остаток:	3 654, 91	56	-	140 069, 80
Изопрен	840, 2549	56	0,364	17 127, 76
Изопентан	3 551, 79	56	0,547	108 798, 36
Изоамилены	791, 3411	56	0,283	12 541, 17
Пентан	3, 826811	56	0,574	123, 01
C <sub>4</sub>	63, 2239	56	0,401	1 419, 76
Влага	1, 066956	56	1	59, 75
Итого:	15 382, 50	-	-	394 852, 24

Количество тепла, выносимое больше, чем тепло вносимое.

Найдем разницу:

$$\Delta Q = 394\,852,24 - 208\,457,17 = 145\,049,765 \text{ ккал} \cdot \text{кг/ч}$$

Эта разница показывает количество теплоты, которое необходимо подвести в куб колонны водяным паром низкого давления.

### 3.3 Конструктивный расчет колонны №4

Рассчитаем мольные доли компонентов в сырье ( $C_i$ ), мольные доли ( $Y_i$ ) компонентов в паре (дистилляте), мольные доли ( $X_i$ ) по формуле:

$$C_i(X_i, Y_i) = \frac{G_i}{M_i} \quad (8)$$

Результаты расчета представлены в таблице 7

Таблица 7 – Мольные доли

Статьи прихода	кг/ч	М, кг/кмоль	N, кмоль/ч	С, мольн. доли	Статьи расхода	кг/ч	М, кг/кмоль.	N, кмоль/ч	У, мольн. доли	Статьи расхода	кг/ч	М, кг/кмоль	N, кмоль/ч	Х, мольн. доли
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
изопентан-изопреновая фракция:	-	-	-	-	Дистиллят	-	-	-	-	Кубовый остаток	-	-	-	-
изопрен	1661,84	68	24,44	0,1670	изопрен	1059,65	68	15,58	0,1672	изопрен	602,183	68	8,86	0,1665
изопентан	7353,62	72	102,13	0,6978	изопентан	4808,18	72	66,78	0,7166	изопентан	2545,45	72	35,35	0,6649
изоамилены	1256,76	70	17,95	0,1227	изоамилены	689,635	70	9,85	0,1057	изоамилены	567,128	70	8,10	0,1524
пентан	47,7778	72	0,66	0,0045	пентан	45,0353	72	0,63	0,0067	пентан	2,74253	72	0,04	0,0007
С <sub>4</sub>	65,6425	58	1,13	0,0077	С <sub>4</sub>	20,3321	58	0,35	0,0038	С <sub>4</sub>	45,3104	58	0,78	0,0147
влага	0,83092	18	0,05	0,0003	влага	0,8121	18	0,05	0,0087	влага	0,01882	18	0,001	0,0000
Итого:	10386,5		146,34	-	-	6622,83	-	93,24	-	-	3763,67	-	53,13	-

Расчет минимального теоретического числа тарелок в укрепляющей секции можно найти по формуле:

$$N_{\text{мин1}} = \frac{\log\left(\frac{X'_{\text{ТКК}} \cdot C_{\text{ЛКК}}}{X'_{\text{ТКК}} \cdot C_{\text{ЛКК}}}\right)}{\log\left(\frac{a_{\text{ЛКК}}}{a_{\text{ТКК}}}\right)} \quad (9)$$

Для отгонной секции:

$$N_{\text{мин2}} = \frac{\log\left(\frac{X'_{\text{ТКК}} \cdot C_{\text{ЛКК}}}{X'_{\text{ТКК}} \cdot C_{\text{ЛКК}}}\right)}{\log\left(\frac{a_{\text{ЛКК}}}{a_{\text{ТКК}}}\right)} \quad (10)$$

где  $Y'_{\text{ЛКК}}$  – концентрация ЛКК в паре, мольн. доли (концентрация изопентана таблица 7);

$Y'_{\text{ТКК}}$  – концентрация ТКК в паре, мольн. доли (концентрация изоамилена таблица 7);

$C_{\text{ЛКК}}$  – концентрация ЛКК в сырье колонны, мольн. Доли (концентрация изопентана таблица 7);

$C_{\text{ТКК}}$  – концентрация ТКК в сырье колонны, мольн. доли (концентрация изоамилена таблица 7);

$X'_{\text{ЛКК}}$  – концентрация ЛКК в кубовом остатке, мольн. доли (концентрация изопентана таблица 7);

$X'_{\text{ТКК}}$  – концентрация ТКК в кубовом остатке, мольн. доли (концентрация изоамилена таблица 7);

$a_{\text{ЛКК}}$  и  $a_{\text{ТКК}}$  – относительные летучести ЛКК и ТКК соответственно.

Относительные летучести компонентов, которые вычисляются по формуле:

$$a_i = \frac{K_i}{K_{ТКК}} \quad (11)$$

где  $K_{ТКК}$  – константа фазового равновесия тяжелого ключевого компонента, определенная для зоны питания колонны.

$K_{ЛКК}$  – константы фазового равновесия ЛКК (изопентана)

$$K_{ЛКК} = \frac{P_{ЛКК}}{P} \quad (12)$$

где  $P_{ЛКК}$  – парциальное давление насыщенного пара изопентана (34530,49906997 Па)

$P$  – давление в системе (98066,500 Па)

$$K_{ТКК} = \frac{29597,570631403}{98066,500} = 0,302$$

$$a_{ЛКК} = \frac{K_{ЛКК}}{K_{ТКК}}; \quad (13)$$

$$a_{ЛКК} = \frac{0,352}{0,302} = 1,166;$$

$$a_{ТКК} = \frac{K_{ТКК}}{K_{ТКК}} \quad (14)$$

$$a_{ТКК} = \frac{0,302}{0,302} = 1;$$

$$N_{min1} = \lg \frac{(0,1524 \cdot 0,6978)}{(0,6649 \cdot 0,1227)} / \lg \lg \left( \frac{1,166}{1} \right) = 2$$

$$N_{min2} = \lg \frac{(0,7166 \cdot 0,1227)}{(0,1057 \cdot 0,6978)} / \lg \lg \left( \frac{1,166}{1} \right) = 2$$

Оптимальное число тарелок в каждой секции определяется:

$$N_{opt1} = 1,7 \cdot N_{min1} + 0,7$$

$$N_{opt1} = 1,7 \cdot 2 + 0,7 = 5$$

$$N_{opt2} = 1,7 \cdot N_{min2} + 0,7$$

$$N_{opt2} = 1,7 \cdot 2 + 0,7 = 5$$

Необходимые число тарелок в каждой секции рассчитывается с учетом КПД тарелок ( $\eta=0,6$ ).

$$N_1 = \frac{N_{\text{опт1}}}{\eta} \quad (15)$$

$$N_2 = \frac{N_{\text{опт2}}}{\eta} \quad (16)$$

$$N_1 = \frac{5}{0,6} = 9$$

$$N_2 = \frac{5}{0,6} = 9$$

Общее число необходимых тарелок:

$$N = N_1 + N_2 \quad (17)$$

$$N = 9 + 9 = 18 \text{ тарелок}$$

Определим диаметр колонны №4:

$$D_K = \sqrt{\frac{4V}{3,14U}} \quad (18)$$

где  $V$  – секундный объем паров,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$U$  – линейная скорость движения паров,  $\text{м}/\text{с}$ .

Секундный объем определяется по формуле:

$$V = \frac{(D+F) \cdot 22,4 \cdot T \cdot z}{M \cdot 3600 \cdot 273 \cdot P} \quad (19)$$

где  $D$  – количество паров, уходящих с верха колонны,  $\text{кг}/\text{ч}$ ;

$F$  – количество флегмы,  $\text{кг}/\text{ч}$ ;

$T$  – температура паров,  $\text{К}$ ;

$z$  – коэффициент сжимаемости;

$M$  – молекулярная масса паров для верха колонны;

$P$  – давление на верху колонны, атм.

$$V = \frac{((6622,8306 + 463,6027) \cdot 22,4 \cdot 325 \cdot 0,6)}{(72 \cdot 3600 \cdot 273 \cdot 1)} = 0,437 \text{ м}^3/\text{с}$$

Линейная скорость определяется по формуле Саудерса-Брауна:

$$U = \frac{0,305}{3600} \cdot K \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}}}} \quad (20)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от расстояния между тарелками и условий ректификации ( $K=900$  для клапанных тарелок);

$\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкой фазы;

$\rho_{\text{п}}$  – плотность паровой фазы;

$$\rho_{\text{п}} = 25 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{\text{ж}} = 625 \text{ кг/м}^3$$

$$U = \frac{0,305}{3600} \cdot 900 \cdot \sqrt{\frac{625 - 25}{25}} = 0,374 \text{ м/с}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,697}{3,14 \cdot 0,255}} = 1,866 \text{ м}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,437}{3,14 \cdot 0,374}} = 1,22 \text{ м}$$

Выбираем диаметр из стандартного ряда, диаметр колонны 2 м.

Рассчитаем высоту колонны:

$$H = H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5 \quad (21)$$

$$H_1 = 0,5 \cdot 2,6 = 1,3 \text{ м}$$

$$H_2 = 0,5 \cdot (N_1 - 1) \quad (22)$$

$$H_2 = 0,5 \cdot (9 - 1) = 4 \text{ м}$$

0,5 м – расстояние между тарелками;

$H_3 = 1,2$  м – высота секции питания;

$H_4$  – расстояние между нижней тарелкой колонны и нижним днищем.



$$H_4=0,5 \cdot (N_2-1) \quad (23)$$

$$H_4=0,5 \cdot (9-1)$$

$H_5 = 1,5$  м – высота опорной части колонны.

$$H=1,3+4+1,2+4+1,5=12 \text{ м}$$

### 3.4 Расчет теплообменников на производственную мощность

Расчет теплообменного аппарата заключается в нахождении поверхности теплообмена.

Поверхность теплообмена найдем по уравнению теплопередачи,  $m^2$ :

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t_{cp}} \quad (24)$$

где  $Q$  – количество теплоты, приходящее в теплообменную аппаратуру, кВт; количество теплоты берем из тепловых балансов оборудования.

$k$  – коэффициент теплопередачи

Рассчитаем водяной холодильник, теплообменник Т-3.

Для расчета коэффициента теплопередачи произвольно выберем наружный диаметр трубок  $d_{нар} = 38$  мм ( $d_{нар} = 20; 25; 38$  мм) и скорость маловязкой органической жидкости в них примем  $\omega = 1,8$  м/с (в пределах 1-3 м/с).

Трубки изготавливают толщиной  $\delta_{ст} = 2$  мм из стали 12МХ с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_{ст} = 39$  Вт/(м·°С).

Определим режим течения воды в трубах по формуле (25):

$$Re = \frac{\omega d_{вн}}{\nu} \quad (25),$$

где  $Re$  — критерий Рейнольдса;  $\omega$  — скорость ИИШ в трубках, м/с;  $d_{вн}$  — внутренний диаметр трубок, м;  $\nu$  — коэффициент кинематической ИИШ ( $0,00034 \text{ м}^2/\text{с}$ ).

$$Re = \frac{1,8 \cdot 0,036}{0,342 \cdot 10^{-6}} = 1905888$$

Так как  $Re > 10^4$ , то режим течения воды в трубках — турбулентный.

Средняя логарифмическая разность температур рассчитывается:

$$\Delta t_{cp} = \frac{(\Delta t_6 - \Delta t_M)}{\ln\left(\frac{\Delta t_6}{\Delta t_M}\right)} \quad (26)$$

где  $\Delta t_6$  — высшая разность температур между потоками концов теплообменного аппарата, °С;

$\Delta t_M$  — низшая разность температур между потоками у концов теплообменного аппарата, °С.

$$70 - 65$$

$$50 - 56$$

$$\Delta t_6 = 20 \text{ °С}$$

$$\Delta t_M = 9 \text{ °С}$$

$$\Delta t_{cp} = \frac{(20 - 9)}{\ln\left(\frac{20}{9}\right)} = 13,8 \text{ °С}$$

Критерий Нуссельта для турбулентного режима течения в трубном пространстве определяется по следующей формуле:

$$Nu_1 = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot \varepsilon_l \quad (27)$$

$\varepsilon_l$  — поправочный коэффициент, при  $l/d > 50$  примем равным 1.

Критерий Прандтля по формуле (21):

$$Pr = \frac{c \cdot \mu}{\lambda} \quad (28)$$

где  $c_1$  — теплоемкость ИИШ при 53 °С, равна 164,85 Дж/моль\*К

$\mu_1$  — динамическая вязкость ИИШ при 53 °С, равна 0,00023 Па\*с

$\lambda_1$  — теплопроводность ИИШ при 53 °С, равна 0,111 Вт/м\*К

$$Pr = \frac{164,85 \cdot 0,00023}{0,111} = 0,34$$

$$Nu_1 = 0,023 \cdot 1905888^{0,8} \cdot 0,34^{0,4} \cdot 1 = 1582$$

По формуле (22) определим коэффициент теплопередачи ИИШ, Вт/(м<sup>2</sup>\*К) :

$$a_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_1}{d_1} \quad (29)$$

$$a_1 = \frac{1582 \cdot 0,111}{0,034} = 5165$$

Коэффициент теплопередачи горячего теплоносителя ИИШ лежит в пределах 300-2500 Вт/м<sup>2</sup>\*К, примем равным 2500 2500 Вт/м<sup>2</sup>\*К.

Сопротивления со стороны ИИШ горячей и холодной 1/г<sub>загр1</sub>=1/г<sub>загр2</sub>=5800 Вт/м<sup>2</sup>\*К

По формуле (30) найдем значение полного сопротивления:

$$\frac{1}{\sum r_{ст}} = \frac{1}{\frac{1}{r_{загр1}} + \frac{1}{r_{загр2}} + \frac{\delta}{\lambda_{ст}}} \quad (30)$$

$$\frac{1}{\sum r_{ст}} = \frac{1}{\frac{1}{5800} + \frac{1}{5800} + \frac{0,002}{39}} = 2525 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Коэффициент теплопередачи рассчитаем по формуле (31):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \sum r_{ст} + \frac{1}{a_2}} \quad (31)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{3500} + \frac{1}{2525} + \frac{1}{2500}} = 924 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

$$Q=235452, 68\text{ккал}=273831, 46684 \text{ Вт}$$

$$F = \frac{273831,46684}{924 * 13,8} = 21,5 \text{ м}^2$$

Из стандартного ряда теплообменников, в качестве теплообменника Т-3 может быть установлен двухходовой кожухотрубный теплообменник, с диаметром 400 мм, числом труб равным 100 и длиной труб – 3 м, поверхность теплообмена в данном теплообменнике составляет 24 м<sup>2</sup>. Запас мощности составит:

$$\frac{24 - 21,5}{24} \cdot 100\% = 10,6\%$$

### 3.5 Расчет теплообменника проектной мощности

Если увеличить производительность установки на 20% и более, требуемая поверхность теплообмена Т-3 составит:

$$F = \frac{273831,46684 \cdot 1,2}{924 \cdot 13,8} = 25,8 \text{ м}^2 \text{ и выше}$$

В качестве модернизации предлагается установить пластинчатый теплообменник. Рассчитаем поверхность теплообмена пластинчатого теплообменника на проектную мощность.

Для определения ориентировочной площади поверхности теплообмена аппарата задаются значением коэффициента теплопередачи для двух теплоносителей — конденсирующийся пар, масло —  $k_{op} = 800 \dots 1700 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

Принимаем  $k_{op} = 900 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ . Ориентировочная поверхность теплообмена:

$$F = \frac{273831,46684}{900 \cdot 13,8} = 22 \text{ м}^2$$

Рассмотрим пластинчатый теплообменник типа ТПР (исполнение I) поверхностью  $F=25 \text{ м}^2$ ; поверхность пластины  $f = 0,6 \text{ м}^2$ , количество пластин  $N=42$  шт. Техническая характеристика пластин  $f = 0,6 \text{ м}^2$

Эквивалентный диаметр канала $10^3$ дэ, м .....	7,4
Поперечное сечение канала $10^4$ S, м <sup>2</sup> .....	26,2
Приведенная длина канала $L_n$ , м .....	0,89

Габаритные размеры, мм

длина .....1375

ширина .....600

толщина .....1,0

Масса пластины, кг .....6,5

С целью увеличения коэффициентов теплоотдачи, а, следовательно, и коэффициента теплопередачи увеличиваем число пакетов (ходов) в теплообменнике:

Выбираем компоновку пластин по три симметричных пакета по схеме:

$$C_x = \frac{7 + 7 + 7}{7 + 7 + 7}$$

где 7 – количество межпластинных каналов в каждом пакете, в числителе показано число пакетов (ходов) – три для нагреваемой среды (ИИШ), в знаменателе – аналогичные условные обозначения для нагревающей среды (ИИШ из куба колонны №4).

Скорость ИИШ в семи каналах ( $m_1 = 7$ ),  $w_1$  м/с:

$$w_1 = \frac{G_1}{m_1 \rho_1 S} \quad (32)$$

$$w_1 = \frac{3,01}{7 * 626,2 * 26,2 * 10^{-4}} = 0,26$$

Критерий Рейнольдса  $Re_1$ :

$$Re_1 = \frac{w_1 d_{\text{э}} \rho_1}{\mu_1} \quad (33)$$

$$Re_1 = \frac{0,26 * 7,4 * 0,001 * 626,2}{0,00023} = 5238$$

Режим турбулентный.

Критерий Нуссельта:

$$Nu_1 = \frac{a_1 d_3}{\lambda_1} = 0,135 Re_1^{0,73} Pr_1^{0,43} \left( \frac{Pr_1}{Pr_{ст1}} \right)^{0,25} \quad (34)$$

где множитель  $\left( \frac{Pr_1}{Pr_{ст1}} \right)^{0,25}$ , учитывающий направление теплового потока, принимаем равным единице, так как температуры жидкости и стенки не сильно отличаются, откуда

$$\frac{a_1 7,4 * 10^{-3}}{0,111} = 0,135 * 5238^{0,73} 0,34^{0,43}$$

$$a_1 = 661 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * \text{К}}$$

Находим расход горячей ИИШ:

$$G_2 = \frac{q}{c_2(t_{2н} - t_{2к})} \quad (35)$$

где  $c_2$  – теплоемкость горячей ИИШ при  $67,5$  °С, равная  $179,0$  Дж/кг\*°С= $0,043$  ккал/кг\*°С

$$G_2 = \frac{235452,68}{0,043(70 - 65)} = 365043 \frac{\text{кг}}{\text{ч}} = 101,4 \text{ кг/с}$$

Аналогично рассчитывается скорость ИИШ в каналах:

$$w_1 = \frac{101,4}{7 * 589,5 * 26,2 * 10^{-4}} = 9,4 \text{ м/с}$$

Критерий Прандтля:

$$Pr = \frac{179 * 0,00023}{0,111} = 0,371$$

Критерий Рейнольдса:

$$Re_1 = \frac{9,4 * 7,4 * 0,001 * 589,5}{0,00023} = 178285$$

Коэффициент теплоотдачи от стенки к ИИШ:

$$\frac{a_2 7,4 * 10^{-3}}{0,111} = 0,135 * 178285^{0,73} 0,371^{0,43}$$

$$a_2 = 1216 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

$\lambda_{\text{ст}} = 17,5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$  - теплопроводность нержавеющей стали;  $\delta_{\text{ст}} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  – толщина гофрированной пластины.

$$\frac{1}{\sum r_{\text{ст}}} = \frac{1}{\frac{1}{5800} + \frac{1}{5800} + \frac{0,001}{17,5}} = 2487 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{661} + \frac{1}{2487} + \frac{1}{1216}} = 366 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Поверхность теплообмена:

$$F = \frac{273831,46684}{366 \cdot 13,8} = 53,3 \text{ м}^2$$

Поверхность теплообмена пластинчатого теплообменника для проектной мощности составляет 53,3 м<sup>2</sup>. Данный теплообменник удовлетворяет повышенной мощности установки, к тому же, теплообменник разборного типа и для увеличения поверхности теплообмена достаточно установить еще один пакет пластин.

Вывод: в разделе был произведен расчет материального баланса проектируемой установки, энергетический баланс, были выведены конструктивные размеры ректификационной колонны, а также было рассчитано вспомогательное оборудование – теплообменники.

Было установлено, что увеличение производственной мощности на 20% влечет за собой необходимость в полном демонтаже и установке нового кожухотрубчатого теплообменника. Если кожухотрубчатый теплообменник будет заменен на пластинчатый, в будущем необходимость в демонтаже не потребуется. Необходимо будет установить одну дополнительную пластину, без полной замены теплообменной аппаратуры.

## Заключение

Данная бакалаврская работа включила в себя организационные мероприятия: сбор и обработку информации по теме выпускной квалификационной работы, анализ существующих технологий газоразделения, азеотропной осушки, анализ теплообменного оборудования.

В первом разделе приведены: история развития процесса газоразделения, анализ технологии азеотропной осушки изопентан-изопреновой шихты, краткие теоретические основы процесса, обоснование выбранной технологии производства, физико-химические закономерности процесса, а также вариант оптимизации установки, с описанием преимуществ заменяемого теплообменного аппарата.

Во втором разделе приведена технологическая часть выпускной квалификационной работы, в которую входят: характеристика сырья и продуктов, описание технологической схемы, а также обоснование выбора модернизации теплообменного оборудования.

В третьем разделе представлены технологические расчеты основного оборудования – ректификационной колонны №4 и вспомогательного оборудования – теплообменника №3. Расчет теплообменного оборудования проводился на производственную мощность и на проектируемую.

Был произведен технический сравнительный анализ проектного теплообменного аппарата с базовым. Замена кожухотрубчатого теплообменника на пластинчатый в будущем дает возможность увеличивать производственную мощность без демонтажа теплообменника.

Таким образом, в данной выпускной квалификационной работе была обоснована необходимость замены теплообменного оборудования.



## Список используемых источников

1. Кирпичников П.А. Л.А. Аверко-Антонович, Ю.А. Аверко-Антонович. Химия и технология синтетического каучука. 1970. – 302 с.
2. Чуракаев А. М. Газоперерабатывающие заводы и установки / А. М. Чуракаев. - М.: Недра, 1994. – 334 с.
3. Бекиров Т. М. Промысловая и заводская обработка природных и нефтяных газов / Т. М. Бекиров – М.: Недра, 1980. – 293 с.
4. Александров И.А. Перегонка и ректификация в нефтепереработке / И. А. Александров. – М.: Химия, 1981. – 352 с.
5. Мишин В. М. Переработка природного газа и конденсата / В. М. Мишин – М.: Издательский центр "Академия", 1999. – 448 с.
6. Расчет ректификационных колонн установок перегонки нефти: учебно-методическое пособие / А.А. Гречухина, А.А. Елпидинский, Р.Р. Мингазов, С.Е. Плохова. М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2014. – 99 с.
7. А. Г. Сарданашвили, А. И. Львова Примеры и задачи по технологии переработки нефти и газа. – 2-е изд., пер. и доп. – М., Химия 1980. – 256 с.;
8. Основы расчетов процессов и аппаратов разделения углеводородных смесей / сост. А. А. Мухамадиев – Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2004. – 74 с.
9. Расчет и конструирование химических аппаратов с мешалками: учебное пособие/Э.Н.Островская, Т.В. Полякова; Казан.гос.тех-нол.ун-т. Казань, 2006. – 120 с.
10. Энциклопедия техники [Электронный ресурс]: <http://enciklopediya-tehniki.ru> (дата обращения 16.07.2022)
11. Ахметов С.Н. Технология глубокой переработки нефти и газа. Ч.1 /С.Н. Ахметов.- Уфа: Изд-во УГНТУ,1996. – 279с.
12. Дронин А.П. Технология разделения углеводородных газов/ А.А. Дронин, И.А. Пугач. –М.:Химия, 1976. – 176 с.

13. Пат. 2255096 РФ, МПК C08F 136/08 Способ получения изопренового каучука/Щербань Г.Т., патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью "Тольяттикаучук", 27.06.2005.

14. Библиофонд [Электронный ресурс]: <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=865807> (дата обращения 16.07.2022)

15. Дмитриев Е.А., Комляшев Р.Б. Аппаратуры процессов разделения гомогенных и гетерогенных систем. [Электронный ресурс]: <https://studfile.net/preview/6658339/page:6/> (дата обращения 16.07.2022).

16. Пономарева Н.Н., Остапенко Г.И, Глухов П.А., Орлов Ю.Н. Учебно-методическое пособие. 2017. – 84 с.

17. Коровин Н.В. Общая химия. - М.: Высш. шк. – 1990, 560 с.

18. Студенческая библиотека онлайн [Электронный ресурс]: [https://studbooks.net/2287835/matematika\\_himiya\\_fizika/fiziko\\_himicheskie\\_harakteristiki\\_izoprena](https://studbooks.net/2287835/matematika_himiya_fizika/fiziko_himicheskie_harakteristiki_izoprena) (дата обращения 16.07.2022).

19. Технологический регламент производства СКИ-3 цеха ИП-5/1 ООО «Тольяттикаучук» 2021.

20. Учебно-методическое пособие процесса производства СКИ, 2017. – 11 с.

21. Инструкция №21 узла азеотропной осушки и ректификации от тяжелых углеводородов возвратной фракции. ООО «Тольяттикаучук», 2022. – 10 с.

22. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : учеб. пособие / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков ; ред. П. К. Романов. - 9-е изд., перераб. и доп. - Ленинград : Химия, Ленингр. отд-ние, 1981

23. Research Inventy: International Journal Of Engineering And Science Vol.4, Issue 10 (October2014), PP 43-48

24. Shah, R. K.; Sekulic, D. P. Fundamentals of Heat Exchanger Design. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2003. Page 24

25. Sadik Kakac and Hongtan Liu (March 2002). Heat Exchangers: Selection, Rating and Thermal Design (2nd ed.). CRC Press. ISBN 978-0-8493-0902-1.

26. Distillation Column Selection, Sizing and Troubleshooting, Kolmetz Handbook of Process Equipment Design Article · June 2013

## Приложение А

### Технологическая схема азеотропной осушки изопрен-изопentanовой шихты

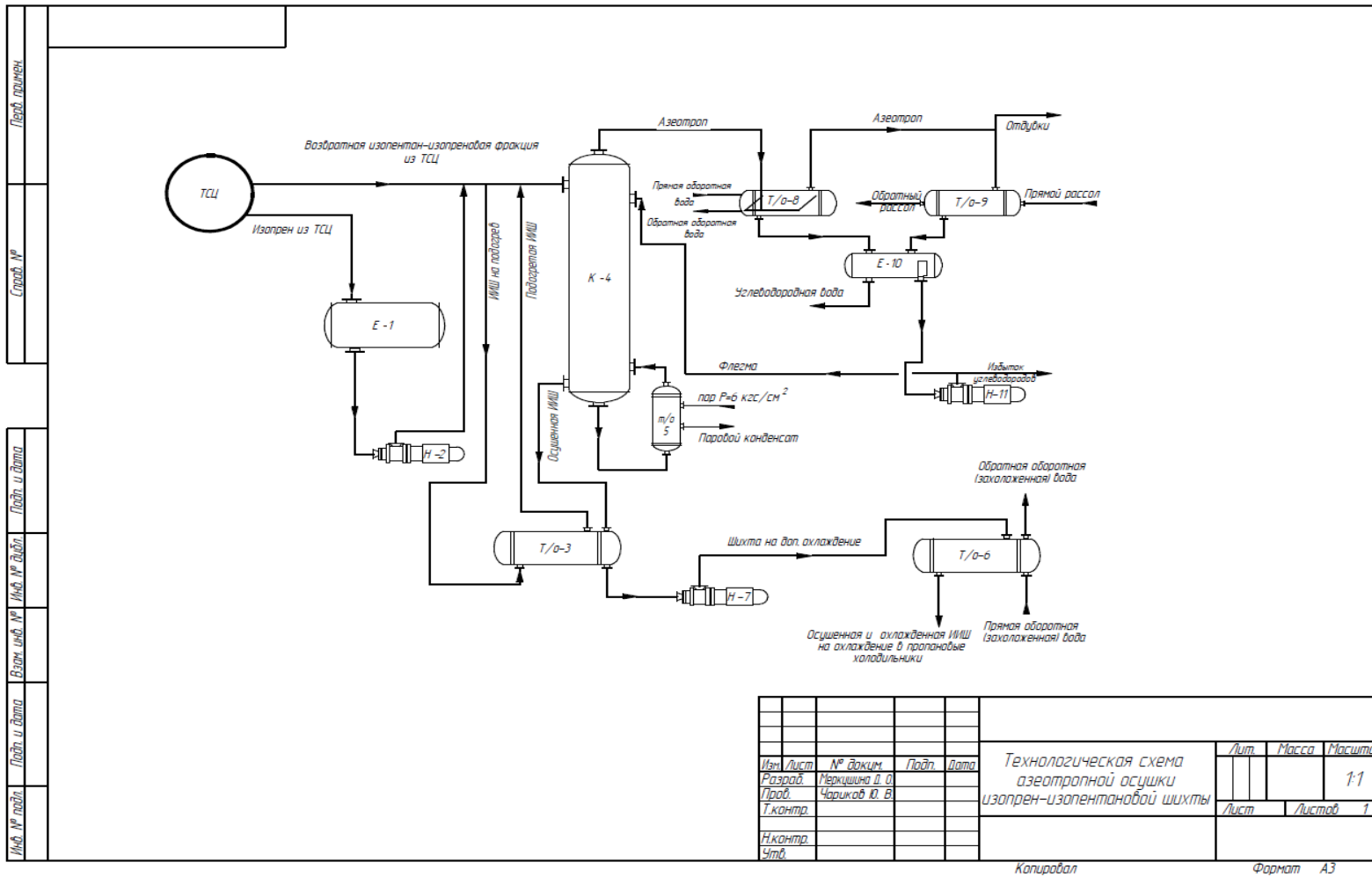


Рисунок А1 – Технологическая схема азеотропной осушки изопрен-изопentanовой шихты