

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра нефтехимии и техногенной безопасности

**Оптимизация режима работы узла выделения этан-  
пропановой фракции из широкой фракции легких  
углеводородов**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 431 группы

направления 18.03.01 «Химическая технология»

код и наименование направления, специальности

Института химии

наименование факультета, института

Вдовиной Марии Павловны

Научный руководитель

к.х.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

И. А. Никифоров

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

д.х.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Р.И. Кузьмина

инициалы, фамилия

Саратов 2025

## ВВЕДЕНИЕ

Бакалаврская работа содержит 52 страницы, 13 таблиц, 22 рисунка (включая 2 в приложениях), 34 литературных источника, чертёж технологической схемы установки и ректификационной колонны.

Разделение газа на отдельные индивидуальные углеводородные фракции осуществляется на газоперерабатывающих заводах (ГПЗ), в состав которых входят газофракционирующие установки (ГФУ). Газофракционирование основано на разделении широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ) или иных газовых смесей в ректификационных колоннах на индивидуальные компоненты или узкие фракции [1, 2].

Ценность получаемых в процессе ректификации продуктов повышается с увеличением глубины переработки. Высокая энерго- и металлоемкость являются причиной поиска решений для оптимизации процессов ректификации. В это понятие входит разработка более эффективных режимов работы ректификационных колонн с применением современного программного обеспечения, которые позволят снизить энергопотребление и материальные затраты, повысив тем самым экономическую эффективность процесса. В этом заключается актуальность данной работы.

Целью работы является проведение расчетов с использованием современных программных средств и достижение оптимального режима работы колонны, обеспечивающего максимального выхода продуктов с максимальным качеством.

В связи с этим, при выполнении бакалаврской работы основными задачами были:

- изучение основных принципов и процессов газофракционирования, а также основных способов повышения эффективности газоразделения;
- разработка модели колонны, отвечающей регламентированным требованиям, и оценка влияния технологических параметров на ее эффективность;
- приведение варианта модернизации ректификационной колонны.

Бакалаврская работа состоит из двух глав: «Принципы и технологические основы газофракционирования» и «Экспериментальная часть».

Глава «Принципы и технологические основы газофракционирования» состоит из шести подразделов:

1. Сырье газофракционирования, продукты и их применение;
2. Теоретические и аппаратные аспекты процесса ректификации;
3. Классификационное разделение установок газофракционирования;
4. Основные процессы газофракционирования;
5. Основные способы газофракционирования;

6. Способы повышения эффективности газоразделения.

Глава «Экспериментальная часть» состоит из семи подразделов:

1. Существующая схема выделения этан-пропановой фракции;
2. Исходные данные для проектирования;
3. Обзор систем моделирования;
4. Разработка модели колонны;
5. Проверка адекватности модели;
6. Оценка влияния технологических параметров на эффективность колонны;
7. Вариант модернизации колонны.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе бакалаврской работы осуществлен поиск литературных данных для изучения принципов газофракционирования с целью дальнейшего проектирования колонны ректификации.

Основным сырьем процесса является широкая фракция легких углеводородов, представляющая собой углеводородную смесь, состоящую из пропана, бутанов и пентанов с примесями метана, этана, гексанов и более тяжелых компонентов. Получают ШФЛУ в процессе переработки нестабильного газового конденсата и стабилизации нефти [2].

В состав сырья газофракционирования входят этан (2 – 8%), пропан (10 – 15%), изобутан (8 – 18%), нормальный бутан (20 – 40%) и углеводороды  $C_{5+}$  (11 – 25%), а также сернистые соединения, включая меркаптаны и сероводород. В зависимости от компонентного состава получаемая ШФЛУ на газоперерабатывающих заводах подразделяется на следующие марки (таблица 1) [3, 4]:

Таблица 1 – Технические требования к ШФЛУ

Показатели по стандарту, обязательные для проверки	Марки		
	А	Б	В
Углеводородный состав, % мас.:			
$C_1 + C_2$ , не более	3	5	-
$C_3$ , не менее	15	-	-
$C_4 + C_5$ , не менее	45	40	35
$C_6 +$ высшие, не более	15	30	50
Содержание сероводорода, %, не более	0,003		
Содержание взвешенной воды	Отсутствие		
Содержание щелочи	Отсутствие		
Внешний вид	Бесцветная прозрачная жидкость		

При переработке предельных газовых углеводородов получаются следующие продукты, которые используются для различных целей:

- 1) Этановая фракция, используемая как сырье пиролиза, хладагент на установках депарафинизации масел и др.;
- 2) Пропановая фракция – сырье пиролиза, а также хладагент для многих технологических установок, бытовой сжиженный газ;
- 3) Изобутановая фракция – сырье для производства синтетического каучука (изопренового и бутилкаучука), используется на установках алкилирования;

4) Бутановая фракция – сырье для получения бутадиена в производстве синтетического каучука, сырье пиролиза и компонент сжиженного бытового газа, добавка к автомобильному бензину для придания ему требуемого давления паров;

5) Изопентановая фракция – сырье для производства изопренового каучука, компонент в высокооктановых сортах бензинов;

6) Пентановая фракция – сырье для процессов изомеризация и пиролиза, в производстве амилового спирта.

На ГФУ непредельных углеводородов из олефинсодержащих потоков выделяются следующие фракции:

1) Пропан-пропиленовая – сырье для производства полимербензина, фенола и ацетона, синтетических моющих средств, бутиловых спиртов, может быть использована как сырье установок алкилирования;

2) Бутан-бутиленовая – сырье установок алкилирования и полимеризации, присадки к маслам, в производстве синтетических каучуков [5].

Существует классификационное разделение способов ректификации:

Ректификация может происходить с разной организацией взаимодействия фаз:

- движение в противотоке;
- движение в прямотоке;
- движение в перекрестном токе;

По типу внутренних устройств различают ректификационные колонны:

- насадочные,
- тарельчатые
- пленочные.

Существует классификация насадочных устройств по их конструкции:

- насыпная (нерегулярная) насадка;
- регулярная насадка [6-8].

Направление движения потоков пара и жидкости в насыпных и в некоторых видах регулярной насадок всегда противоточное.

В свою очередь, тарелки представляют из себя металлические диски разного устройства и принципа действия. Тарельчатый способ ректификации также называется ступенчатым.

Тарелки принято классифицировать по следующим признакам:

а) Классификация по способу организации потока жидкости:

- Тарелки с переливными устройствами, где переливные устройства представляют собой трубы, предназначенные для перетока жидкости между тарелками;

- Тарелки с неорганизованным стоком жидкости (провальные), где паровая и жидкая фазы проходят через одни и те же отверстия.

б) Классификация по типу контакта фаз:

- струйные тарелки;
- барботажные тарелки;
- смешанные тарелки.

с) Классификация по конструкции тарелок: колпачковые, тарелки с S-образными элементами, ситчатые, клапанные, решетчатые [9].

Известны три типа пленочных аппаратов:

- трубчатые аппараты, в которых пленка стекает по внутренней поверхности вертикальных труб;
- аппараты с листовой (плоско-параллельной) насадкой, в которых пленка стекает по обеим поверхностям вертикальных пластин;
- аппараты с восходящим (обращенным) движением пленки.

Также существует классификационное разделение способов газофракционирования:

а) Классификация по типу перерабатываемого сырья;

- установка для переработки предельных углеводородов, куда сырье подается с установок гидрокрекинга, каталитического риформинга, первичной перегонки;
- установка для переработки непредельных углеводородов, куда сырье подается с установок каталитического и термического крекинга и коксования [10].

б) Классификация по количеству колонн, включенных в работу:

- одноколоночные установки, позволяющие получать широкие фракции, состоящие из смесей углеводородов (например, для получения пропан-бутановой фракции);
- многоколоночные установки, где выделяют стабильный бензин и фракции индивидуальных углеводородов. Каждая из колонн предназначена для выделения определенной фракции [11, 12].

с) Классификация по режиму давления:

- схемы с нисходящим режимом давления;
- схемы с восходящим режимом давления.

Существует принципиальная схема центральной газофракционирующей установки, которая предназначена для получения следующих товарных фракций: пропановой, изобутановой, нормального бутана, изопентановой, а также бензина газового стабильного. Принципиальная схема отображена на рисунке 1 и описана ниже.

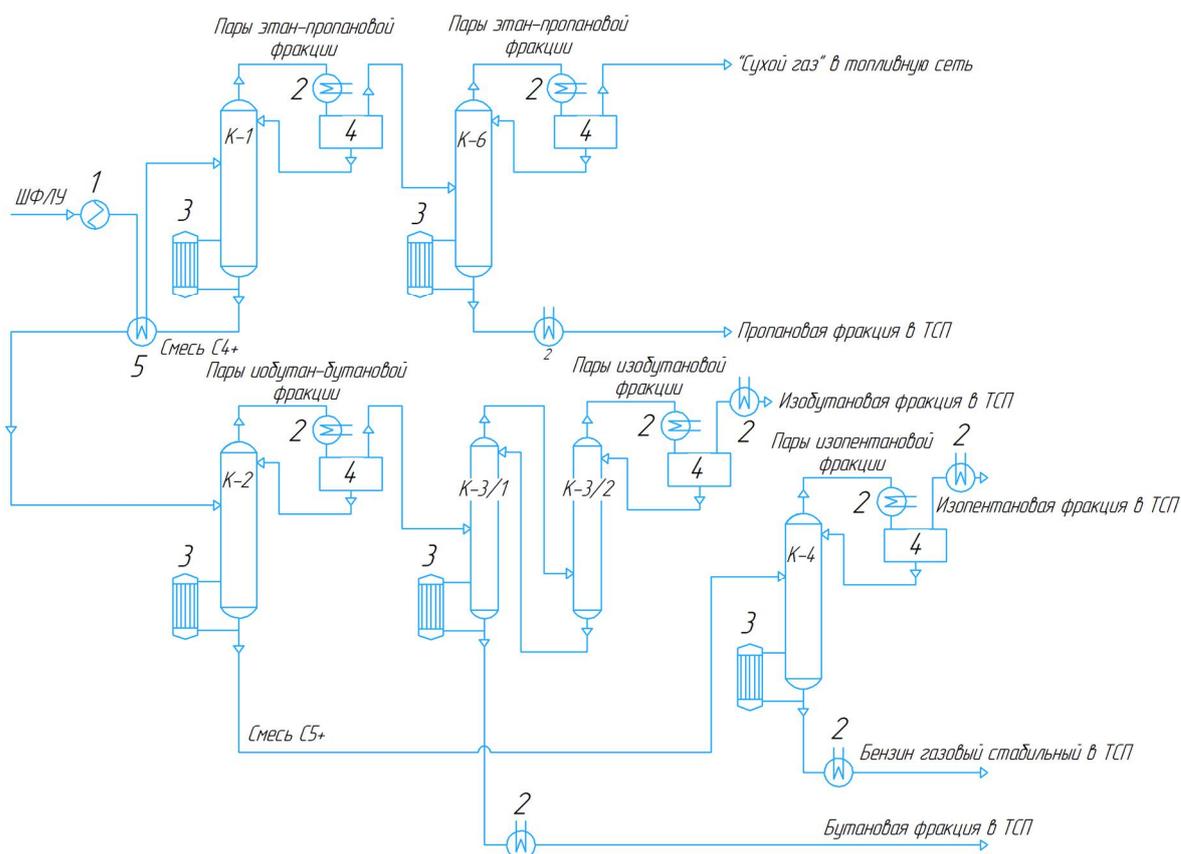


Рисунок 1 – Принципиальная схема ЦГФУ

1 – теплообменник, 2 – дефлегматор, 3 – кипятильник, 4 – флегмовая емкость, 5 – рекуператор

Существует также разновидность классического газодифракционирования, предназначенная для разделения жирного газа каталитического крекинга – АГФУ. Его применяют в случае, когда подаваемое сырье насыщено жирным газом, то есть газом, с высоким содержанием тяжелых углеводородов.

Традиционные методы газодифракционирования часто сталкиваются с потерями ценных фракций и высокими энергозатратами. Повышение эффективности ректификации требует комплексного подхода, поскольку традиционные технологии сталкиваются с ростом энергопотребления при масштабировании.

Можно выделить некоторые способы оптимизации процесса, направленных на улучшение чёткости разделения компонентов ШФЛУ и на снижение энергозатрат, среди которых:

1. Модернизация тепло- и массообменных контактных устройств (улучшение структуры потоков за счет секционирования, установка отбойников и демистеров, организация второй зоны контакта фаз, оптимизация свободного сечения контактных устройств);

2. Оптимизация режимов работы колонны (оптимизация флегмового числа в зависимости от расхода и состава питания, оптимизация давления, изменение системы орошения);

3. Оптимизация технологической схемы процесса (выбор тарелок питания, организация по высоте ректификационной колонны контуров подвода и отвода тепла, ввод питания в виде пара с предыдущей колонны, т. е. организация парциального дефлегматора в ней);

4. Замена контактных устройств на новые (тарелки с двумя зонами контакта фаз (комбинированные), нерегулярные контактные насадки, регулярные (упорядоченные) насадки, контактные устройства с нестационарным взаимодействием фаз и другие) [13-15].

5. Совмещение различных процессов в одном аппарате (использование тепла экзотермических реакций для компенсации затрат на испарение в колонне, рекуперация тепла продуктов разделения, направленная на подогрев питания).

6. Очистка теплоносителей от вредных примесей [16-18].

Во второй главе бакалаврской работы описан технологический процесс установки выделения этан-пропановой фракции из широкой фракции легких углеводородов, а также приведен обзор систем моделирования, разработка модели и оценка влияния технологических параметров.

Схема процесса состоит из следующих ключевых систем и аппаратов:

1. Колонна ректификации – разделяет ШФЛУ на этан-пропановую фракцию (ЭПФ) и кубовый остаток (С4+);
2. Система подогрева сырья и охлаждения продуктов;
3. Система контроля и автоматизации, регулирующие температуру и расходы;

Процесс газодифракционирования основан на разделении компонентов по температурам кипения (ректификация):

- сырьё (ШФЛУ) поступает в колонну после подогрева;
- в колонне К-1 происходит разделение: лёгкие фракции (этан, пропан) поднимаются вверх и конденсируются в дефлегматоре, тяжёлые фракции (С4+) стекают в низ колонны и выводятся как кубовый продукт;
- флегмовое число регулирует качество дистиллята: часть конденсата возвращается в колонну, повышая чистоту ЭПФ;
- теплообмен обеспечивается рекуператором (утилизация тепла) и кипятивником (дополнительный нагрев).

В настоящее время инженерам-технологам доступно большое число программных средств моделирования химико-технологических процессов нефтегазовой отрасли.

Современные методы моделирования ректификационных колонн позволяют: оптимизировать конструкцию и режимы работы, снижать энергозатраты и повышать чистоту продуктов, использовать цифровые модели для прогнозирования поведения колонн.

Во второй главе также приводились исходные данные для проектирования, а именно: состав подаваемого сырья, основные параметры работы блока колонны, конструктивные параметры колонны, проектные значения получаемых продуктов верха и куба колонны, отображенные в материальном балансе.

Для исследования эффективности выделения этан-пропановой фракции из ШФЛУ в работе рассматривалось влияние следующих параметров на работу колонны:

- влияние флегмового числа на выход фракции основывается на том, повышение флегмового числа свыше исходного значения является нецелесообразным, поскольку не приводит к существенному улучшению состава дистиллята, но при этом снижает его выход, что экономически невыгодно;
- изменение числа теоретических тарелок в данных условиях является технологически нецелесообразным, так как не приводит к существенному улучшению разделения при одновременном уменьшении выхода целевого продукта;
- повышение температуры подаваемого сырья вызывает увеличение выхода верхнего продукта, но его состав не соответствует требуемым технологическим нормам.

С целью модернизации процесса выделения этан-пропановой фракции из ШФЛУ предлагается установка высокоэффективных тарелок семейства VGPlus с сегментными переливными карманами, выпускаемые фирмой SulzerChemtech [19].

Конструкция таких тарелок сочетает в себе усовершенствованную барботажную зону и модифицированный переливной карман повышенной производительности и обладает КПД, равным 0,71. Данное усовершенствование привело к существенному изменению конструкции колонны за счет уменьшения числа теоретических тарелок. В ходе проектирования была приведена сравнительная характеристика молярного содержания компонентов верха и низа колонны в зависимости от применяемого контактного устройства.

На основании представленных данных проведен расчет ключевых показателей эффективности модернизации:

1. Увеличение содержания пропана в дистилляте;
2. Полное устранение пропана в кубовом остатке;
3. Снижение энерго- и металлоемкость конструкции аппарата за счет уменьшения числа тарелок без потери эффективности выделения этан-пропановой фракции из углеводородного сырья.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам выпускной квалификационной работы были сделаны следующие выводы:

1. Разработана математическая модель колонны выделения этан-пропановой фракции из широкой фракции легких углеводородов, а также проверена на адекватность.

2. С применением разработанной модели проведен ряд экспериментов по исследованию влияния различных параметров на эффективность работы колонны. Установлено, что:

- флегмовое число имеет оптимальный диапазон, за пределами которого дальнейшее увеличение не улучшает качество разделения, но снижает выход дистиллята и повышает энергозатраты;

- число теоретических тарелок в исследованном диапазоне не оказывает значимого влияния на чистоту этан-пропановой фракции, а уменьшение их количества не приводит к отсутствию пропана в кубовом остатке;

- температура подачи сырья должна поддерживаться на уровне не выше изначального, так как ее увеличение ухудшает качество продуктов.

3. Применение более эффективных контактных устройств может позволить снизить энерго- и металлоемкость конструкции аппарата за счет уменьшения числа тарелок без потери эффективности выделения этан-пропановой фракции из углеводородного сырья.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Костин А. А. Популярная нефтехимия / А. А. Костина – М. : Эксмо, 2011. – 96 с.
- 2 ГОСТ Р 53521-2009 Переработка природного газа. Термины и определения. – М. : Стандартинформ. 2009. – 16 с.
- 3 Тараканов Г. В. Основы технологии переработки природного газа и конденсата: учебное пособие / Г. В. Тараканов, А. К, Мановян. – 2-е изд., Астрахань : Изд-во АГТУ, 2010. – 192 с.
- 4 Технические условия «Фракция широкая легких углеводородов, марки А, Б» : ТР 38.101524-2015
- 5 Эрих В. Н. Химия и технология нефти и газа / В. Н. Эрих, М. Г. Расина, М. Г. Рдин. – 2-е изд., перераб. – Л. : Химия, 1977. – 424 с.
- 6 Александров И. А. Ректификационные и абсорбционные аппараты. Методы расчета и основы конструирования / И. А. Александров. – 3-е изд., перераб. – М. : Химия, 1987. – 280 с.
- 7 Фролов В. Ф. Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии» / В. Ф. Фролов. СПб. : Химиздат, 2003 – 608 с.
- 8 Ахметов С. А. Технология и оборудование процессов переработки нефти и газа : учебное пособие / С. А. Ахметов, М. И. Баязитов, И. Р. Кузеев. – Санкт-Петербург : Недра, 2006. – 868 с.
- 9 Чернобыльский И. И. Машины и аппараты химических производств. Изд. 3-е, перераб. и доп. / И. И. Чернобыльский, А. Г. Бондарь, Б. А. Гаевский и др. М. : Машиностроение, 2008. – 456 с.
- 10 Валиуллин И. И. Повышение эффективности колонного оборудования (ГФУ) / И. И. Валиуллин // Вестник науки и образования. – 2017. – Т. 1, № 11. С. 19-29.
- 11 Тетельмин В. В. Нефтегазовое дело. Полный курс: учебное пособие / В.В. Тетельмин, В.А. Язев. – Долгопрудный : Изд-во Интеллект, 2009. – 800 с.
- 12 Чуракаев А. М. Переработка нефтяных газов: учебник для рабочих / А. М. Чуракаев. – М. : Недра, 1983. – 279 с.
- 13 Башаров М. М., Лаптев А. Г. Энергосбережение на ректификационных установках в производстве фенола и ацетона / М. М. Башаров, А. Г.Лаптев // Вестник технологического университета. – 2014. – №4. С. 52.
- 14 Лаптев А. Г. Модернизация термических деаэраторов на ТЭЦ / А. Г. Лаптев, И. Ю. Силов, А. Н. Долгов и др. // Энергосбережение и водоподготовка. – 2013. – № 2 (82). С. 14.
- 15 Лаптев А. Г. Повышение эффективности установок газоразделения в производстве этилена / А. Г. Лаптев, М. И. Фарахов, М. М. Башаров // Химическое нефтегазовое машиностроение. – 2014. – № 8. С. 27.

16 Лаптев А. Г. Основы расчета и модернизация тепломассообменных установок в нефтехимии. / А. Г. Лаптев, М. И. Фарахов, Н. Г. Минеев // – Казань: Казан.гос. энерг. ун-т, 2010. – 574 с.

17 Башаров М. М. Модернизация промышленных установок разделения смесей в нефтегазохимическом комплексе / М. М. Башаров, Е. А. Лаптева, под ред. Лаптева А. Г. – Казань : Отечество, 2013. – 293 с.

18 Башаров М. М. Очистка газов от дисперсной фазы в нефтегазохимическом комплексе и энергоресурсосбережение / М. М. Башаров, М. М. Тараскин, под ред. Лаптева А. Г. – Казань : Отечество, 2014. – 206 с.

19 Современные тарельчатые устройства [Электронный ресурс] / А. А. Иванов. URL:<https://tisys.ru/upload/uf/89a/Современные%20тарельчатые%20устройства.pdf> (дата обращения 10.05.2025)