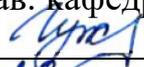


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет инженерно-физический  
Кафедра химии и химической технологии  
Направление подготовки 18.03.01 – Химическая технология  
Направленность (профиль) образовательной программы Химическая  
технология природных энергоносителей и углеродных материалов

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ  
Зав. кафедрой  
 Ю.А. Гужель  
«28» июня 2021 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему: Модернизация вакуумной колонны ЭЛОУ-АВТ

Исполнитель  
студент группы 718-об

  
17.06.21  
(подпись, дата)

М.А. Киршина

Руководитель  
доцент, канд. хим. наук

  
21.06.21  
(подпись, дата)

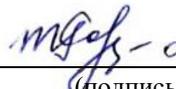
С.А. Лескова

Консультант по безопасности  
жизнедеятельности  
доцент, канд. техн. наук

  
15.06.21  
(подпись, дата)

А.В. Козырь

Нормоконтроль  
проф., док. хим. наук

  
23.06.21  
(подпись, дата)

Т.А. Родина

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет Инженерно-физический  
Кафедра Химии и химической технологии

УТВЕРЖДАЮ  
Зав. кафедрой  
\_\_\_\_\_ Ю.А. Гужель  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**З А Д А Н И Е**

К выпускной квалификационной работе студента Киршиной Маргариты Алексеевны

1. Тема выпускной квалификационной работы: «Модернизация вакуумной колонны ЭЛОУ-АВТ» утверждена Приказом от 30.04.2020 г № 810-уч
2. Срок сдачи студентом законченной работы 29.06.2021 г.
3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: производительность вакуумного блока по сырью 320000 кг/ч. Остаточное давление верха колонны 12,5 кПа. Остаточное давление зоны питания колонны 18,5 кПа. Расход пара 4500 кг/ч. Рабочая документация, учебная литература, нормативная документация, технологические схемы
4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов): Литературный обзор по проблемам первичной переработке нефти и способам увеличения отбора вакуумного газойля. Характеристика сырья и готовой продукции установки ЭЛОУ-АВТ. Описание технологической схемы вакуумного блока. Составление материального баланса вакуумной колонны. Технологический расчет оборудования – вакуумной колонны. Механический расчет вакуумной колонны
5. Перечень материалов приложения: Технологическая схема вакуумного блока. Основной вид вакуумной колонны
6. Консультанты по выпускной квалификационной работе Козырь А.В., канд. техн. наук, доцент; раздел «Безопасность и экологичность производства»
7. Дата выдачи задания 14.05.2021 г

Руководитель выпускной квалификационной работы: Лескова Светлана Анатольевна, доцент, канд. хим. наук

Задание принял к исполнению 14.05.2021 г.

\_\_\_\_\_

## РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа содержит 68 с., 7 рисунков, 5 таблиц, 28 источников.

НЕФТЕПЕРЕРАБОТКА, ЭЛОУ-АВТ, ВАКУУМНАЯ КОЛОННА, РЕКТИФИКАЦИЯ, ВАКУУМНАЯ ПЕРЕГОНКА, МОДЕРНИЗАЦИЯ, НАСАДКА, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ, МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

В представленной работе произведен подбор и анализ литературы для рассмотрения основных процессов первичной нефтепереработки, изучен процесс вакуумной перегонки мазута на установке ЭЛОУ-АВТ, в том числе технологическая схема вакуумного блока перегонки мазута, принцип действия вакуумной колонны установки ЭЛОУ-АВТ, предложена ее модернизация, изучена нормативная документация и учебная литература.

Исходя из задания, произведен технологический и механический расчеты вакуумной колонны.

В работе рассмотрены аспекты безопасности и экологичности производства.

В графической части работы выполнены чертежи технологической схемы установки вакуумной перегонки мазута и общего вида вакуумной колонны.

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розраб.</i>		<i>Киришина М.А.</i>			<i>Модернизация вакуумной колонны ЭЛОУ-АВТ</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Лескова С.А.</i>				<i>У</i>	<i>3</i>	<i>68</i>
<i>Н. контр.</i>		<i>Родина Т.А.</i>				<i>АмГУ ИФФ гр. 718-об</i>		
<i>Зав. каф.</i>		<i>Гужель Ю.А.</i>						

## СОДЕРЖАНИЕ

Определения, обозначения, сокращения.....	6
Введение.....	7
1 Литературный обзор.....	8
1.1 Модернизация российских НПЗ.....	8
1.2 Основы процесса нефтепереработки.....	9
1.2.1 Перегонка нефти.....	10
1.2.2 Ректификация нефти.....	11
1.2.3 Современные промышленные установки перегонки нефти.....	13
1.2.4 Установка ЭЛОУ-АВТ.....	13
1.3 Технология вакуумной перегонки мазута.....	14
1.4 Основное оборудование вакуумного блока.....	16
1.4.1 Устройство и принцип действия вакуумной колонны.....	16
1.4.2 Способы модернизации вакуумного блока.....	18
1.4.2.1 Использование регулярных насадок.....	19
1.4.2.2 Создание вакуума в колонне.....	20
1.4.2.3 Использование дополнительной колонны.....	21
2 Технологическая часть.....	24
2.1 Описание технологической схемы.....	24
2.2 Характеристика сырья и готовой продукции.....	27
2.3 Технологический расчет вакуумной колонны.....	27
2.4 Тепловой баланс колонны.....	40
2.5 Модернизация вакуумной колонны.....	42
3 Механический расчет вакуумной колонны.....	47
3.1 Расчет аппарата на действие ветровых сил.....	50

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>					
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>						
<i>Разраб.</i>		<i>Киришина М.А.</i>			<i>Модернизация вакуумной колонны ЭЛОУ-АВТ</i>			<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Лескова С.А.</i>						У	4	68
<i>Н. контр.</i>		<i>Родина Т.А.</i>			<i>АмГУ ИФФ гр. 718-об</i>					
<i>Зав. каф.</i>		<i>Гужель Ю.А.</i>								

3.2 Проверка прочности фундамента.....	57
3.3 Определение толщины фундаментного кольца.....	58
3.4 Расчет аппарата на устойчивость.....	59
3.5 Расчет сварочного шва, соединяющего опорную часть аппарата.....	60
4 Безопасность и экологичность производства.....	61
4.1 Средства и системы защиты при эксплуатации установки.....	63
4.2 Воздействие на окружающую среду газойля при условиях аварийной и безаварийной эксплуатации.....	63
Заключение.....	65
Библиографический список.....	66

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

В настоящей бакалаврской работе применяются следующие сокращения с соответствующими определениями:

ЭЛОУ-АВТ – электрообессоливающая установка атмосферно-вакуумная трубчатка;

НПЗ – нефтеперерабатывающий завод;

АТ – атмосферная трубчатка;

ВТ – вакуумная трубчатка;

ВИНК – вертикально-интегрированные нефтяные компании;

ВКК – высококипящий компонент;

НКК – низкокипящий компонент;

ВГ – вакуумный газойль;

ЛВГ – легкий вакуумный газойль;

ВСС – вакуумсоздающая система;

ЖКВН – жидкостно-кольцевой вакуумный насос;

КПД – коэффициент полезного действия;

ВЭТТ – высота, эквивалентная теоретической тарелке;

ВДФ – вакуумная дизельная фракция;

АВО – аппарат воздушного охлаждения;

ВЦО – верхнее циркуляционное орошение;

НЦО – нижнее циркуляционное орошение;

ВСУ – вакуумсоздающее устройство;

КИП – контрольно-измерительный прибор;

ПВО – паровоздушное облако;

ПДК – предельно допустимая концентрация.

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Киришина М.А.</i>			<i>Модернизация вакуумной колонны ЭЛОУ-АВТ</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Лескова С.А.</i>				У	6	68
<i>Н. контр.</i>		<i>Родина Т.А.</i>				<i>АмГУ ИФФ гр. 718-об</i>		
<i>Зав. каф.</i>		<i>Гужель Ю.А.</i>						

## ВВЕДЕНИЕ

Рост добычи, а также нефтепереработки неминусимо связан с необходимостью переработки более тяжелых нефтей, что сопровождается потребностью усовершенствования технологических схем и характеристик всех процессов и, в первую очередь, установки первичной переработки нефти – ЭЛОУ-АВТ. Увеличение доли тяжелых нефтей и содержания серосодержащих соединений повышает нагрузку на работу установки вакуумной перегонки мазута и требует более эффективного отбора фракций.

Эффективность работы вакуумного блока, а значит, и эффективность самой установки ЭЛОУ-АВТ, в значительной степени определяется глубиной вакуума, создаваемого в колонне.

Цель бакалаврской работы – изучить принцип работы блока вакуумной перегонки мазута и предложить способ модернизации вакуумной колонны ЭЛОУ-АВТ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- произвести подбор и анализ научно-технической документации и литературы для составления литературного обзора по вопросам процесса нефтепереработки;
- изучить технологическую схему установки вакуумной перегонки мазута;
- произвести технологический и механический расчеты вакуумной колонны;
- рассчитать материальный и тепловой балансы вакуумной колонны;
- рассмотреть аспекты производственной безопасности и экологичности;
- выполнить графическую часть бакалаврской работы.

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Разраб.</i>		<i>Киришина М.А.</i>			<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Лескова С.А.</i>			У	7	68
<i>Н. контр.</i>		<i>Родина Т.А.</i>			<i>АмГУ ИФФ гр. 718-об</i>		
<i>Зав. каф.</i>		<i>Гужель Ю.А.</i>					

# 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

## 1.1 Модернизация российских НПЗ

Нефтеперерабатывающая промышленность России является крупной отраслью топливной промышленности, обеспечивающая переработку жидких углеводородов, добываемых в стране. Большое влияние на структуру производства и качество получаемых нефтепродуктов оказывают технологическое перевооружение и модернизация оборудования и технологических процессов. Помимо этого, ежегодно ужесточаются требования и нормы по качеству сырья и продуктов переработки углеводородов [1].

В России функционирует 37 крупных НПЗ с объемами переработки более 1 млн т/год. Суммарная мощность нефтеперерабатывающих предприятий в России оценивается на уровне 328 млн т/год.

Отечественная нефтеперерабатывающая промышленность по валовым объемам является одной из крупнейших (уступает только США и Китаю), но характеризуется сравнительно невысокой глубиной переработки сырья. Тем не менее усилия вертикально-интегрированных нефтяных компаний (ВИНК) и независимых компаний по модернизации и строительству современных НПЗ привели к существенному росту данного показателя в период 2014 – 2019 годов – с 72,3 до 82,8 %.

Модернизация российских НПЗ проводится с целью расширения ассортимента выпускаемой продукции, оптимизации процесса переработки, а также уменьшения воздействия на окружающую среду. Таким образом, модернизация промышленных установок с повышением производительности по перерабатываемому углеводородному сырью является важным и актуальным направлением развития топливно-энергетического комплекса России [2].

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Киришина М.А.</i>			<i>Модернизация вакуумной колонны ЭЛОУ-АВТ</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Лескова С.А.</i>				У	8	68
<i>Н. контр.</i>		<i>Родина Т.А.</i>				<i>АмГУ ИФФ гр. 718-об</i>		
<i>Зав. каф.</i>		<i>Гужель Ю.А.</i>						

## 1.2 Основы процесса нефтепереработки

Нефть представляет собой сложную жидкую смесь близко кипящих углеводородов и высокомолекулярных углеводородных соединений. В ее состав входят различные соединения, такие как кислород, сера, азот и некоторые металлы.

Процесс нефтепереработки подразделяется на три основных технологических процесса:

1. Первичная переработка – разделение нефти на фракции, различающиеся по температурным пределам кипения;

2. Вторичная – переработка фракций, которые получены при первичной переработке, заключающаяся в процессе химического превращения содержащихся в них углеводородов и в производстве компонентов товарных нефтепродуктов;

3. Товарное производство – смешивание компонентов товарных нефтепродуктов с различными присадками для приобретения определенных характеристик.

Изначально сырая нефть поступает на установку ЭЛОУ-АВТ, где происходит подготовка нефти к переработке и, соответственно, последующая ее переработка – атмосферно-вакуумная перегонка, основное назначение которой является выделение из нефти определённых фракций и получение готовых продуктов, соответствующим качеству. Таким образом, перегонка является основным первичным процессом переработки нефти.

Перегонка – процесс частичного выкипания жидкой фазы или конденсации паровой фазы различных по летучести веществ для получения одного продукта более летучего, а другого менее летучего, нежели первоначальная смесь.

Причиной изменения состава первоначального раствора в ходе процесса перегонки является выделение из него новой фазы. Она имеет состав, равновесный с исходным раствором, но количественно отличающийся от него. Это

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		9

обстоятельство, а кроме того, резкое различие в плотностях паровой и жидкой фаз, обеспечивающее их легкое отделение друг от друга, формируют основу промышленного использования процесса перегонки [3].

В нынешних технологических процессах переработки нефти первичная перегонка применяется в основном с целью получения сырья для последующих процессов.

### 1.2.1 Перегонка нефти

Перегонка (дистилляция) – это процесс разделения нефти и газов на отдельные фракции (компоненты), различные по температурным пределам кипения. По способу проведения процесса перегонка подразделяется на простую и сложную.

Простую атмосферную перегонку нефти возможно осуществить обычным нагреванием жидкости и последующей конденсацией паров. Полный отбор здесь состоит из того, что скапливается конденсат паров, образовавшихся в различных интервалах температур кипения: сперва выкипают и далее конденсируются низкокипящие фракции, а затем высококипящие фракции углеводородов. Безусловно, при этом способе перегонки разделение на узкие фракции не происходит, так как часть высококипящих фракций переходит в дистиллят, а часть низкокипящих не успевает испариться в своем температурном интервале. Для получения более узких фракций применяют перегонку с ректификацией [1].

Отдельные фракции могут подвергаться и повторной атмосферной перегонке для разделения на более однородные компоненты. Так, из бензинов широкого фракционного состава получают бензолную, толуольную и ксилольную фракции, являющиеся сырьем для получения индивидуальных ароматических углеводородов. Также повторной перегонке и дополнительно разделению может подвергаться и дизельная фракция [3].

Перегонка нефти на современных установках может проводиться различными методами, такими как однократное испарение в одной ректификаци-

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		10



перегонки – мазут – может быть направлен на вакуумную перегонку.

Перегонка с ректификацией является распространенным в нефтеперерабатывающей промышленности массообменным процессом, проводимым в ректификационных колоннах, снабженных контактными устройствами (тарелками или насадкой) [6].

В ректификационных колоннах создается два встречных потока – поднимающиеся вверх пары и стекающая им навстречу жидкость. Контакт между ними образуется с помощью контактных устройств, при этом пар, подходящий к устройству, имеет температуру выше, чем жидкость, которая находится внутри этого устройства. Колонна условно разделяется на три части – эвапорационную, укрепляющую и исчерпывающую. В эвапорационном пространстве осуществляется испарение поступающей жидкости. Исходная смесь подается в среднюю часть колонны, так как в этой части состав флегмы приблизительно равен составу смеси, подлежащей ректификации. Подогретая смесь поступает на питательную тарелку колонны и частично испаряется. Паровая фаза движется вверх, а неиспарившаяся часть смешивается с флегмой и стекает вниз. Часть колонны, находящаяся выше ввода исходной смеси, называется укрепляющей, так как в ней паровая фаза укрепляется легкими фракциями. В исчерпывающей части колонны из стекающей вниз флегмы отгоняются (исчерпываются) оставшиеся легкие фракции.

В ректификационной колонне необходимо постоянное наличие восходящего потока пара и нисходящего потока флегмы. Для выделения пара в нижней части колонны имеется система обогрева. Ректификация может проводиться при атмосферном давлении, под вакуумом, под избыточным давлением при пониженной температуре. В основном процесс ректификации осуществляется при давлении, близком к атмосферному. Вакуумной ректификации подвергают смеси веществ, склонных к термическому разложению или полимеризации при высоких температурах. Низкотемпературная ректификация используется для разделения веществ, имеющих низкую температуру кипения [7].

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		12

### 1.2.3 Современные промышленные установки перегонки нефти

Технологические установки перегонки нефти предназначены для разделения нефти на фракции и дальнейшей переработки или применения их как компоненты товарных нефтепродуктов. На этих установках получают практически все компоненты моторных топлив, смазочных масел, сырье для вторичных процессов и для нефтехимических производств. От их работы зависят ассортимент и качество получаемых продуктов и технико-экономические показатели дальнейших процессов переработки нефтяного сырья. Перегонка нефти проводится на так называемых атмосферных трубчатках (АТ), вакуумных трубчатках (ВТ) или атмосферно-вакуумных трубчатках (АВТ) [8].

На установках АТ проводят неглубокую перегонку нефти с получением топливных (бензиновых, керосиновых, дизельных) фракций и мазута. Установки ВТ предназначены для перегонки мазута. Получаемые на них масляные фракции и гудрон используют в качестве сырья процессов вторичной переработки их с получением топлив, смазочных масел, кокса, битумов и других нефтепродуктов.

Современные процессы перегонки нефти являются комбинированными с процессами обезвоживания и обессоливания, вторичной перегонки и стабилизации бензиновой фракции: ЭЛОУ-АТ, ЭЛОУ-АВТ, ЭЛОУ-АВТ вторичная перегонка и т.д.

Диапазон мощностей отечественных установок перегонки нефти достаточно широк – от 0,5 до 8 млн тонн нефти в год [9].

### 1.2.4 Установка ЭЛОУ-АВТ

Установка ЭЛОУ-АВТ состоит из блока ЭЛОУ, блока АТ, блока ВТ, блока стабилизации и блока вторичной разгонки бензиновых фракций. Блок ЭЛОУ служит для обезвоживания и обессоливания нефти, что необходимо при подготовке нефти к ее переработке. На блоке АТ происходит разгонка светлых нефтепродуктов на узкие фракции. На блоке ВТ осуществляется разгонка мазута ( $> 350$  °С) на фракции. На блоке стабилизации удаляются из бен-

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		13

зина газообразные компоненты, в том числе коррозионно-активный сероводород и углеводородные газы. На блоке вторичной разгонки бензиновых фракций бензин разделяется на фракции.

Установка ЭЛОУ-АВТ предназначена для переработки сырой нефти для получения продуктов первичной переработки и сырья для вторичных процессов. Нефть представляет собой сложную смесь парафиновых, нафтеновых и ароматических углеводородов, различных по молекулярной массе и температуре кипения [10].

На установках АВТ проводится разделение нефти на следующие фракции:

- углеводородный газ;
- бензиновая фракция – выкипает в пределах 50 – 180 °С;
- керосиновая фракция – выкипает в пределах 120 – 315 °С;
- дизельная фракция – выкипает в пределах 180 – 360 °С;
- мазут – выкипает выше 350 °С;
- вакуумный газойль – выкипает в пределах 350 – 500 °С;
- гудрон – остаток атмосферно-вакуумной перегонки нефти, выкипает при температуре выше 500 °С.

### **1.3 Технология вакуумной перегонки мазута**

При вакуумной перегонке осуществляется отбор масляных дистиллятов или вакуумного газойля от мазута. На НПЗ топливно-масляного профиля получают масляные фракции, на НПЗ топливного профиля – вакуумный газойль.

Термический крекинг углеводородов начинается при температуре более 380 °С, а конец кипения вакуумного газойля – 500 °С и более. Перегонка при близком к вакууму остаточном давлении 40 – 60 мм рт. ст. позволяет снизить максимальную температуру в аппарате до 360 – 380 °С, что позволяет отбирать масляные фракции [11].

В колонне также выделяется фракция вакуумного газойля, которая используется как компонент дизельного топлива. Большая часть вакуумных ус-

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		14

тановок работает по схеме однократного испарения мазута.

Для понижения рабочей температуры и снижения термодеструкции тяжелых углеводородов в колонне создается вакуум, а в качестве теплоносителя и одновременно инертного компонента для понижения температуры кипения вводится перегретый водяной пар. Расход водяного пара в вакуумной колонне существенно больше, чем в атмосферном блоке – 5 – 8 % в расчете на сырье (мазут).

Мазут нагревается в теплообменниках, доводится в трубчатой печи до температуры 375 – 400 °С и поступает в вакуумную колонну, отгонная часть которой имеет меньший диаметр, чем концентрационная часть. Это позволяет сократить время пребывания гудрона в кубе колонны, что способствует снижению глубины его разложения.

Вакуум в колонне создается конденсацией паров и отсасыванием несконденсировавшихся газов вакуумными насосами (например, парожетторного типа). Конденсат откачивается насосами или удаляется свободным истечением.

В вакуумной колонне стараются создать условия, обеспечивающие высокую долю отгона сырья (перехода его в паровую фазу) и его минимальное разложение. С этой целью следует уменьшать время пребывания мазута в печи, уменьшать гидравлические сопротивления во всех элементах системы и использовать ВСС, обеспечивающие поддержание минимального давления в колонне [8].

Выносные отпарные секции в вакуумных блоках используются достаточно редко. Более целесообразно их использование только для работы по масляному профилю, где главным является требование к качеству узких масляных фракций в отношении наложения соседних фракций друг на друга. Это объясняется тем, что в отпарные секции необходимо вводить дополнительное количество водяного пара, что способствует повышению паровых нагрузок в колонне, а следовательно, и увеличению гидравлического сопротивления колонны.

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						15
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

Необходимо подчеркнуть, что разложение мазутных фракций зависит от температуры, а следовательно, и давления в кубе колонны. По этой причине глубина вакуума, создаваемая ВСС в верхней части колонны, далеко не всегда будет определять интенсивность разложения тяжелых углеводородов. Наиболее нужным является снижение гидравлического сопротивления контактных устройств колонны, что еще раз подтверждает системный характер задачи проектирования сложных колонн [12].

## 1.4 Основное оборудование вакуумного блока

### 1.4.1 Устройство и принцип действия вакуумной колонны

Основное назначение вакуумного блока – получение вакуумного газойля широкого фракционного состава и гудрона.

Общий вид вакуумной колонны представлен на рисунке 1.

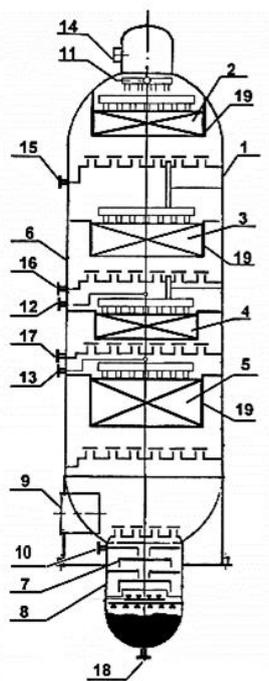


Рисунок 1 – Вакуумная колонна для перегонки мазута:

1 – цилиндрический корпус; 2, 3, 4, 5 – структурированные насадки;  
 6 – концентрационная часть колонны; 7 – переливные тарелки; 8 – отгонная часть колонны; 9 – штуцер для подвода мазута из печи; 10 – штуцер для подвода водяного пара; 11, 12, 13 – штуцеры для подачи орошения; 14, 15, 16, 17, 18 – штуцеры для вывода продуктовых фракций; 19 – обечайка

Процесс ректификации проводится в вакуумной колонне, где температуру кипения углеводородов искусственно снижают под действием вакуума. Вакуумные колонны работают под остаточным давлением от 15 до 50 мм рт. ст. и имеют сравнительно большой диаметр корпуса от 6 до 10 метров.

В вакуумную колонну мазут поступает в виде парожидкостной смеси с температурой примерно 375 – 410 °С.

Перегонка осуществляется при остаточном давлении 15 мм рт. ст. наверху колонны в присутствии водяного пара. Пары, проходя через пакеты насадки, поднимаются. В верхней части вакуумных колонн устанавливают отбойные устройства, обеспечивающие эффективное отделение капель от паров. Вакуум в колонне создается эжектором [13].

Эжектор состоит из сопла, всасывающей камеры, камеры смешения, диффузора и камеры сжатия. Работа эжекторов основана на энергии движения водяного пара высокого давления. Через сопло проходит поток жидкости, который называют эжектирующим активным потоком. Активный поток перемещается с большой скоростью и турбулентностью. Рабочий пар истекает из сопла со сверхзвуковой скоростью. За счет турбулентного движения вихревых масс паровой струи с частичками окружающей среды, в камере всасывания происходит засасывание несконденсировавшихся газов и увлечение их в сужающую насадку – камеру смешения, предназначенную для более полного смешения пара с газом. В результате этого в камере пассивный поток принимает энергию активного потока. Из-за пониженного давления активного потока происходит подсос в камеру пассивного потока, который затем выносится от места всасывания энергии циркулирующей жидкости. Из горловины поток пара, смешанный с отсасываемым газом, поступает в расширяющуюся насадку – диффузор, предназначенный для перевода кинетической энергии потока в работу по выталкиванию смеси из аппарата. В качестве активного потока используется циркулирующая жидкость. Приводимый в движение поток является эжектируемым – пассивным потоком [12].

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						17
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		



созданием вакуума в колонне, а также вводом в установку дополнительной колонны [15].

#### 1.4.2.1 Использование регулярных насадок

Модернизация вакуумной колонны может заключаться в замене тарельчатых контактных устройств на современные высокоэффективные регулярные насадки с низким гидравлическим сопротивлением [16].

В настоящее время на многих предприятиях России в вакуумных колоннах АВТ используются перекрестноточные насадки, ромбовидные, «Джем-пак», «Меллапак».

Также известны и другие регулярные насадки с низким гидравлическим сопротивлением на одну теоретическую тарелку, например насадки из гофрированной сетки фирмы «Зульцер», регулярная насадка с треугольными и трапециевидными гофрами, насадка «Меллапак» из слоев перфорированного металлического листа, насадки «Кедр», «Вакупак» и «Гудлоу» [17].

Некоторые виды регулярных насадок представлены на рисунке 3.

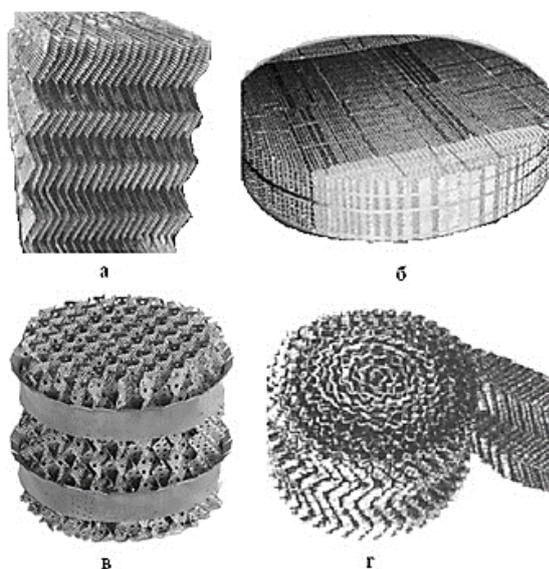


Рисунок 3 – Регулярные насадки:

а – «Вакупак»; б – «Кедр»; в – «Меллапак»; г – «Гудлоу»

Отмечаются следующие достоинства использования регулярных насадок с низким гидравлическим сопротивлением:

- высокая производительность – до 4 млн т/год по мазуту;
- возможность выделения глубоковакуумного газойля с температурой конца кипения более 550 °С;
- пониженная (на 10 – 15 °С) температура нагрева мазута после печи;
- более чем в два раза снижение потерь давления в колонне;
- существенное снижение расхода водяного пара на отпарку.

Однако, есть и недостатки данного метода, такие как:

- высокая стоимость и сложность изготовления насадок;
- сложность организации равномерного распределения орошения по всей площади насадки;
- сложность сбора и вывода боковых погонов вакуумной колонны [18].

#### 1.4.2.2 Создание вакуума в колонне

Важным условием, оказывающим влияние на отбор вакуумных дистиллятов, является остаточное давление в вакуумной колонне, особенно в зоне ее питания. Снижение остаточного давления дает возможность достичь высокой доли отгона и необходимого отбора газойлевых фракций при более низкой температуре мазута на выходе из печи.

Кроме того, снижение давления в зоне питания связано с давлением наверху колонны, которое зависит от эффективности работы ВСС. В настоящее время широко используются парозежекторные создающие вакуум системы. Эффективность их работы и количество паров и газов, которые они должны откачивать, существенно зависят от степени конденсации паров с вакуумных колонн. В летний период, когда температура воздуха повышается, возрастает и давление наверху вакуумной колонны [19].

Наибольшее распространение получили следующие системы создания вакуума:

- применение барометрического конденсатора, в котором осуществляется конденсация паров, выходящих с верха вакуумной колонны, за счет подачи воды или дизельного топлива в качестве конденсирующего и абсорбирующего

агента;

– применение поверхностных конденсаторов с закрытой конденсацией паров;

– применение паровых эжекторов, отсасывающих газы и пары непосредственно из колонны.

Недостатками рассматриваемой ВСС являются образование значительного количества загрязненной нефтепродуктами воды, насыщение ее углеродородными газами, а также сероводородом. С целью снижения количества загрязненной воды в барометрический конденсатор вводят охлажденное дизельное топливо и заменяют барометрические конденсаторы поверхностными [17].

В качестве вакуумсоздающих устройств применяют также жидкостно-кольцевые вакуумные насосы (ЖКВН), в которых вращающееся жидкостное кольцо играет роль гидравлического поршня. Широкое использование ЖКВН нашли в лабораторных установках, полупромышленных стендах в качестве систем создания и поддержания вакуума. Они обладают сравнительно высоким КПД цикла (около 30 %). ЖКВН также включает в себя жидкостной сепаратор, в котором происходит сепарация газожидкостной смеси на газовую и жидкую фазы.

Снижение общего остаточного давления в вакуумной колонне увеличивает относительную летучесть фракций гудрона, что повышает четкость их разделения.

Температура нагрева мазута в печи определяется температурой его термического разложения, которое ведет к образованию неконденсируемых газов разложения. Для поддержания вакуума смесь этих газов должна постоянно выводиться из вакуумной колонны, что и выполняет вакуумсоздающая система [20].

#### 1.4.2.3 Использование дополнительной колонны

Повысить отбор тяжелого вакуумного газойля возможно использованием дополнительной колонны, работающей при глубоком вакууме с остаточ-

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		21

ным давлением наверху колонны до 0,65 кПа, в результате создания глубокого вакуума в зоне ввода сырья в вакуумной колонне и при использовании в качестве сырья гудрона из основной вакуумной колонны без нагрева.

Принципиальная схема установки ректификации в дополнительной колонне представлена на рисунке 4.

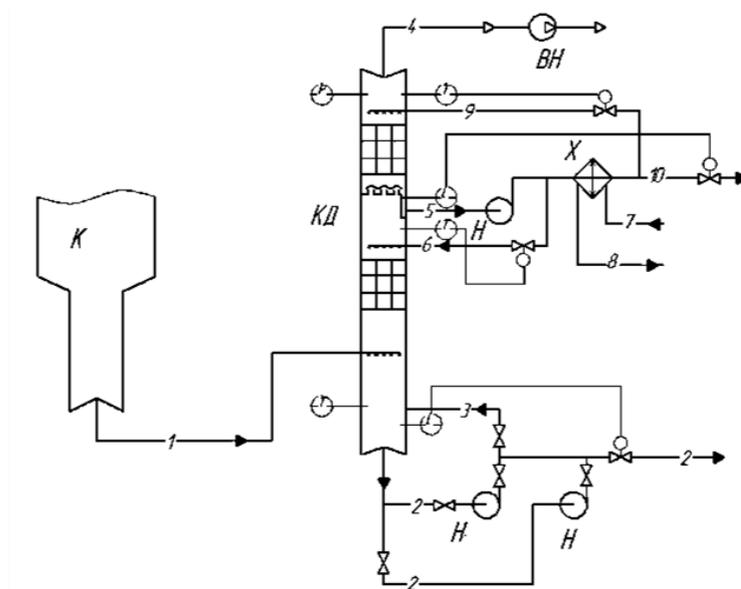


Рисунок 4 – Принципиальная схема ректификации  
в дополнительной колонне:

1 – сырье (гудрон); 2 – тяжелый гудрон; 3 – тяжелый гудрон на рециркуляцию;  
4 – сдувки; 5 – ВГ на циркуляцию; 6 – жидкость на орошение; 7 – сырая нефть;  
8 – нефть на ЭЛОУ; 9 – циркуляционное орошение; 10 – ВГ (готовый продукт)

Данный метод имеет следующие преимущества:

1. В гудроне отсутствуют низкокипящие компоненты вакуумного газойля, за счет чего объем паров в дополнительной колонне, в том числе и при глубоком вакууме, позволяет создать колонну сравнительно небольших размеров;
2. Меньшее число теоретических тарелок в дополнительной колонне снижает ее гидравлическое сопротивление, что позволяет получить пониженное давление в зоне ввода сырья;
3. Присутствие в паровой фазе в дополнительной колонне только тяжелого вакуумного газойля исключает необходимость вывода ЛВГ и требует

меньшего числа теоретических тарелок, чем в основной вакуумной колонне;

4. Использование гудрона в качестве сырья в дополнительной колонне резко снижает количество газов разложения в ней, так как основное количество этих газов отпаривается в основной вакуумной колонне. Это позволяет для дополнительной колонны устанавливать ВСС небольшой производительности.

Недостатками метода являются большие капитальные и эксплуатационные затраты, сложность в эксплуатации, а также недостаточное качество продуктов [21].

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		23

## 2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 2.1 Описание технологической схемы

Технологическая схема вакуумного блока установки ЭЛОУ-АВТ представлена на рисунке 5.

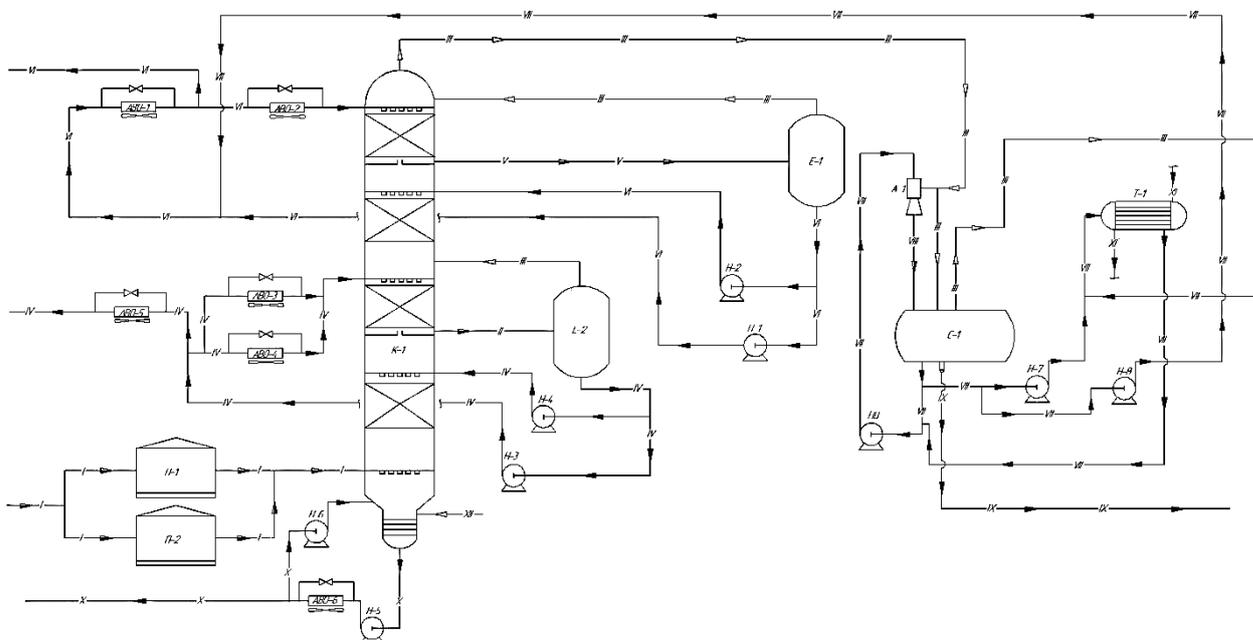


Рисунок 5 – Технологическая схема вакуумного блока установки ЭЛОУ-АВТ:

- I – мазут из АТ; II – смесь ВГ и газов разложения; III – газы разложения;
- IV – вакуумный газойль; V – смесь ВДФ и газов разложения; VI – ВДФ;
- VII – рабочая жидкость; VIII – газы разложения + рабочая жидкость;
- IX – водяной конденсат; X – гудрон; XI – обратная вода

Мазут с низа атмосферной колонны с температурой 329 °С прокачивается параллельными потоками через змеевики конвекционных и радиантных зон печей. Пройдя конвекционные и радиантные змеевики, мазут по трансферным трубопроводам, в парожидкостном состоянии с температурой 390 °С поступает через распределительное устройство, находящееся в эвапорацион-

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Разраб.</i>		<i>Киришина М.А.</i>			<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Лескова С.А.</i>			У	24	68
<i>Н. контр.</i>		<i>Родина Т.А.</i>			<i>АмГУ ИФФ гр. 718-об</i>		
<i>Зав. каф.</i>		<i>Гужель Ю.А.</i>					
<i>Модернизация вакуумной колонны ЭЛОУ-АВТ</i>							

ном пространстве вакуумной колонны К-1, на первую клапанную двухпоточную тарелку.

С верхней «глухой» тарелки выводится вакуумная дизельная фракция (ВДФ) с температурой 161 °С и самотеком поступает в вакуумприемник Е-1. Пары из Е-1 возвращаются по уравнительному трубопроводу в колонну К-1, а ВДФ поступает на прием насосов Н-1, 2, после которых делится на два потока.

– первый поток возвращается в колонну К-1 на вторую секцию насадки в виде горячего орошения для равномерного распределения по всей поверхности пакета;

– второй поток охлаждается в аппарате воздушного охлаждения (АВО) АВО-1, после чего балансовое количество ВДФ выводится с установки, а часть потока, доохладившись в АВО-2 до 86 °С, подается в качестве верхнего циркуляционного орошения (ВЦО) в колонну К-1 на первую секцию насадки.

С «глухой» тарелки под третьей секцией насадки ВГ с температурой 262 °С поступает в вакуумприемник Е-2. Пары из Е-2 возвращаются по уравнительному трубопроводу в колонну К-1, а ВГ поступает на прием насосов Н-3, 4, после которых делится на два потока:

– первый поток возвращается через распределительное устройство, для равномерного распределения по всей поверхности пакета в колонну на четвертую секцию насадки в виде горячего орошения с температурой 187 °С;

– второй поток также делится на два потока: первый поток, в качестве нижнего циркуляционного орошения (НЦО), охлаждается в АВО-3, АВО-4 до температуры 90 °С и возвращается в колонну К-1 на третью секцию насадки; а балансовое количество ВГ, охлаждаясь в АВО-5 до 85 °С, выводится с установки.

С низа колонны К-1 гудрон с температурой 349 °С поступает на прием насосов Н-5,6. С нагнетания насоса Н-5 гудрон охлаждается в АВО-6 и выводится с установки. Для снижения крекинга в отгонную часть колонны К-1 вводится охлажденный гудрон (квенч).

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		25

Рабочим агентом в вакуумсоздающем устройстве (ВСУ) является компонент судового топлива (атмосферный газойль).

Рабочий агент насосом НВ подается в вакуумсоздающее устройство А-1.

Выводимые с верха вакуумной колонны К-1 газы разложения и незначительное количество паров дизельной фракции поступают в качестве пассивного (сжимаемого) рабочего тела на вход вакуумсоздающего устройства А-1. В А-1 происходит сжатие газов разложение и незначительного количества паров дизельной фракции до остаточного давления на верху колонны К-1 за счет кинетической энергии рабочей жидкости. Из ВСУ газожидкостная смесь поступает в затворную секцию сепаратора С-1. Сепаратор оборудован специальными внутренними устройствами, на которых происходит отделение газовой фазы и сконденсировавшихся паров воды из рабочей жидкости. Газы разложения из сепаратора С-1 поступают на сжигание.

Отделенная от рабочей жидкости вода из грязевика, установленного в нижней части сепаратора, самотеком выводится в промышленную канализацию.

Для поддержания температуры рабочего агента часть рабочей жидкости из сепаратора С-1 поступает на охлаждение в водяной холодильник Т-1 посредством насосов Н-7, 8. Охлажденный рабочий агент, смешавшись с компонентом судового топлива из С-1, поступает на прием насоса НВ.

Балансовая часть компонента судового топлива (атмосферного газойля) выводится с установки путем вовлечения ее в ВДФ перед АВО-1. В качестве хладагента, для обеспечения необходимого теплосъема, в Т-1 используется обратная вода. На выходе с теплообменника обратная вода выводится на блок обратного водоснабжения.

В процессе эксплуатации, вследствие абсорбции рабочей жидкостью продуктов разложения и углеводородов из парогазовой смеси эжектируемой с колонны К-3, изменяются ее физические свойства (теплоемкость, плотность), что в итоге отрицательно сказывается на эффективности работы ВСС в целом.

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		26

Для исключения воздействия данного фактора на стабильность работы ВСС, предусмотрена постоянная подпитка системы свежим компонентом судового топлива (атмосферным газойлем).

## **2.2 Характеристика сырья и готовой продукции**

Сырьем для установки вакуумной перегонки является мазут – остаток атмосферной перегонки нефти. Состав мазута, поступающего на вакуумный блок из атмосферной колонны, регламентируется содержанием фракций, выкипающих до 350 °С.

Содержание светлых фракций должно составлять не более 5 % по массе, так как их рост приводит к увеличению диаметра вакуумной колонны, затрудняет полную конденсацию паров наверху колонны и увеличивает загрузку вакуумсоздающей системы.

Целевым продуктом вакуумной перегонки мазута является вакуумный газойль – фракция, выкипающая при 350 – 500 °С. Эта фракция должна быть светлой или слегка окрашенной, свободной от смолисто-асфальтовых веществ и содержать минимальные концентрации металлов, особенно никель и ванадий, которые сильно влияют на активность и срок службы катализаторов, применяемых при каталитическом крекинге, гидрокрекинге, пиролизе вакуумного газойля, поэтому при эксплуатации промышленных установок ВТ исключительно важно уменьшить унос жидкости (гудрона) в концентрационную секцию вакуумной колонны в виде брызг, пены, тумана и т.д.

Остаток вакуумной перегонки – гудрон – фракция с температурой кипения более 500 °С, используется в качестве сырья установок термокрекинга, висбрекинга, коксования и получения битума. Может являться компонентом котельного топлива.

## **2.3 Технологический расчет вакуумной колонны**

Технологический расчет производим согласно [22].

*Материальный баланс колонны*

Материальный баланс колонны составляем по данным выхода продуктов

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		27

из сырья. Данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Данные о выходе продуктов

Наименование продукта	Выход, % масс.
Вакуумный погон	46,57
Вакуумное дизельное топливо	9,04
Гудрон	41,39
Газы разложения	3,00
Итого:	100,00

Производительность  $G_m$  вакуумного блока по сырью 320000 кг/ч; остаточное давление верха колонны  $P_v = 12,5$  кПа = 12500 Па; остаточное давление зоны питания колонны  $P_n = 18,5$  кПа = 18500 Па; расход пара  $G_{нар} = 4500$  кг/ч; пористость насадки  $\varepsilon_l = 0,9$ ; удельная поверхность насадки  $a = 200$  м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>; коэффициент смачиваемости насадки  $\psi = 1$ .

Произведем расчет расходов вакуумного погона, вакуумного дизельного топлива, гудрона и газов разложения:

$$G_{вп} = \frac{46,57}{100} \cdot G_m; \quad (1)$$

$$G_{вп} = \frac{46,57}{100} \cdot 320000 = 149024 \text{ кг/ч.}$$

$$G_{вдт} = \frac{9,04}{100} \cdot G_m; \quad (2)$$

$$G_{вдт} = \frac{9,04}{100} \cdot 320000 = 28928 \text{ кг/ч.}$$

$$G_2 = \frac{41,39}{100} \cdot G_m; \quad (3)$$

$$G_2 = \frac{41,39}{100} \cdot 320000 = 132448 \text{ кг/ч.}$$

$$G_{зр} = \frac{3}{100} \cdot G_m; \quad (4)$$

$$G_{зр} = \frac{3}{100} \cdot 320000 = 9600 \text{ кг/ч.}$$

Результаты расчета заносим в таблицу 2.

Таблица 2 – Материальный баланс колонны

Приход		Расход	
Наименование	Расход, кг/ч	Наименование	Расход, кг/ч
Мазут	320000,00	Газы разложения	9600,00
		Вакуумный погон	149024,00
		Вакуумное дизельное топливо	28928,00
		Гудрон	132448,00
Итого:	320000,00	Итого:	320000,00

### Определение рабочего флегмового числа

Для выполнения данного расчета заменим имеющиеся фракции на простые алканы нормального строения:

1) Фракция н.к. – 350 °С. Данная фракция состоит в основном из паров дизельного топлива, поэтому за температуру начала кипения примем 240 °С.

Найдем среднюю температуру:

$$t_{cp} = \frac{350 + 240}{2} = 295 \text{ °С.}$$

За фракцию примем н-гексадекан ( $C_{16}H_{34}$ ),  $t_{кип} = 287 \text{ °С}$ ,  $M = 226 \text{ кг/кмоль}$ .

2) Фракция 350 – 500 °С. Средняя температура равна:

$$t_{cp} = \frac{350 + 500}{2} = 425 \text{ °С.}$$

За фракцию примем н-гексакозан ( $C_{26}H_{54}$ ),  $t_{кип} = 415 \text{ °С}$ ,  $M = 367 \text{ кг/кмоль}$ .

3) Фракция 500 °С – к.к. За данную фракцию примем н-пентатриаконтан ( $C_{35}H_{72}$ ),  $t_{кип} = 490 \text{ °С}$ ,  $M = 493 \text{ кг/кмоль}$ .

Произведем расчет мольных концентраций на входе и на выходах из первой секции. В качестве низкокипящего (НК) компонента принимаем н-гексакозан ( $C_{26}H_{54}$ ), а в качестве высококипящего (ВК) – н-пентатриаконтан ( $C_{35}H_{72}$ ).

Мольную концентрацию на входе найдем исходя из массовой концентрации, приведенной в таблице 3.

$$X_f = \frac{\frac{(X_{fep} + X_{fen} + X_{f\delta m}) / 100}{M_{HK}}}{\frac{(X_{fep} + X_{fen} + X_{f\delta m}) / 100}{M_{HK}} + 1 - \frac{(X_{f.p.} + X_{f.n.} + X_{f\delta m}) / 100}{M_{BK}}}, \quad (5)$$

где  $X_{fep}$  – выход газов разложения, % масс;

$X_{fm}$  – выход вакуумного погона, % масс;

$X_{f\delta m}$  – выход вакуумного дизельного топлива, % масс;

$M_{HK}, M_{BK}$  – молярные массы низкокипящего и высококипящего компонентов, г/моль.

$$X_f = \frac{\frac{(3 + 46,57 + 9,04) / 100}{367}}{\frac{(3 + 46,57 + 9,04) / 100}{367} + 1 - \frac{(3 + 46,57 + 9,04) / 100}{493}} = 0,442$$

Состав куба и дистиллята определим на основе средних температур кипения фракций по формуле:

$$x = \frac{P_{атм} - P_{BK}}{P_{HK} - P_{BK}}, \quad (6)$$

где  $P_{атм}$  – атмосферное давление, Па;

$P_{HK}, P_{BK}$  – давления насыщенных паров НК и ВК компонентов при температуре фракции, Па, находятся по уравнению Антуана:

$$P = 10^{A - \frac{B}{C+t}} \cdot 132,89, \quad (7)$$

где  $A, B, C$  – параметры уравнения Антуана для каждого компонента;

$t$  – температура фракции, °С.

Параметры уравнения для каждого компонента приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры уравнения Антуана

Наименование	Коэффициенты		
	A	B	C
1	2	3	4
н-гексадекан	7,030	1831,317	154,528

1	2	3	4
н-гексакозан	7,629	2434,747	96,100
н-пентатриаконтан	5,778	1598,230	40,500

Рассчитаем состав куба при  $t = 500$  °С. Для этого произведем расчет давлений НК и ВК компонентов по формуле (7):

$$P_{НК(куб)} = 10^{7,629 - \frac{2434,747}{96,1+500}} \cdot 132,89 = 4,656 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$P_{ВК(куб)} = 10^{5,778 - \frac{1598,230}{40,5+500}} \cdot 132,89 = 8,801 \cdot 10^4 \text{ Па};$$

Состав куба находим по формуле (6):

$$x_{куб} = \frac{10^5 - 8,801 \cdot 10^4}{4,656 \cdot 10^5 - 8,801 \cdot 10^4} = 0,033.$$

Состав дистиллята находим при  $t = 425$  °С.

$$P_{НК(дист.)} = 10^{7,629 - \frac{2434,747}{96,1+425}} \cdot 132,89 = 1,203 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$P_{ВК(дист.)} = 10^{5,778 - \frac{1598,230}{40,5+425}} \cdot 132,89 = 2,938 \cdot 10^4 \text{ Па};$$

$$x_{дист} = \frac{10^5 - 2,938 \cdot 10^4}{1,203 \cdot 10^5 - 2,938 \cdot 10^4} = 0,777.$$

Найдем температуры на выходе методом последовательного приближения по следующей формуле:

$$P_{НК}(t) \cdot x + P_{ВК}(t) \cdot (1 - x) = P_e; \quad (8)$$

Температура на выходе из дистиллята:  $t_{дист.} = 362$  °С;

Температура на выходе из куба:  $t_{куб} = 407$  °С;

Температура на входе:  $t_{вх} = 390$  °С.

Относительную летучесть,  $\alpha$ , находим по формуле:

$$\alpha = \frac{P_{НК}}{P_{ВК}} \quad (9)$$

При  $t_{дист.} = 362$  °С:

					ВКР.171048.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31

$$P_{HK(дист.)} = 10^{7,629 - \frac{2434,747}{96,1+362}} \cdot 132,89 = 2,739 \cdot 10^4 \text{ Па};$$

$$P_{BK(дист.)} = 10^{5,778 - \frac{1598,230}{40,5+362}} \cdot 132,89 = 8,526 \cdot 10^3 \text{ Па};$$

$$\alpha_{\partial} = \frac{2,739 \cdot 10^4}{8,256 \cdot 10^3} = 3,318$$

При  $t_{куб} = 407 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$P_{HK(куб)} = 10^{7,629 - \frac{2434,747}{96,1+407}} \cdot 132,89 = 8,185 \cdot 10^4 \text{ Па};$$

$$P_{BK(куб)} = 10^{5,778 - \frac{1598,230}{40,5+407}} \cdot 132,89 = 2,138 \cdot 10^4 \text{ Па};$$

$$\alpha_{к} = \frac{8,185 \cdot 10^4}{2,138 \cdot 10^4} = 3,828$$

Найдем среднюю относительную летучесть:

$$\alpha = \frac{\alpha_{\partial} + \alpha_{к}}{2}, \tag{10}$$

$$\alpha = \frac{3,318 + 3,828}{2} = 3,573$$

Строим кривую равновесия по формуле:

$$y = \frac{\alpha \cdot x}{1 + (\alpha - 1) \cdot x}; \tag{11}$$

Кривая равновесия представлена на рисунке 6.

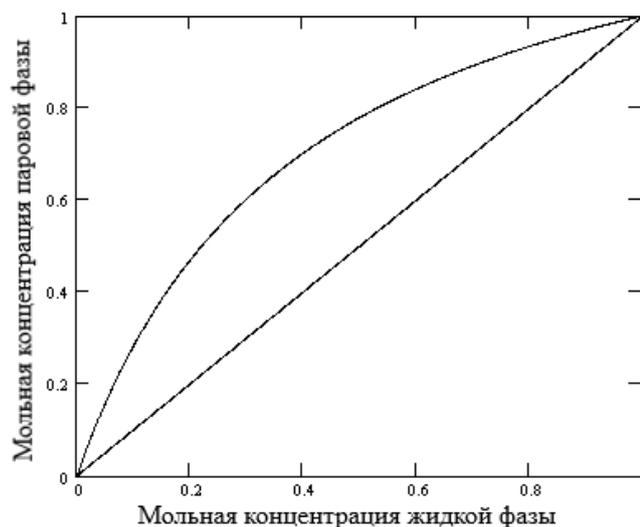


Рисунок 6 – Кривая равновесия

Состав пара, уходящего с питательной тарелки, равен  $y_F = 0,738$ .

Рассчитаем минимальное флегмовое число:

$$R_{\min} = \frac{x_{\text{дист}} - y_F}{y_F - x_f};$$

$$R_{\min} = \frac{0,777 - 0,738}{0,738 - 0,442} = 0,466$$

Оптимальное (рабочее) флегмовое число находим исходя из критерия оптимальности:

$$N_{TT} \cdot (R + 1), \quad (12)$$

$$\text{где } R = \beta \cdot R_{\min} \quad (13)$$

Принимаем, что коэффициент избытка флегмы  $\beta_{\text{опт}} = 3,2$ .

Отсюда по формуле (13) найдем рабочее флегмовое число:

$$R_{\text{опт}} = 3,2 \cdot 0,466 = 1,491$$

*Расчет физико-химических свойств смеси*

Рассчитаем средние концентрации жидкости в верхней и нижней частях:

$$x_H = \frac{x_f + x_{\text{куб}}}{2}; \quad (14)$$

$$x_H = \frac{0,442 + 0,033}{2} = 0,238 \text{ кмоль}$$

$$x_B = \frac{x_f + x_{\text{дист}}}{2}; \quad (15)$$

$$x_B = \frac{0,442 + 0,777}{2} = 0,609 \text{ кмоль}$$

Рассчитаем средние концентрации пара:

$$y_{\text{куб}} = x_{\text{куб}}; y_{\text{дист}} = x_{\text{дист}}$$

$$y_H = \frac{y_F + y_{\text{куб}}}{2}; \quad (16)$$

$$y_H = \frac{0,738 + 0,033}{2} = 0,386 \text{ кмоль}$$

$$y_B = \frac{y_F + y_{дист.}}{2}; \quad (17)$$

$$y_B = \frac{0,738 + 0,777}{2} = 0,758 \text{ кмоль}$$

По формуле (8) получим средние температуры верха и низа колонны:

$$t_n = 387 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_e = 368 \text{ }^\circ\text{C}$$

Средние молекулярные массы пара найдем по формуле:

$$Mn = y_x \cdot M_{HK} + (1 - y_x) \cdot M_{BK}, \quad (18)$$

где  $y_x$  – средние концентрации пара низа и верха, соответственно, кмоль;

$M_{HK}$ ,  $M_{BK}$  – молярные массы низкокипящего и высококипящего компонентов, кг/кмоль.

$$M_{n_n} = 0,386 \cdot 367 + (1 - 0,386) \cdot 493 = 444,364 \text{ кг/кмоль};$$

$$M_{n_e} = 0,758 \cdot 367 + (1 - 0,758) \cdot 493 = 397,492 \text{ кг/кмоль}.$$

Аналогично по формуле (18) найдем средние молекулярные массы жидкости:

$$M_{ж_n} = 0,018 \cdot 367 + (1 - 0,018) \cdot 493 = 490,732 \text{ кг/кмоль};$$

$$M_{ж_e} = 0,390 \cdot 367 + (1 - 0,390) \cdot 493 = 443,860 \text{ кг/кмоль}.$$

Средние плотности пара низа и верха:

$$\rho_n = \frac{M_n \cdot P_v}{8314 \cdot (t + 273)} \quad (19)$$

$$\rho_{n_n} = \frac{444,364 \cdot 12500}{8314 \cdot (387 + 273)} = 1,012 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{n_e} = \frac{397,492 \cdot 12500}{8314 \cdot (368 + 273)} = 0,932 \text{ кг/м}^3.$$

Рассчитаем средние массовые доли:

$$X_n = \frac{x_n \cdot M_{HK}}{M_{ж_n}} \quad (20)$$

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>	Лист
						34
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



$$\mu_{ж_г} = 10^{0,322 \cdot \lg(5,91 \cdot 10^{-4}) + (1 - 0,322) \cdot \lg(2,87 \cdot 10^{-4})} = 3,622 \cdot 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с.}$$

### Расчет скорости пара и диаметра колонны

Находим количество поднимающегося по колонне пара. Примем, что расход пара по всей колонне является величиной постоянной и определяется по следующей формуле:

$$G_n = (G_{вн} + G_{зп} + G_{вдм}) \cdot \frac{(R_{онм} + 1)}{3600} \quad (23)$$

$$G_n = (149024 + 9600 + 28928) \cdot \frac{(1,490 + 1)}{3600} = 77,626 \text{ кг/с.}$$

Рассчитаем расход жидкости в верхней и нижней частях колонны:

$$L_г = (G_{вн} + G_{зп} + G_{вдм}) \cdot \frac{R_{онм}}{3600} \quad (24)$$

$$L_г = (149024 + 9600 + 28928) \cdot \frac{1,490}{3600} = 25,528 \text{ кг/с.}$$

$$L_n = \frac{(G_{вн} + G_{зп} + G_{вдм}) \cdot R_{онм} + G_m}{3600} \quad (25)$$

$$L_n = \frac{(149024 + 9600 + 28928) \cdot 1,490 + 320000}{3600} = 114,417 \text{ кг/с.}$$

Найдем предельную скорость пара в нижней части колонны по формуле:

$$\omega_{н.н} = \sqrt{\frac{1,2 \cdot e^{\left(-4 \cdot \left(\frac{L_n}{G_n}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\rho_{нн}}{\rho_{жн}}\right)^{0,125}\right)} \cdot (g \cdot \varepsilon_1^3 \cdot \rho_{жн})}{a \cdot \rho_{нн} \cdot \mu_{жн}^{0,16}}}, \quad (26)$$

где  $\varepsilon_1$  – пористость насадки;

$a$  – удельная поверхность насадки;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения.

Таким образом, по формуле (26) рассчитаем предельную скорость:

$$\omega_{н.н} = \sqrt{\frac{1,2 \cdot e^{\left(-4 \cdot \left(\frac{114,417}{77,626}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{1,012}{571,133}\right)^{0,125}\right)} \cdot (9,81 \cdot 0,9^3 \cdot 571,133)}{200 \cdot 1,012 \cdot 0,0002137^{0,16}}} = 4,720 \text{ м/с.}$$

									Лист
									36
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					



где  $h_3$  – высота насадки, эквивалентная теоретической тарелке (ВЭТТ), м;

$N_T$  – число теоретических тарелок.

Число теоретических тарелок определяем графическим методом  $N_T = 8$ .

ВЭТТ определим по формуле:

$$h_3 = 200 \cdot \left( \frac{\varepsilon}{\alpha} \right)^{1,2} \cdot \frac{1}{\omega^{0,4}}; \quad (31)$$

$$h_{3в} = 200 \cdot \left( \frac{0,9}{200} \right)^{1,2} \cdot \frac{1}{2,165^{0,4}} = 0,497 \text{ м};$$

$$h_{3н} = 200 \cdot \left( \frac{0,9}{200} \right)^{1,2} \cdot \frac{1}{3,230^{0,4}} = 0,191 \text{ м}.$$

По формуле (30) получим:

$$H_{н.в} = 0,497 \cdot 4 = 1,986 \text{ м};$$

$$H_{н.н} = 0,191 \cdot 4 = 0,764 \text{ м}.$$

Высоту насадки для всей колонны определим как сумму высот насадки верхней и нижней части колонны:

$$H_n = 1,986 + 0,764 = 2,750 \text{ м}.$$

Общую высоту колонны рассчитаем по формуле:

$$H_u = Z \cdot n + n \cdot h_p + Z_в + Z_n, \quad (32)$$

где  $Z$  – высота насадки в одной секции;

$n$  – число секций;

$h_p$  – высота промежутков между секциями насадки, в которых устанавливают распределители жидкости;

$Z_в$  и  $Z_n$  – соответственно высота сепарационного пространства над насадкой и расстояние между днищем колонны и насадкой.

Значения  $Z_в$  и  $Z_n$  выбирают в соответствии с рекомендациями:  $Z_в = 1500$  мм;  $Z_n = 2500$  мм.

Тогда:

					ВКР.171048.180301.ПЗ	Лист
						38
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$H_u = 2,750 \cdot 4 + 4 \cdot 2,0 + 1,5 + 2,5 = 23 \text{ м.}$$

Рассчитаем плотность орошения насадки:

$$U = \frac{L}{\rho_{жс} \cdot 0,785 \cdot D_k^2} \quad (33)$$

$$U_n = \frac{114,417}{571,133 \cdot 0,785 \cdot 5,5^2} = 0,008 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$U_с = \frac{25,528}{578,760 \cdot 0,785 \cdot 8^2} = 0,001 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Эквивалентный диаметр насадки  $d_э = 0,018 \text{ м.}$

Рассчитаем критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega_p \cdot d_э \cdot \rho_n}{\varepsilon_1 \cdot \mu_{ж}} \quad (34)$$

Для верхней части:

$$Re_с = \frac{2,165 \cdot 0,018 \cdot 0,932}{0,9 \cdot 3,622 \cdot 10^{-4}} = 2308;$$

для нижней части:

$$Re_n = \frac{3,230 \cdot 0,018 \cdot 1,012}{0,9 \cdot 2,137 \cdot 10^{-4}} = 2172$$

Произведем расчет коэффициент сопротивления сухой насадки:

$$\lambda = \frac{18,5}{Re^{0,6}} \quad (35)$$

$$\lambda_с = \frac{18,5}{2308^{0,6}} = 0,178;$$

$$\lambda_n = \frac{18,5}{2172^{0,6}} = 0,184$$

Рассчитаем гидравлическое сопротивление сухой неорошаемой насадки:

$$\Delta P_c = \frac{\lambda \cdot H_{сл}}{d_э} \cdot \frac{\omega_p^2 \cdot \rho_n}{2\varepsilon_1^2}, \quad (36)$$

где  $H_{сл}$  – высота слоя насадки.

$$\Delta P_{c.в} = \frac{0,178 \cdot 2,750}{0,018} \cdot \frac{2,165^2 \cdot 0,932}{2 \cdot 0,9^2} = 1,484 \text{ Па};$$

$$\Delta P_{c.н} = \frac{0,184 \cdot 2,750}{0,018} \cdot \frac{3,230^2 \cdot 1,012}{2 \cdot 0,9^2} = 22,199 \text{ Па}.$$

Найдем гидравлическое сопротивление насадки:

$$\Delta P = 10^{169U} \cdot \Delta P_c \quad (37)$$

$$\Delta P_{\epsilon} = 10^{169 \cdot 0,001} \cdot 1,484 = 2,190 \text{ Па};$$

$$\Delta P_{н} = 10^{169 \cdot 0,008} \cdot 22,199 = 48,349 \text{ Па}.$$

Общее гидравлическое сопротивление будет равно:

$$\Delta P = \Delta P_{\epsilon} + \Delta P_{н}$$

$$\Delta P = 2,190 + 48,349 = 50,539 \text{ Па}.$$

В результате расчета были определены следующие характеристики: диаметр колонны верхней части  $D_{\epsilon} = 8$  м, нижней части  $D_{\epsilon} = 5,5$  м; высота колонны  $H_{\nu} = 23$  м; гидравлическое сопротивление насадки  $\Delta P = 50,539$  Па.

#### 2.4 Тепловой баланс колонны

Рассчитаем приход.

Паровая фаза:

1) Фракция н.к. – 350 °С.

$$I_R = 4,19 \cdot (50,2 + 0,109 \cdot t_1 + 0,00014 \cdot t_1^2) \cdot (4 - d_{15}) - 73,8 \quad (38)$$

$$I_{\text{вдт}} = 4,19 \cdot (50,2 + 0,109 \cdot 420 + 0,00014 \cdot 420^2) \cdot (4 - 0,855) - 73,8 =$$

$$= 1,516 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_R = I_R \cdot G_R \quad (39)$$

$$Q_{\text{вдт}} = 1,516 \cdot 10^3 \cdot 28928 = 43854848 \text{ кДж/ч}.$$

Дальнейший расчет производим аналогично по формулам (38) и (39).

$$I_{\text{сп}} = 4,19 \cdot (50,2 + 0,109 \cdot 420 + 0,00014 \cdot 420^2) \cdot (4 - 0,855) - 73,8 =$$

$$= 1,516 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_{\text{сп}} = 1,516 \cdot 10^3 \cdot 9600 = 14553600 \text{ кДж/ч}.$$

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>	Лист
						40
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2) Фракция 350 – 500 °С.

$$I_{вн} = 4,19 \cdot (50,2 + 0,109 \cdot 420 + 0,00014 \cdot 420^2) \cdot (4 - 0,917) - 73,8 =$$
$$= 1,485 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_{вн} = 1,485 \cdot 10^3 \cdot 149024 = 221300640 \text{ кДж/ч.}$$

3) Водяной пар ( $t = 420$  °С).

$$I_{вод.пар} = 3,271 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_{вод.пар} = 3,271 \cdot 10^3 \cdot 4500 = 14719500 \text{ кДж/ч.}$$

Жидкая фаза:

Фракция 500 °С – к.к.

$$I_2 = 4,19 \cdot (0,403 \cdot 420 + 0,000405 \cdot 420^2) \cdot \frac{1}{\sqrt{1,077}} = 972 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_2 = 972 \cdot 132448 = 128739456 \text{ кДж/ч.}$$

Расход:

Паровая фаза:

$$I_{вот} = 4,19 \cdot (50,2 + 0,109 \cdot 385 + 0,00014 \cdot 385^2) \cdot (4 - 0,855) - 73,8 =$$
$$= 1,414 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_{вот} = 1,414 \cdot 10^3 \cdot 28928 = 40904192 \text{ кДж/ч.}$$

$$I_{зр} = 4,19 \cdot (50,2 + 0,109 \cdot 385 + 0,00014 \cdot 385^2) \cdot (4 - 0,855) - 73,8 =$$
$$= 1,414 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_{зр} = 1,414 \cdot 10^3 \cdot 9600 = 13574400 \text{ кДж/ч.}$$

$$I_{вн} = 4,19 \cdot (50,2 + 0,109 \cdot 385 + 0,00014 \cdot 385^2) \cdot (4 - 0,917) - 73,8 =$$
$$= 1,385 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_{вн} = 1,385 \cdot 10^3 \cdot 149024 = 206398240 \text{ кДж/ч.}$$

$$I_{вод.пар} = 3,242 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_{вод.пар} = 3,242 \cdot 10^3 \cdot 4500 = 14589000 \text{ кДж/ч.}$$

					ВКР.171048.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		41

Жидкая фаза:

$$I_2 = 4,19 \cdot (0,403 \cdot 400 + 0,000405 \cdot 400^2) \cdot \frac{1}{\sqrt{1,077}} = 912 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_2 = 912 \cdot 132448 = 120792576 \text{ кДж/ч.}$$

Тепловой баланс представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Тепловой баланс колонны

Приход					Расход				
Наименование	t, °C	кг/ч	кДж/кг	кДж/ч	Наименование	t, °C	кг/ч	кДж/кг	кДж/ч
Газы разложения	420	9600	1516	14553600	Газы разложения	385	9600	1414	13574400
Вакуумный погон	420	149024	1485	221300640	Вакуумный погон	385	149024	1385	206398240
Вакуумное дизельное топливо	420	28928	1516	43854848	Вакуумное дизельное топливо	385	28928	1414	40904192
Гудрон	420	132448	972	128739456	Водяной пар	385	4500	3242	14589000
Водяной пар	480	4500	3271	14719500	Гудрон	400	132448	912	120792576
Итого:		324500		423168044	Итого:		324500		396258408

Избыток тепла составляет:

$$\Delta Q = 423168044 - 396258408 = 26909636 \text{ кДж/ч.}$$

## 2.5 Модернизация вакуумной колонны

Модернизация вакуумной колонны заключается в замене контактного устройства – насадки «Вакупак» на насадку «MellapakPlus» с более низким гидравлическим сопротивлением, что позволит увеличить отбор вакуумного газойля.

Насадка «MellapakPlus» – высокопроизводительная регулярная насадка (как правило, примерно на 30 % более производительна, чем сопоставимая традиционная насадка), отличающаяся пониженным гидравлическим сопротивлением. Данная насадка может быть использована в процессах, проводимых как под глубоким вакуумом, так и при высоком давлении. Новая геометрия профиля включает в себя запатентованную модификацию нижнего и верхнего конца каждого элемента насадки. Угол гофра по отношению к верти-

кали постепенно уменьшается до нуля на обоих концах каждого листа. Это конструктивное изменение угла гофра вызывает плавное и устойчивое изменение направления потока; оно больше не является резким. Результатом является уменьшение перепада давления и силы сдвига между газовой и жидкой фазой, а также уменьшение скорости газа [24].

Для обоснования данного способа модернизации вакуумной колонны произведем повторный расчет [25].

Исходные данные:

Пористость насадки  $\varepsilon_l = 0,95$ ; удельная поверхность насадки  $a = 170 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ; плотность газа верха и низа колонны  $\rho_{n_n} = 1,012 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $\rho_{n_e} = 0,932 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; средние вязкости жидкости верха и низа  $\mu_{ж_n} = 2,137 \cdot 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ,  $\mu_{ж_e} = 3,622 \cdot 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ; средние плотности жидкости верха и низа  $\rho_{ж_n} = 571,133 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $\rho_{ж_e} = 578,760 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; содержание легколетучего компонента в кубовом остатке  $x_{куб} = 0,033$ ; содержание легколетучего компонента в дистилляте  $x_{дист} = 0,777$ ; содержание легколетучего компонента в зоне питания  $x_f = 0,444$ ; расход питания  $G_f = 8,100 \text{ кг}/\text{с}$ .

Рассчитаем расход кубового остатка:

$$G_{куб} = G_f \cdot \frac{x_{дист} - x_f}{x_{дист} - x_{куб}}; \quad (40)$$

$$G_{куб} = 8,100 \cdot \frac{0,777 - 0,444}{0,777 - 0,033} = 6,438 \text{ кг}/\text{с}.$$

Расход дистиллята:

$$G_{дист} = G_f - G_{куб}; \quad (41)$$

$$G_{дист} = 8,100 - 6,438 = 1,662 \text{ кг}/\text{с}.$$

Средний массовый поток пара в верхней части колонны находится по формуле:

$$G_g = G_{дист} \cdot \frac{(R+1) \cdot 31,358}{32}; \quad (42)$$

$$G_g = 1,662 \cdot \frac{(1,490+1) \cdot 31,358}{32} = 4,055 \text{ кг/с.}$$

Средний массовый поток пара в нижней части колонны:

$$G_n = G_{дист} \cdot \frac{(R+1) \cdot 30,728}{32}; \quad (43)$$

$$G_n = 1,662 \cdot \frac{(1,490+1) \cdot 30,728}{32} = 3,974 \text{ кг/с.}$$

Средняя массовая нагрузка по жидкости в верхней части колонны:

$$L_g = G_{дист} \cdot \frac{R \cdot 31,358}{32}; \quad (44)$$

$$L_g = 1,662 \cdot \frac{1,490 \cdot 31,358}{32} = 2,427 \text{ кг/с.}$$

Средняя массовая нагрузка по жидкости в нижней части колонны:

$$L_m = G_{дист} \cdot \frac{1,490 \cdot 30,326}{32} + G_f \cdot \frac{30,326}{30,52}; \quad (45)$$

$$L_m = 1,662 \cdot \frac{1,490 \cdot 30,326}{32} + 8,100 \cdot \frac{30,326}{30,52} = 10,395 \text{ кг/с.}$$

Предельная скорость пара в верхней части колонны по формуле (29)

равна:

$$\omega_{n.g} = \sqrt{\frac{1,2 \cdot e^{\left(-4 \left(\frac{2,427}{4,055}\right)^{0,25} \left(\frac{0,932}{578,760}\right)^{0,125}\right)} \cdot (9,81 \cdot 0,95^3 \cdot 578,760)}{170 \cdot 0,932 \cdot 0,0003622^{0,16}}} = 3,309 \text{ м/с.}$$

Аналогично в нижней части колонны:

$$\omega_{n.n} = \sqrt{\frac{1,2 \cdot e^{\left(-4 \left(\frac{10,395}{3,974}\right)^{0,25} \left(\frac{1,012}{571,133}\right)^{0,125}\right)} \cdot (9,81 \cdot 0,95^3 \cdot 571,133)}{170 \cdot 1,012 \cdot 0,0002137^{0,16}}} = 6,267 \text{ м/с.}$$

Примем рабочую скорость на 30 % ниже предельной, тогда:

$$\omega_{n.g1} = 0,7 \cdot 3,309 = 2,316 \text{ м/с.}$$

										Лист
										44
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ВКР.171048.180301.ПЗ					

$$\omega_{n,н1} = 0,7 \cdot 6,267 = 4,387 \text{ м/с};$$

По принятой рабочей скорости рассчитаем диаметр колонны по (31):  
для верхней части:

$$D_в = \sqrt{\frac{4 \cdot 77,626}{3,14 \cdot 2,316 \cdot 0,932}} = 6,769 \text{ м};$$

для нижней:

$$D_н = \sqrt{\frac{4 \cdot 77,626}{3,14 \cdot 5,077 \cdot 1,012}} = 4,387 \text{ м};$$

Примем диаметр колонны по [23] верхней части равным 7000 мм; нижней части – 4500 мм. Тогда определим действительные рабочие скорости по формуле (32):

$$\omega_{рн} = \frac{4 \cdot 77,626}{3,14 \cdot 4,5^2 \cdot 1,012} = 4,825 \text{ м/с};$$

$$\omega_{рв} = \frac{4 \cdot 77,626}{3,14 \cdot 7^2 \cdot 0,932} = 2,219 \text{ м/с}.$$

Произведем расчет гидравлического сопротивления насадки

Рассчитаем плотность орошения по формуле (33):

$$U_н = \frac{10,395}{571,133 \cdot 0,785 \cdot 4,5^2} = 0,0011 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$U_в = \frac{2,427}{578,760 \cdot 0,785 \cdot 7^2} = 0,0001 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Эквивалентный диаметр насадки  $d_э = 0,022 \text{ м}$ .

Рассчитаем критерий Рейнольдса по формуле (34):

Для верхней части:

$$Re_в = \frac{2,219 \cdot 0,022 \cdot 0,932}{0,95 \cdot 3,622 \cdot 10^{-4}} = 2228;$$

для нижней части:

$$Re_н = \frac{4,825 \cdot 0,022 \cdot 1,012}{0,95 \cdot 2,137 \cdot 10^{-4}} = 2118$$

										Лист
										45
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

Произведем расчет коэффициента сопротивления сухой насадки по формуле (35):

$$\lambda_g = \frac{18,5}{2228^{0,6}} = 0,181$$

$$\lambda_n = \frac{18,5}{2118^{0,6}} = 0,189$$

Рассчитаем гидравлическое сопротивление сухой неорошаемой насадки по формуле (36):

$$\Delta P_{c.g} = \frac{0,181 \cdot 2,750}{0,018} \cdot \frac{2,219^2 \cdot 0,932}{2 \cdot 0,95^2} = 1,640 \text{ Па};$$

$$\Delta P_{c.n} = \frac{0,189 \cdot 2,750}{0,018} \cdot \frac{4,825^2 \cdot 1,012}{2 \cdot 0,95^2} = 20,095 \text{ Па}.$$

Найдем гидравлическое сопротивление насадки по формуле (37):

$$\Delta P_g = 10^{169 \cdot 0,0001} \cdot 1,640 = 1,705 \text{ Па};$$

$$\Delta P_n = 10^{169 \cdot 0,0011} \cdot 20,095 = 23,479 \text{ Па}.$$

Тогда общее гидравлическое сопротивление будет равно:

$$\Delta P = 1,705 + 23,479 = 25,184 \text{ Па}.$$

В результате перерасчета были определены следующие характеристики: диаметр колонны верхней части  $D_g = 7$  м, нижней части – 4,5 м; гидравлическое сопротивление насадки  $\Delta P = 25,184$  Па.

Таким образом, гидравлическое сопротивление насадки «MellapakPlus» в два раза меньше, чем насадки «Вакупак». Диаметр концентрационной и отгонной части вакуумной колонны уменьшился на один метр.

### 3 МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВАКУУМНОЙ КОЛОННЫ

Исходные данные: внутренний диаметр колонны  $D_в = 7000$  мм; высота цилиндрической части аппарата  $H_ц = 23000$  мм; рабочая температура верха колонны  $t_в = 120$  °С; низа  $t_н = 387$  °С.

Учитывая максимальную рабочую температуру в колонне, среднюю коррозионность среды за материал вакуумной колонны принимаем углеродистую сталь обыкновенного качества марки Ст.3сп, имеющую следующие механические характеристики [26]:

$$\sigma_T = 210 - 250 \text{ МПа}; \sigma_B = 380 - 490 \text{ МПа.}$$

Цилиндрическая часть вакуумной колонны представляет собой тонкостенный цилиндр, толщина стенки которого находится по формуле:

$$S = \frac{P_p \cdot D_B}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - P_p} + C, \quad (46)$$

где  $S$  – расчетная толщина, м;

$P_p$  – расчетное избыточное давление, МПа;

$D_в$  – внутренний диаметр аппарата, м;

$[\sigma]$  – допускаемое напряжение на растяжение материала,  $[\sigma] = 107,1$  МПа;

$\varphi$  – коэффициент прочности продольного сварного шва,  $\varphi = 1,0$ ;

$C$  – прибавка на коррозию, величину которой принимают в зависимости от коррозионных свойств среды в пределах 1 – 6 мм.

Избыточное давление:

$$P_u = 0,125 - 0,1 = 0,025 \text{ МПа.}$$

Расчетное давление:

$$1) P_p = 0,125 + 0,2 = 0,325 \text{ МПа;}$$

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Киришина М.А.</i>			<i>Модернизация вакуумной колонны ЭЛОУ-АВТ</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Лескова С.А.</i>				У	47	68
<i>Н. контр.</i>		<i>Родина Т.А.</i>				<i>АмГУ ИФФ гр. 718-об</i>		
<i>Зав. каф.</i>		<i>Гужель Ю.А.</i>						

$$2) P_p = 0,025 + 0,083 = 0,108 \text{ МПа.}$$

За расчетное давление принимаем большую величину, то есть  $P_p = 0,325 \text{ МПа}$ .

Допускаемое напряжение находим по формуле:

$$[\sigma] = \eta \cdot \sigma^*,$$

где  $\eta$  – поправочный коэффициент,  $\eta = 0,9$  для аппаратов, которые содержат взрывоопасную или токсичную среду;

$\sigma^*$  – нормативное допускаемое напряжение.

$$\sigma^* = 380 / 2,6 = 146,15 \text{ МПа;}$$

$$\sigma^* = 210 / 1,5 = 140 \text{ МПа.}$$

Учитывая коэффициенты:

$$\sigma^* = 1 \cdot 146,15 = 146,15 \text{ МПа;}$$

$$\sigma^* = 0,85 \cdot 140 = 119 \text{ МПа.}$$

Для дальнейшего расчета принимаем наименьшее значение  $\sigma^* = 119 \text{ МПа}$ , тогда допускаемое напряжение будет равно:

$$[\sigma] = 0,9 \cdot 119 = 107,1 \text{ МПа.}$$

Учитывая, что продольные и поперечные швы обечаек стальных аппаратов должны быть только стыковыми, и предполагая двухстороннюю сварку, выполненную автоматически, принимаем  $\varphi = 1$ .

Величину прибавки на коррозию принимаем  $C = 3 \text{ мм}$ .

Рассчитаем толщину стенки колонны:

$$S = \frac{0,325 \cdot 7}{2 \cdot 107,1 \cdot 1 - 0,325} + 0,003 = 0,020 \text{ м} = 20 \text{ мм.}$$

Учитывая, что аппарат испытывает дополнительные нагрузки, такие как ветровая, вес внутренних устройств, вес площадок обслуживания и т.д., толщина обечайки в нижней части аппарата должна быть увеличена. Эта добавка  $\Delta S$  принимается в зависимости от высоты колонны.

В данном случае высота колонны равна 23 м, поэтому принимаем:

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		48

$\Delta S = 2$  мм. Таким образом, толщина обечайки внизу колонны будет равна:

$S_n = 23 + 2 = 25$  мм. Такую же толщину обечайки принимаем и для верха колонны.

Для цилиндрических аппаратов применяют эллиптические днища и крышки. Толщина стенки эллиптического днища находится по следующей формуле:

$$S = \frac{P_p \cdot R}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - 0,5 \cdot P_p} + C \quad (47)$$

$$S = \frac{0,325 \cdot 7}{2 \cdot 107,1 \cdot 1 - 0,5 \cdot 0,325} + 0,003 = 0,020 \text{ м} = 20 \text{ мм.}$$

Для стандартных днищ толщина стенки примерно равна толщине стенки обечайки. Таким образом, толщину стенки верхнего и нижнего днища принимаем 25 мм. Для данной толщины стенки высоту борта принимаем 70 мм.

Найдем напряжение в нижней части колонны:

$$\sigma_n = \frac{P_G \cdot (D_e + (S - C))}{2 \cdot \varphi \cdot (S - C)} \leq 0,9 \sigma_T, \quad (48)$$

где  $P_G$  – гидравлическое давление в нижней части колонны, МПа:

$$P_G = P_{np} + H \cdot 10^{-2}, \quad (49)$$

где  $P_{np}$  – пробное давление, МПа;

$H$  – высота столба воды в аппарате, м.

Давление в верхней точке аппарата, находящегося в рабочем положении, должно быть равно пробному давлению.

$$P_{np} = 1,5 \cdot P_p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} > 0,2, \quad (50)$$

где  $[\sigma]_{20}$  – допускаемое напряжение при нормальной температуре (20 °С), МПа;

$[\sigma]_t$  – допускаемое напряжение при расчётной температуре, МПа.

$$P_{np} = 1,5 \cdot 0,325 \cdot \frac{140}{107,1} = 0,637 \text{ МПа.}$$

					ВКР.171048.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		49

Тогда:

$$P_T = 0,637 + 19,34 \cdot 10^{-2} = 0,830 \text{ МПа};$$

$$\sigma_n = \frac{0,83 \cdot (7 + (0,025 - 0,003))}{2 \cdot 1 \cdot (0,025 - 0,003)} = 187,915 \text{ МПа};$$

$$0,9\sigma_T = 0,9 \cdot 210 = 189 \text{ МПа};$$

$\sigma_n < 0,9\sigma_T$ , т.е., полученная величина стенки  $S = 25$  мм обеспечивает прочность днища при гидравлическом испытании.

Найдем напряжение в нижнем днище:

$$\sigma_n = \frac{0,83 \cdot (7 + 0,5 \cdot (0,025 - 0,003))}{2 \cdot 1 \cdot (0,025 - 0,003)} = 187,415 \text{ МПа};$$

$\sigma_n < 0,9\sigma_T$ , делаем вывод, что прочность днища обеспечена при гидравлическом испытании.

### 3.1 Расчет аппарата на действие ветровых сил

Аппараты, установленные на открытой площадке, подвергаются ветровой нагрузке. Опора представляет собой обечайку, снабженную фундаментным кольцом из полосовой листовой стали. Кольцо крепится к фундаменту болтами. Принимаем высоту опоры  $H_{оп} = 2$  м.

Толщину обечайки опоры принимаем равной толщине стенки нижнего днища, т.е. равной 25 мм.

Размеры фундаментного кольца равны:

$$D_1 = (0,9 \div 0,96) \cdot D_n; \tag{51}$$

$$D_2 = (1,08 \div 1,18) \cdot D_n, \tag{52}$$

где  $D_n$  – наружный диаметр аппарата.

По формулам (51) и (52):

$$D_1 = 0,93 \cdot 7,4 = 6,882 \text{ м};$$

$$D_2 = 1,12 \cdot 7,4 = 8,288 \text{ м}.$$

Данные размеры поверхности опорного кольца должны обеспечивать прочность фундамента. Для этого необходимо, чтобы напряжение на опорной

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		50

поверхности фундаментного кольца было меньше допуссаемого напряжения на сжатие материала фундамента. Толщина фундаментного кольца не рассчитывается: ее, как правило, принимают не менее 12 мм.

Высоту опорных лап принимаем в пределах:

$$0,015H_1 \geq h \geq 0,01H_1 + 50 \text{ мм},$$

где  $H_1$  – высота аппарата, включая высоту опорной обечайки, мм:

$$H_1 = H_u + H_{on} + H_{om}, \quad (53)$$

где  $H_u$  – высота цилиндрической части аппарата;

$H_{om}$  – высота отгонной части аппарата;

$H_{on}$  – высота опорной обечайки.

$$H_1 = 23000 + 1400 + 4100 = 28500 \text{ мм};$$

$$h = 0,015 \cdot 28500 = 428 \text{ мм}.$$

Количество опорных лап равно числу фундаментных болтов, диаметр и число которых выбирается в зависимости от общей высоты  $H_1$  в диаметре аппарата. В данном случае  $H_1 = 28,5$  м,  $D = 7$  м, примем предварительно диаметр фундаментных болтов – 30 мм и число – 8.

Расчет аппарата на действие ветровых и весовых нагрузок производим при наиболее неблагоприятных сочетаниях нагрузок. Аппарат по высоте условно разбит на произвольные участки. Высоту каждого участка принимаем не более 10 м. Таким образом:

$$h'_1 = 10 \text{ м}; h'_2 = 10 \text{ м}; h'_3 = 8,5 \text{ м}.$$

$$h_1 = \frac{h'_1}{2} = \frac{10}{2} = 5 \text{ м};$$

$$h_2 = h_1 + \frac{h'_2}{2} = 5 + \frac{10}{2} = 10 \text{ м};$$

$$h_3 = h_1 + h_2 + \frac{h'_3}{2} = 5 + 10 + \frac{8,5}{2} = 19,25 \text{ м};$$

Расчетную ветровую нагрузку  $P_i$  на каждый участок находим по формуле:

					ВКР.171048.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		51

$$P_i = K \cdot q_i \cdot \beta_i \cdot S_i, \quad (54)$$

где  $K$  – аэродинамический коэффициент, равный 0,6;

$q_i$  – нормативный скоростной напор ветра;

$\beta_i$  – коэффициент увлечения скоростного напора;

$S_i$  – площадь наибольшего осевого сечения участка;

$h_i$  – высота участка.

Найдем нормативный скоростной напор ветра:

$$q_i = q_0 \cdot Q_i, \quad (55)$$

где  $q_0$  – нормативный скоростной напор ветра;

$$Q_i = \left( \frac{x_i}{10} \right)^{0.16} - \text{коэффициент, учитывающий возрастные скоростного}$$

напора с увеличением высоты  $x_i$  над поверхностью земли.

Рассчитаем коэффициент увеличения скоростного напора:

$$\beta_i = 1 + \xi \cdot m_i, \quad (56)$$

где  $\xi$  – коэффициент динамичности;

$m_i$  – коэффициент пульсации скоростного напора ветра.

Период собственных колебаний аппарата находится по формуле:

$$T = 1,79H \sqrt{\frac{Q_2}{g} \left( \frac{H}{EJ} + 4\varphi_0 \right)}, \quad (57)$$

где  $H$  – полная высота аппарата с опорой, м;

$Q_2$  – максимальный вес аппарата, МН;

$E$  – модуль продольной упругости материала корпуса аппарата, МПа;

$J$  – экваториальный момент инерции площади поперечного сечения стенки корпуса аппарата относительно центральной оси, м<sup>4</sup>;

$\varphi_0$  – угол поворота опорного сечения фундамента под действием единичного момента, (МН·м)<sup>-4</sup>:

$$\varphi_0 = \frac{1}{C_\varphi J_\varphi}, \quad (58)$$

где  $C_\varphi$  – коэффициент упругого неравномерного сжатия грунта;

					ВКР.171048.180301.ПЗ	Лист
						52
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$J_\phi$  – экваториальный момент инерции площади подошвы относительно центральной оси, м<sup>4</sup>:

$$J_\phi = 0,065 \cdot D_2^4, \quad (59)$$

где  $D_2$  – наружный диаметр фундаментного кольца аппарата, м.

Максимальный вес аппарата определяется по формуле:

$$Q_2 = Q_1 + Q_n + Q_{пл} + Q_u + Q_B, \quad (60)$$

где  $Q_1$  – минимальный вес аппарата;

$Q_n$  – вес внутренних устройств;

$Q_{пл}$  – вес площадок обслуживания;

$Q_u$  – вес теплоизоляции аппарата;

$Q_B$  – вес воды в аппарате при гидравлических испытаниях.

Минимальный вес аппарата равен:

$$Q_1 = Q_u + Q_\partial + Q_{он} + Q_{фк} + Q_l + Q_{лаз} + Q_{ш}, \quad (61)$$

где  $Q_u$  – вес цилиндрической части аппарата;

$Q_\partial$  – вес днищ;

$Q_{он}$  – вес обечайки опоры;

$Q_{фк}$  – вес фундаментного кольца;

$Q_l$  – вес опорных лап аппарата;

$Q_{лаз}$  – вес люков-лазов;

$Q_{ш}$  – вес штуцеров.

Найдем вес цилиндрической части аппарата:

$$Q_u = \frac{\pi}{4} (D_n^2 - D_в^2) \cdot H_u \cdot \rho \cdot g, \quad (62)$$

где  $\rho$  – плотность стали.

$$Q_u = \frac{3,14}{4} (7,040^2 - 7^2) \cdot 23000 \cdot 7500 \cdot 9,81 = 466945 \text{ Н.}$$

Аналогично рассчитываем:

$$Q_\partial = 44226 \text{ Н;}$$

$$Q_{он} = 46351 \text{ Н;}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{фк} &= 1400 \text{ Н;} \\
 Q_l &= 930 \text{ Н;} \\
 Q_{лаз} &= Q'_{лаз} \cdot N_{лаз},
 \end{aligned}
 \tag{63}$$

где  $Q'_{лаз}$  – вес одного люка-лаза, Н;

$N_{лаз}$  – их число.

$$Q_{лаз} = 3600 \cdot 6 = 21600 \text{ Н.}$$

Суммарный вес штуцеров равен 1535,3 Н. Принимаем  $Q_{шт} = 1540$  Н.

Тогда получим:

$$Q_1 = 466945 + 44226 + 46351 + 1400 + 930 + 21600 + 1540 = 590192 \text{ Н.}$$

Для крепления изоляции на корпус аппарата приваривают уголки в форме колец. Учитывая их вес, а также вес сварных швов и втулок для приборов контроля, примем  $Q_l = 600000$  Н.

Принимаем 4 пакета насадок. Суммарный вес насадок будет равен:

$$Q_n = 3300 \cdot 4 = 13200 \text{ Н.}$$

Вес обслуживания площадок и лестниц найдем, зная вес одной площадки ( $\approx 10000$  Н) и вес 1 м лестницы ( $\approx 1000$  Н).

При определении  $Q_{пл}$  число площадок принимается равным числу люков-лазов, а общая длина лестниц равной высоте аппарата (с учетом опоры).

Тогда получим:

$$Q_{пл} = 10000 \cdot 6 + 1000 \cdot 32 = 112000 \text{ Н.}$$

Вес материала теплоизоляции аппарата обычно составляет 5 – 10 % минимального веса аппарата. Принимаем 7 %, тогда:

$$Q_u = 600000 \cdot 0,07 = 42000 \text{ Н.}$$

Вес воды в аппарате при гидравлических испытаниях определяется по формуле:

$$Q_g = \left( \frac{\pi D_e^2}{4} \cdot H'_y + 2V_{гн} \right) \cdot \rho \cdot g,
 \tag{64}$$

$$\text{где } H'_y = H_y + 2h;
 \tag{65}$$

$V_{gn}$  – внутренняя емкость выпуклой части эллиптического днища, м<sup>3</sup>:

$$V_{gn} = \frac{\pi}{6} \cdot D_6^3 \cdot 0,25 \cdot D_6 = \frac{\pi}{24} \cdot D_6^3; \quad (66)$$

$\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>.

$$Q_6 = \left( \frac{3,14 \cdot 7^2}{4} \cdot 25,43 + 2 \cdot \frac{3,14}{24} \cdot 7^3 \right) \cdot 1000 \cdot 9,81 = 2280178 \text{ Н.}$$

Рассчитаем максимальный вес колонны по формуле (60):

$$Q_2 = 590192 + 13200 + 112000 + 42000 + 2280178 = 3037570 \text{ Н} = 3,04 \text{ МН.}$$

По формуле (59) получим:

$$J_\phi = 0,065 \cdot 7,25^4 = 1,8 \text{ м}^4.$$

Принимаем  $C_\phi = 100 \text{ МН/м}^4$ , тогда по формуле (58):

$$\varphi_0 = \frac{1}{100 \cdot 1,8} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ 1/(МН} \cdot \text{м)}.$$

Экваториальный момент инерции площади поперечного сечения стенки корпуса цилиндрического аппарата относительно центральной оси находится по формуле:

$$J = \frac{\pi}{64} (D_n^4 - D_6^4); \quad (67)$$

$$J = \frac{3,14}{64} (7,040^4 - 7^4) = 2,4 \text{ м}^4.$$

Модуль продольной упругости углеродистой стали  $E$  принимаем равным  $1,81 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ .

Рассчитаем период собственных колебаний по формуле (57):

$$T = 1,79 \cdot 28,5 \cdot \sqrt{\frac{3,04}{9,81} \cdot \left( \frac{28,5}{1,81 \cdot 10^5 \cdot 2,4} + 4 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \right)} = 0,8 \text{ с.}$$

По графику, представленному на рисунке 7, определяем коэффициент динамичности  $\varepsilon$ .

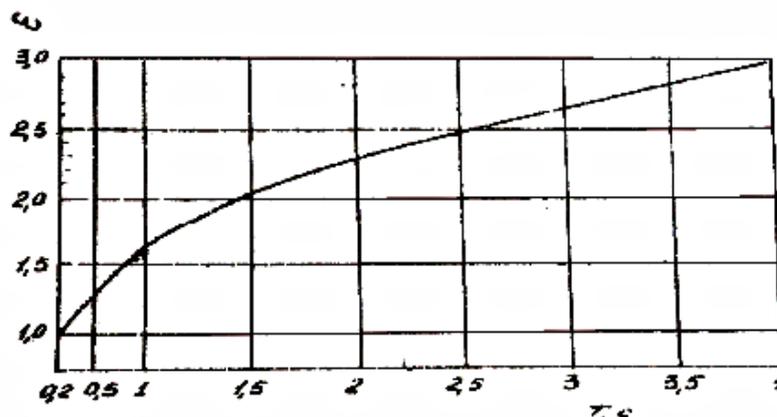


Рисунок 7 – График для определения коэффициента динамичности

Согласно графику  $\varepsilon = 1,5$ .

Принимаем  $\beta = 1,35$ ;  $q_1 = 350$  Па;  $q_2 = 420$  Па;  $q_3 = 490$  Па;  $x_1 = 5$  м;  $x_2 = 15,35$  м;  $x_3 = 20$  м.

Толщина слоя теплоизоляции определяется по формуле:

$$S_i = D_i \cdot h_i, \quad (68)$$

где  $D_i$  – наружный диаметр участка с учетом изоляции, м;

$h_i$  – его высота участка, м.

Соответственно:

$$S_1 = 7,036 \cdot 5 = 35,180 \text{ м}^2;$$

$$S_2 = 7,036 \cdot 10 = 70,360 \text{ м}^2;$$

$$S_3 = 7,036 \cdot 20 = 140,720 \text{ м}^2.$$

Ветровые нагрузки, действующие на аппарат, согласно формуле (54), будут равны:

$$P_1 = 0,6 \cdot 350 \cdot 1,35 \cdot 35,180 = 9973,530 \text{ Н};$$

$$P_2 = 0,6 \cdot 420 \cdot 1,35 \cdot 70,360 = 23936,472 \text{ Н};$$

$$P_3 = 0,6 \cdot 490 \cdot 1,35 \cdot 140,720 = 55851,768 \text{ Н}.$$

Изгибающий момент от напора ветра находится по формуле:

$$M_B = P_1 \cdot x_1 + P_2 \cdot x_2; \quad (69)$$

$$M_B = 9973,530 \cdot 5 + 23936,472 \cdot 15,35 = 417292 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Большинство колонных аппаратов снабжено металлоконструкциями

(обслуживающими площадками), что увеличивает изгибающий момент от напора ветра. Суммарный изгибающий момент  $M'_B$  будет равен:

$$M'_B = M_B + \sum_{i=0}^{m=0} M'_{B_i}, \quad (70)$$

где  $m_0$  – число обслуживающих площадок, расположенных выше расчетного сечения;

$M'_{B_i}$  – изгибающий момент в расчетном сечении от ветрового напора на одну площадку:

$$M'_{B_i} = 1,4 \cdot \beta_i \cdot q_i \cdot x_{ni} \cdot \sum f_i, \quad (71)$$

где  $x_{ni}$  – высота расположения обслуживающей площадки, м;

$\sum f_i$  – сумма проекций всех элементов площадки, расположенных вне зоны аэродинамической тени, на вертикальную плоскость, м<sup>2</sup>:

$$\sum f_i = 0,35 \cdot D_{ni} \cdot h_{ni}, \quad (72)$$

где  $D_{ni}$  – диаметр аппарата на участке площадки, м;

$h_{ni}$  – высота площадки (расстояние от настила до перил), равная 1,2 м.

По формуле (72) получим:

$$\sum f_i = 0,35 \cdot 7,036 \cdot 1,2 = 2,955 \text{ м}^2.$$

$$M'_{B_1} = 1,4 \cdot 1,35 \cdot 350 \cdot 5 \cdot 2,955 = 9774 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M'_{B_2} = 1,4 \cdot 1,35 \cdot 420 \cdot 15,35 \cdot 2,955 = 36006 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M'_{B_3} = 1,4 \cdot 1,35 \cdot 490 \cdot 20 \cdot 2,955 = 54733 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

$$\sum M'_{B_i} = 100513 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

По формуле (70) рассчитаем:

$$M'_B = 417292 + 100513 = 517805 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

### 3.2 Проверка прочности фундамента

Состояние опорной поверхности аппарата является наиболее напряженным при совместном действии ветрового момента  $M'_B$  и максимального веса  $Q_2$ . Максимальное напряжение на опорной поверхности фундаментного

кольца находится по формуле:

$$\sigma_2 = \frac{Q_2}{F} + \frac{M'_B}{W}, \quad (73)$$

где  $F$  – опорная площадь фундаментного кольца,  $\text{м}^2$ :

$$F = \frac{\pi}{4} \cdot (D_2^2 - D_1^2); \quad (74)$$

$W$  – момент сопротивления изгибу опорной площади фундаментного кольца,  $\text{м}^3$ :

$$W = \frac{\pi}{32} \cdot \left( \frac{D_2^4 - D_1^4}{D_2} \right) \quad (75)$$

По формулам (74) и (75) получим:

$$F = \frac{3,14}{4} \cdot (7,25^2 - 6,9^2) = 3,888 \text{ м}^2;$$

$$W = \frac{3,14}{32} \cdot \left( \frac{7,25^4 - 6,9^4}{7,25} \right) = 6,715 \text{ м}^3.$$

Теперь по формуле (73) рассчитаем максимальное напряжение на опорной поверхности фундаментного кольца:

$$\sigma_2 = \frac{3,04}{3,888} + \frac{0,463}{6,715} = 0,844.$$

В качестве материала фундамента принимаем бетон марки 100, допускаемое напряжение на сжатие которого равно 8 МПа.  $\sigma_2 = 0,844 < 8$ , следовательно, выбранные размеры поверхности опорного кольца обеспечивают прочность фундамента.

### 3.3 Определение толщины фундаментного кольца

Усилия, вызвавшие напряжения  $\sigma_2$ , изгибают выступающие части фундаментного кольца. Из условий прочного сопротивления изгибу найдем толщину фундаментного кольца  $\delta_k$  по формуле:

$$\delta_k = b \cdot \sqrt{\frac{3\sigma_2}{[\sigma]}}, \quad (76)$$

где  $b$  – ширина выступающей части фундаментного кольца, м;

					ВКР.171048.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		58

$[\sigma] = 140$  МПа – напряжение в кольце, которое принимаем равным нормативному допустимому напряжению при 20 °С.

Ширина выступающей части фундаментного кольца определяется по формуле:

$$b = \frac{D_2 - D_n^0}{2}, \quad (77)$$

где  $D_n^0 = D_n + 2S$  – наружный диаметр опорной обечайки:

$$D_n^0 = 7,040 + 2 \cdot 0,020 = 7,08 \text{ м.}$$

По формуле (77) получим:

$$b = \frac{7,25 - 7,08}{2} = 0,085, \text{ тогда:}$$

$$\delta_k = 0,085 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot 0,844}{140}} = 0,013 \text{ м.}$$

### 3.4 Расчет аппарата на устойчивость

Ветровые нагрузки могут опрокинуть аппарат, поэтому произведем расчет аппарата на устойчивость. Если устойчивость недостаточна, то аппарат укрепляют на фундаменте болтами. Коэффициент устойчивости аппарата находим по формуле:

$$y = \frac{M_Q}{M_G} = \frac{Q_1 \cdot R_1}{M_G}, \quad (78)$$

где  $M_Q$  – момент от собственного веса аппарата относительно точки опрокидывания, МН·м;

$Q_1$  – минимальный вес аппарата, МН;

$R_1$  – плечо силы  $Q_1$  (расстояние от оси аппарата до точки опрокидывания), принимаемое примерно равным  $0,42 \cdot D_n$ .

По формуле (78) найдем:

$$y = \frac{0,6 \cdot 0,42 \cdot 7,036}{0,417} = 0,441 < 1,5, \text{ т.е., фундаментные болты необходимы.}$$

Произведем расчет фундаментных болтов на прочность.

									Лист
									59
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

Для этого найдем минимальное напряжение на опорную поверхность фундаментного кольца:

$$\sigma_1 = \frac{Q_1}{F} - \frac{M_g}{W}; \quad (79)$$

$$\sigma_1 = \frac{0,6}{3,888} - \frac{0,417}{6,715} = 0,092 \text{ МПа.}$$

Если  $\sigma_l \geq 0$  и  $y < 1,5$ , то фундаментные болты ставят для фиксации аппарата. В данном случае  $\sigma_l > 0$ , т.е. расчет фундаментных болтов не обязателен.

### 3.5 Расчет сварочного шва, соединяющего опорную часть аппарата

Напряжения в сплошном сварном шве, крепящем корпус аппарата к цилиндрической опорной части, находим по формуле:

$$\sigma_c = \frac{Q_2}{f_c} + \frac{M'}{W'_c}, \quad (80)$$

где  $f_c$  – площадь опорного сечения сварного шва, м<sup>2</sup>:

$$f_c = \pi \cdot D_n \cdot 0,7 \cdot S = 3,14 \cdot 7,040 \cdot 0,7 \cdot 0,014 = 0,217 \text{ м}^2; \quad (81)$$

$W'_c$  – момент сопротивления сварного шва изгибу, м<sup>3</sup>:

$$W'_c = 0,8 \cdot 0,7 \cdot S \cdot D_n^2 = 0,8 \cdot 0,7 \cdot 0,014 \cdot 7,040^2 = 0,388 \text{ м}^3; \quad (82)$$

$M'$  – изгибающий момент относительно сечения сварного шва. При его определении учитываем только те ветровые нагрузки, которые действуют выше сварного шва.

$M' = 406279 \text{ Н}\cdot\text{м} \approx 0,406 \text{ МН}\cdot\text{м}$  (расчет аналогичен расчету изгибающего момента  $M'_g$ ). Тогда:

$$\sigma_c = \frac{3,04}{0,217} + \frac{0,406}{0,388} = 15,056 \text{ МПа.}$$

Напряжение в сварном шве не должно превышать при работе на срез  $0,8 \cdot [\sigma]$ ,

где  $[\sigma]$  – допускаемое напряжение растяжения для основного металла.

В данном случае  $[\sigma] = 107,1 \text{ МПа}$ .

$$0,8 \cdot 107,1 = 85,68 \text{ МПа};$$

$15,056 < 85,68$  – условие прочности выполнено.

					ВКР.171048.180301.ПЗ	Лист
						60
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## 4 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА

### 4.1 Средства и системы защиты при эксплуатации установки

Технологический процесс на установке предусматривает отсутствие непосредственного контакта персонала с исходным сырьем, готовой продукцией, реагентами, оказывающими вредное воздействие на организм человека. Однако в процессе эксплуатации установки могут возникать различного рода неполадки, создающие аварийные ситуации. Поэтому обслуживающий персонал обязан четко знать свои обязанности и уметь правильно и быстро принимать необходимые решения, предотвращающие дальнейшее развитие аварии.

Неполадки и аварийные ситуации возможны при ведении технологического процесса, выполнении производственных операций, эксплуатации оборудования и коммуникаций, которые могут стать причиной пожара, взрыва, травмирования или отравления работающих, загрязнения окружающей среды.

С целью обеспечения безопасности при эксплуатации установки предусматриваются следующие мероприятия:

- технологический процесс ведется в герметичных аппаратах;
- производственный процесс полностью автоматизирован;
- все аппараты защищены от превышения давления системой предохранительных клапанов со сбросом на факел;
- предусматривается аварийная сигнализация при повышении концентрации взрывоопасных паров и газов на установке;
- трубопроводы и аппараты, имеющие температуру стенки более 45 °С, теплоизолированы;
- на жидкостных и газовых линиях установлены обратные клапаны;
- сброс продуктов из аппаратов на факел при аварийных ситуациях воз-

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Киришина М.А.</i>			<i>Модернизация вакуумной колонны ЭЛОУ-АВТ</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Лескова С.А.</i>				У	61	68
<i>Н. контр.</i>		<i>Родина Т.А.</i>				<i>АмГУ ИФФ гр. 718-об</i>		
<i>Зав. каф.</i>		<i>Гужель Ю.А.</i>						

можен по байпасу предохранительных клапанов;

- наличие исправной системы заземления технологических аппаратов, колонн, трубопроводов, насосного оборудования и молниезащиты;
- строгое соблюдение норм технологического режима;
- обязательное выполнение обслуживающим персоналом производственных инструкций, правил по производственной безопасности, пожарной и газовой безопасности;
- бесперебойное снабжение установки сырьем, паром, водой, электроэнергией, воздухом КИП и азотом.

Работа персонала связана с выполнением операций на наружных площадках, где расположено основное технологическое оборудование, поэтому индивидуальные средства защиты (спецодежда, спецобувь, защитная каска, защитные очки) одинаковые для данных категорий работников и включают летнюю и зимнюю спецодежду. Все работники производства должны иметь при себе маски с защитными фильтрами, а необходимый аварийный запас должен храниться в шкафу в операторной. Защитные очки применяются при нахождении на территории установки первичной переработки нефти. Каски служат для защиты головы от механического повреждения, а также от попадания агрессивных и вредных веществ, ношение обязательно для всех работающих. Для защиты глаз от излучения, пыли, твердых материалов рабочий персонал должен быть обеспечен защитными очками.

В качестве одного из коллективных средств защиты персонала от вредных воздействий предусмотрена вентиляция производственных помещений, уровень освещенности рабочих мест соответствует отраслевым нормативам, включая аварийное освещение. Постоянное присутствие персонала на рабочих местах в производственных помещениях и на территории ограничено временем не более двух часов, местом постоянного пребывания персонала (постоянное рабочее место) является помещение операторной.

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		62

## 4.2 Воздействие на окружающую среду газойля при условиях аварийной и безаварийной эксплуатации

Переработка нефти не является безотходным процессом. При переработке нефти выделяются отравляющие вещества, которые попадают в окружающую среду. Экология нефтепереработки включает в себя проблемы загрязнение атмосферы, гидросферы и литосферы.

При безаварийной работе установки вакуумной перегонки мазута в атмосферу выбрасывается немалое количество загрязняющих веществ. Основными вредными веществами, выбрасываемыми в атмосферу на НПЗ, являются углеводороды, сернистый газ, сероводород, окись углерода, аммиак, фенол, окислы азота и т. д.

Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосфере представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ в атмосфере по ГН 2.1.6.1338 – 03

Наименование вещества	Формула	Величина ПДК, мг/м <sup>3</sup>		Класс опасности
		Максимально разовое	Среднесуточное	
Бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	0,3000	0,1000	2
Хлор	Cl <sub>2</sub>	0,1000	0,0300	2
Оксид углерода(II)	CO	5,0000	3,0000	4
Свинец	Pb	0,0010	0,0003	1
Диоксид серы	SO <sub>2</sub>	0,5000	0,1000	3
Диоксины	C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	-	0,5000	1
Оксид азота(IV)	NO <sub>2</sub>	0,0850	0,0400	2

Из всех видов загрязнений почвенной среды нефтепродуктами, загрязнение горизонта грунтовых вод является наиболее опасным, так как вредные вещества могут мигрировать на большие расстояния, что может привести к проникновению в поверхностные водоемы.

Загрязнение сточных вод [27] на установке вакуумной перегонки мазута происходит за счет конденсации насыщенного водяного пара, применяемого для предотвращения разложения сырья вследствие высоких температур.

Для того, чтобы не допустить загрязнения водоемов, необходим постоян-

ный контроль за качеством в них воды. Для защиты водоемов от загрязнения сточными водами на предприятии необходимо выполнять сочетание водооборота с локальными методами очистки сбрасываемых вод. С сокращением потерь нефтепродуктов в сточные воды, одновременно будет достигаться и защита водоемов от загрязнения.

Также негативным воздействием на окружающую среду является загрязнение грунта и почвы. Любые утечки и аварийные выбросы в районе НПЗ способствуют глубокому проникновению токсичных веществ в почву, что может привести к сильным, иногда необратимым, повреждениям природных экосистем; углеводороды, попадая в зоны низкой плотности и аэрации, фильтруются вплоть до водоносных горизонтов.

При аварийной работе на установке могут произойти следующие ситуации:

– Выброс технологической среды (паровой и/или жидкой фазы) из оборудования и трубопроводов блока на наружную площадку. При выбросах опасных веществ возможно образование взрывоопасного паровоздушного облака, его взрыв, пожар пролива при наличии источника зажигания.

– Разрушение (разгерметизация) оборудования, трубопроводов вакуумного блока;

– Образование и взрыв взрывоопасной смеси парогазовой фазы с воздухом внутри вакуумной колонны.

– Образование и взрыв взрывоопасного паровоздушного облака (ПВО) на наружной площадке.

Постоянные и случайные источники зажигания также могут привести к взрыву взрывоопасного ПВО [28].

Все эти ситуации непременно ведут к тому, что концентрации выброшенных в окружающую среду опасных веществ увеличатся в разы и превысят нормы ПДК, что отрицательно скажется на атмосфере, литосфере и гидросфере, а также может привести к угрозе жизни человека.

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		64

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной бакалаврской работе рассмотрены основные процессы первичной переработки нефти, способы модернизации вакуумной колонны.

В технологической части работы была изучена технологическая схема вакуумного блока установки ЭЛОУ-АВТ, включая аппараты и оборудование, технологические параметры и особенности ведения процесса, рассмотрена характеристика сырья и готовой продукции установки.

Исходя из задания, был произведен технологический и механический расчеты основного оборудования – вакуумной колонны, рассчитаны материальный и тепловой балансы. Предложена модернизация вакуумной колонны, заключающаяся в замене насадки типа «Вакупак» на насадку типа «Mellapak-Plus», преимуществом которой является наиболее низкое гидравлическое сопротивление. Замена насадки позволит уменьшить диаметр вакуумной колонны и увеличить выход вакуумного газойля.

В работе рассмотрены аспекты безопасности и экологичности производства.

В графической части работы выполнены чертежи технологической схемы вакуумного блока установки ЭЛОУ-АВТ и общего вида вакуумной колонны.

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Киришина М.А.</i>			<i>Модернизация вакуумной колонны ЭЛОУ-АВТ</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Лескова С.А.</i>				<i>У</i>	<i>65</i>	<i>68</i>
<i>Н. контр.</i>		<i>Родина Т.А.</i>				<i>АмГУ ИФФ гр. 718-об</i>		
<i>Зав. каф.</i>		<i>Гужель Ю.А.</i>						

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Ахметов, С. А. Технология глубокой переработки нефти и газа : Учебное пособие / С. А. Ахметов. – Уфа : Гилем, 2002. – 672 с.

2 Ясавеев, Х. Н. / Х. Н. Ясавеев, А. Г. Лаптеав, М. И. Фарахов. – Модернизация установок переработки углеводородных смесей. – Казань : Издательство «ФЭН», 2004. – 307 с.

3 Ахметов, С. А. Технология глубокой переработки нефти и газа : Учебное пособие / С. А. Ахметов, М. Х. Ишмияров, А. А. Кауфман. – СПб : Недра, 2009. – 832 с.

4 Капустин В. М., Гуреев А. А. Технология переработки нефти. Часть вторая. Деструктивные процессы. – М. : КолосС, 2007. – 334 с.

5 Технология переработки нефти. В 2-х частях. Часть первая. Первичная переработка нефти / под ред. О. Ф. Глаголевой и В. М. Капустина. – М. : Химия, КолосС, 2007. – 400 с.

6 Гуревич, И. Л. Технология переработки нефти и газа. Часть первая. Общие свойства и первичные методы переработки нефти и газа / И. Л. Гуревич. – М. : Химия, 1982. – 360 с.

7 Коротков, П. И. Первичная переработка нефти на высокопроизводительных атмосферно-вакуумных установках / П. И. Коротков, Б. Н. Шаев, В. Т. Тетерук. – М. : Химия, 1985. – 120 с.

8 Волосов, И. В. Анализ работы установки первичной переработки нефти / И. В. Волосов // Химические науки. – 2017. – № 6. – С. 217-218.

9 Насрутдинова, М. Р. Атмосферно-вакуумная перегонка нефти / М. Р. Насрутдинова // Мировая наука. – 2020. – № 1. – С. 381-383.

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Разраб.</i>		<i>Киришина М.А.</i>			<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Лескова С.А.</i>			У	66	68
<i>Н. контр.</i>		<i>Родина Т.А.</i>			<i>Модернизация вакуумной колонны ЭЛОУ-АВТ</i> <i>АмГУ ИФФ гр. 718-об</i>		
<i>Зав. каф.</i>		<i>Гужель Ю.А.</i>					

10 Глаголева, О. Ф. Физико-химические аспекты технологии первичной переработки нефти (обзор) / О. Ф. Глаголева // Нефтехимия. – 2018. – № 1. – С. 3-10.

11 Меликов, Э. А. Управление вакуумным блоком в первичной переработке нефти / Э. А. Меликов // Булатовские чтения. – 2019. – № 2. – С. 89-92.

12 Креймер, М. Л. Модернизация вакуумного блока высокопроизводительной установки ЭЛОУ-АВТ для получения сырья масляного производства / М. Л. Креймер [и др.] // Нефтехимия и нефтепереработка. – 1985. – № 9. – С. 25-27.

13 Фарамазов, С. А. Оборудование нефтеперерабатывающих заводов и его эксплуатация : Учебное пособие / С. А. Фарамазов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1984. – 328 с.

14 Гречихина, Н. А. Совершенствование процесса первичной переработки нефти / Н. А. Гречихина // Ученые заметки ТОГУ. – 2013. – № 4. – С. 1221-1226.

15 Сомов, В. Е. Модернизация ректификационных колонн установок первичной перегонки ООО «Киннеф» / В. Е. Сомов [и др.] // Нефтехимия и нефтепереработка. – 2006. – № 6. – С. 37-39.

16 Багиров, И. Т. Современные установки первичной переработки нефти / И. Т. Багиров. – М. : Химия, 1974. – 240 с.

17 Владимиров, А. И. Контактные устройства для массообменных аппаратов / А. И. Владимиров // Химия и технология топлив и масел. – 2000. – № 2. – С. 28-33.

18 Леонтьева, Н. Ю. Первичная переработка нефти. Ведение технологического процесса на установках I и II категории : Учебное пособие / Н. Ю. Леонтьева. – Сызрань : Губернский колледж г. Сызрани, 2014. – 38 с.

19 Езунов, И.С. Реконструкция колонного оборудования установок АВТ АООТ «Орскнефтеоргсинтез» / И.С. Езунов // Нефтехимия и нефтепереработка. – 1995. – № 9. – С. 4.

					<i>ВКР.171048.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		67

20 Пигалов, Г. П. Влияние глубины отбора бензиновых фракций в отбензинивающей колонне К-1 на качественные показатели работы высокопроизводительных установок перегонки нефти / Г. П. Пикалов [и др.] // Нефтехимия и нефтепереработка. – 1978. – № 10. – С. 7-10.

21 Гареев, Р. Г. Анализ условий увеличения отбора и улучшения качества масляных дистиллятов при перегонке мазута / Р. Г. Гареев // Нефтехимия и нефтепереработка. – 1997. – № 4. – С. 18-22.

22 Савченков, А. Л. Технологический расчёт ректификационной колонны : Учебное пособие / А. Л. Савченков. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2012. – 62 с.

23 ГОСТ 21944-76. Аппараты колонные стальные. Ряд диаметров. – введ. 01-01-1977. – М. : Издательство стандартов, 1983. – 3 с.

24 Mellapak™ and MellapakPlus™ / Sulzer : [Электронный ресурс]. – М., 2021. – Режим доступа : <https://www.sulzer.com/en/shared/products/mellapak-and-mellapakplus> – 05.06.2021.

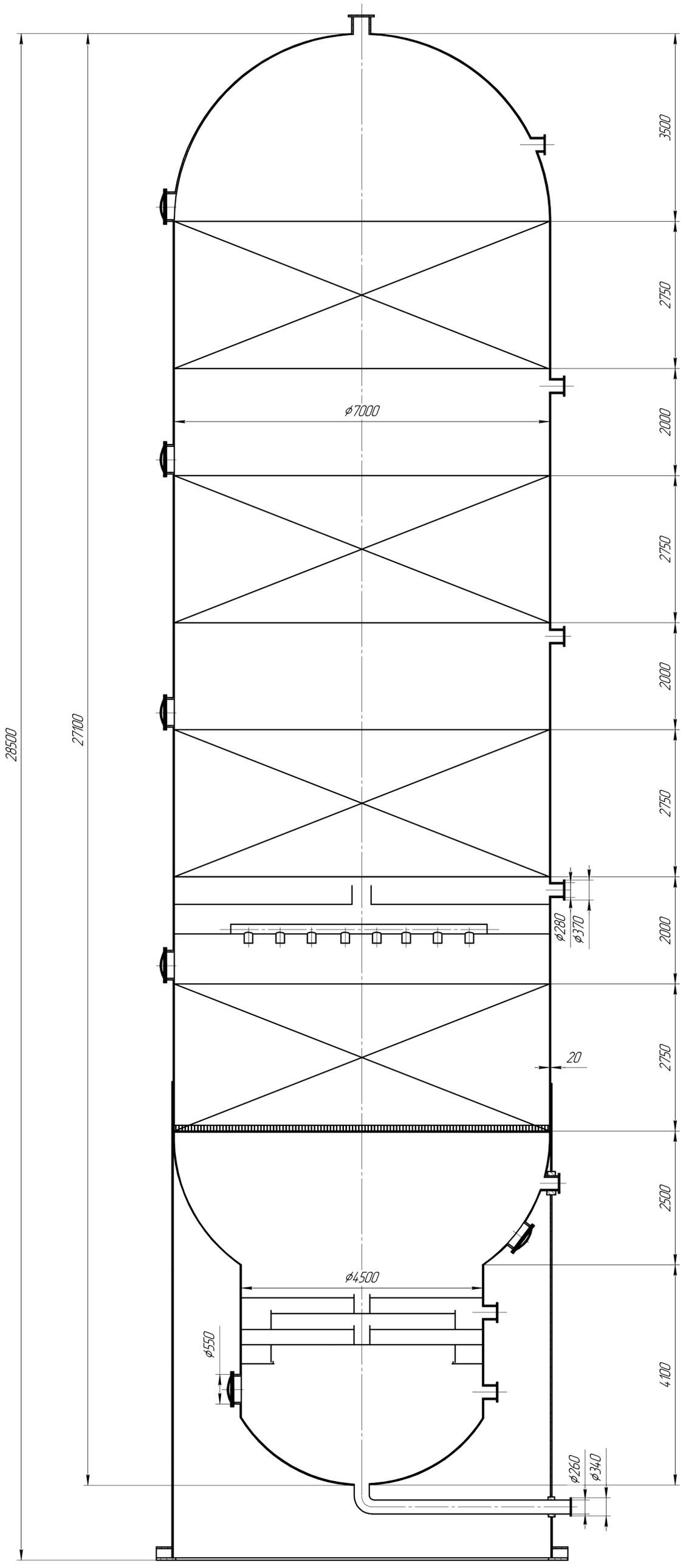
25 Иваняков, С. В. Гидродинамика насадочных аппаратов / С. В. Иваняков, С. Б. Коньгин. – Самара : Самарский государственный технический университет, 2009. – 44 с.

26 Леонтьев, А. П. Прочностные расчеты отдельных элементов технологического оборудования : учебное пособие / А. П. Леонтьев, А. Г. Мозырев, А. Н. Гребнев, С. Г. Головченко. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2012. – 144 с.

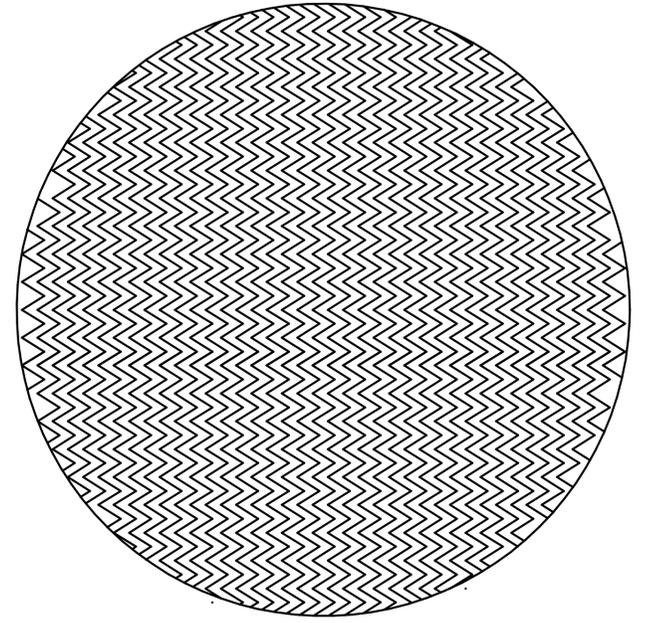
27 ГОСТ 17.1.3.13–86. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к охране поверхностных вод от загрязнений. – введ. 07-01-1986. – М. : Издательство стандартов, 1986. – 2 с.

28 ГОСТ Р 22.9.22. – 2014. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Общие технические требования – введ. 01-04-2015. – М. : Издательство стандартов, 2019. – 6 с.

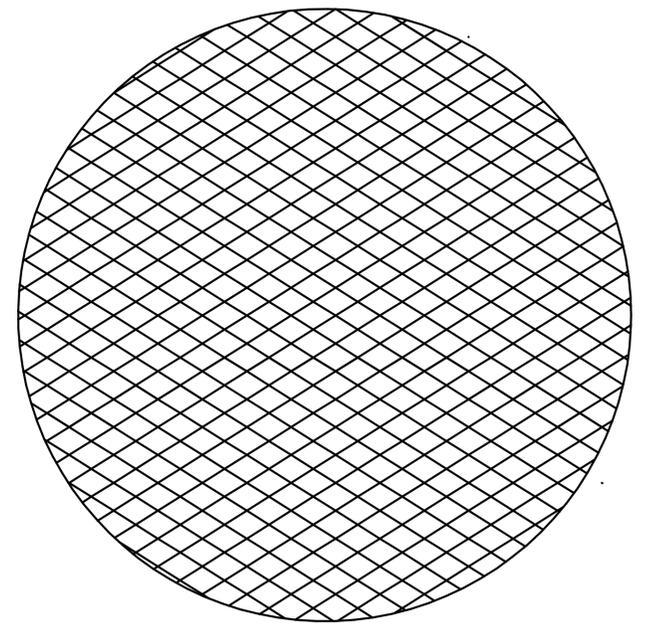




ПАКЕТ НАСАДКИ "ВАКУПАК"



ПАКЕТ НАСАДКИ "MellapakPlus"



Техническая характеристика	
N°	Характеристика
1	Аппарат предназначен для вакуумной перегонки мазута.
2	Емкость номинальная.
3	Производительность по сырью 320000 кг./ч.
4	Рабочая температура: вверху - 120 °С внизу - 367 °С
5	Температура ввода сырья 390 °С
6	Рабочее остаточное давление: вверху аппарата - 12500 Па внизу аппарата - 18500 Па
7	Среда в аппарате взрывоопасная и токсичная
7	В аппарате установлено 4 пакета насадки
8	Тип насадки - блочная

Изд. №	Лист №	Всего листов	Изд. №	Лист №	Всего листов

				ВКР.17104.8.180301.В0		
Изд. №	Лист №	Всего листов	Изд. №	Лист №	Всего листов	
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	Модернизация вакуумной колонны ЭЛОУ-АВТ	
Разраб.	Кирилина М.А.				Лит	
Проб.	Лескова С.А.				Масса	
Т.контр.					140	
					Лист 2	
					Листов 2	
Исполн.	Родина Т.А.				АМГУ ИФФ	
Этап	Гижель Ю.А.				гр. 718-ад	
					Формат А1	