

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Кафедра нефтехимии и техногенной безопасности

**Разработка ректификационной колонны и выбор режима  
разделения изобутан-бутановой фракции**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 431 группы

направления 18.03.01 «Химическая технология»

Института химии

Гончаренко Антона Михайловича

Научный руководитель

доцент, к. х. н.

должность, уч. ст., уч. зв.

подпись, дата

И. А. Никифоров

инициалы, фамилия

Заведующий кафедрой

профессор, д. х. н.

должность, уч. ст., уч. зв.

подпись, дата

Р. И. Кузьмина

инициалы, фамилия

Саратов 2019

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Ректификационные колонны являются одними из основных аппаратов в химической технологии. Несмотря на то, что они применяются уже очень давно, до сих пор ежегодно появляются исследовательские научные работы, направленные на то чтобы, во-первых, повысить эффективность ректификационных аппаратов, во-вторых, понять, какие факторы влияют на эффективность процесса так, чтобы при необходимости можно было точно воздействовать на эти факторы. Таких параметров очень много, а их взаимосвязи достаточно сложные.

Выявление этих факторов и их влияния друг на друга и, как самое важное, повышение эффективности работы колонны, что достижимо либо изменением конструкций колонны, либо изменением режима работы, остается в настоящее время актуальной задачей.

Для бакалаврской работы выбран технологический процесс разделения широкой фракции легких углеводородов, а именно колонна ректификации изобутан-бутановой фракции.

**Цель работы:** разработка ректификационной колонны и технологических режимов ее работы для получения высокочистых изобутановой и бутановой фракций.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

- 1) изучены конструкции перспективных контактных устройств, которые могут быть применены в целях модернизации процесса ректификации;
- 2) рассмотрены параметры, влияющие на качество получаемых продуктов;
- 3) произведены моделирование и расчет ректификационной колонны, предназначенной для разделения изобутан-бутановой фракции, и представлены несколько технологических режимов работы аппарата с возможностью получения товарных фракций различных категорий качества.

Литературный обзор на тему бакалаврской работы включает в себя: основные сведения и понятия о процессе ректификации; приведение

современных патентных изобретений контактных массообменных устройств; детальное рассмотрение факторов, оказывающих влияние на эффективность работы ректификационных аппаратов.

Расчёт и моделирование процесса разделения изобутан-бутановой фракции, а также выявление зависимостей между принципиальными режимными параметрами ректификации осуществлялись с помощью пакета моделирующих программ ChemCad.

**Структура бакалаврской работы.** Бакалаврская работа включает в себя обозначения и сокращения, введение, 4 раздела, 6 подразделов, заключение, список использованных источников и приложения. Выпускная квалификационная работа изложена на 45 листах, содержит 5 таблиц и 32 рисунка. Разделы:

- 1 Основы ректификации (включая 2 подраздела);
- 2 Факторы, влияющие на эффективность (включая 2 подраздела);
- 3 Описание технологического процесса блока разделения изобутан-бутановой фракции;
- 4 Разработка колонны и выбор режима ведения процесса (включая 2 подраздела).

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Первый раздел** посвящен теории ректификации, даны понятия и определения. Описаны принципы осуществления массообмена между контактирующими фазами, разобран принцип работы ректификационной колонны, перечислены основные параметры процесса, влияющие на эффективность разделения смесей, приведена принципиальная схема ректификационной установки.

Также, приведена классификация массообменных аппаратов: по способу организации контакта фаз (плёночные, насадочные, тарельчатые); в зависимости от рабочего давления (работающие под давлением, атмосферные и вакуумные). [1] Описан принцип работы массообменной тарелки (секции) в колонне.

Во **втором разделе** рассмотрены патентные изобретения конструкций контактных массообменных устройств:

- чешуйчато-клапанная тарелка с трапециевидными отверстиями и установленными в них плоскими клапанами, ширина крышки которых сужена в направлении к сливной перегородке, чем обеспечивается выход парового потока под углом к потоку жидкости и достигается частичная гидравлическая компенсация прямоточной составляющей скорости парового потока [2];
- клапан (круглый или прямоугольной формы) с двумя вертикальными ножками, которые снабжены ограничителями подъема, выполненными в виде симметричных лапок. В зоне соединения лапок с ножками, в углах сгиба, поперечное соединение лапок и ножек уменьшено на  $1/4$  их ширины, а длина лапок  $L$  в развернутом виде составляет  $(0,7 \div 0,8) \cdot D$ , где  $D$  – диаметр или ширина отверстия на полотне клапанной тарелки [3];
- перекрестноточная ситчатая тарелка с отверстиями, образованными выдавливанием из полотна фигурных барботирующих шляпок, удерживаемых двумя ножками, разделяющими шляпку на две части [4].

Проведен литературный обзор факторов, влияющих на эффективность разделения. Об эффективности работы колонны судят по составам и концентрациям конечных продуктов. За эффективность колонны принимают отношение числа теоретических ступеней разделения к числу действительных. Это так называемый коэффициент полезного действия (КПД) колонны.

Существующие в настоящее время формулы и зависимости для определения КПД тарелок и колонн получены путем анализа большого числа экспериментальных данных, и, как следствие, справедливы только для конкретных КМУ и разделяемых смесей, либо получены обобщением опыта эксплуатации определенного класса массообменных аппаратов. [5] Однако, они могут быть применены для приближенных расчетов, проведения научно-исследовательских работ, в учебно-методических целях или для ознакомления.

Эффективность (сама величина КПД) может быть рассчитана по эмпирическим соотношениям:

$$E = 0,47(\mu_{ж}\alpha)^{-0,245} \left(\frac{L}{G}\right)^{0,3} 10^{0,3h_{сп}}, \quad (1)$$

где  $\mu_{ж}$  – динамическая вязкость жидкости, Па · с;

$\alpha$  – коэффициент относительной летучести;

L – расход потока жидкости, кг/с;

G – расход потока пара, кг/с;

$h_{сп}$  – высота сливной перегородки тарелки, м;

$$E = 0,316F_{св}^{-0,25} h_{сп}^{0,25} \left(\frac{\nu_{ж}}{D_{ж}}\right)^{0,143}, \quad (2)$$

где  $F_{св}$  – площадь свободного сечения тарелки, доли единицы;

$\nu_{ж}$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;

$D_{ж}$  – коэффициент диффузии в жидкости, м<sup>2</sup>/с. [6]

Однако в реальных условиях параметрами процесса, влияющими на эффективность (и даже интенсивность) разделения, являются размеры и конструктивные особенности КМУ, свойства разделяемых веществ и образуемых ими смесей, гидродинамический режим потоков фаз на тарелке,

условия проведения ректификации процесса и другие. Поэтому определение как КПД отдельно взятой тарелки, так и общего КПД всей колонны является сложной и актуальной задачей.

Далее приводятся примеры величин параметров, влияющих на режим ведения процесса ректификации. Зависимость эффективности работы клапанных тарелок от количества клапанов и их массы выражается в виде:

$$S_{\text{кл}} \frac{\rho_{\text{г}}}{2} \left( \frac{\omega_{\text{к}} S_{\text{к}}}{2\pi R_{\text{кл}} h n} \right)^2 - \rho_{\text{ж}} g h S_{\text{кл}} - m_{\text{кл}} g = 0, \quad (3)$$

где  $\rho_{\text{г}}$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;

$\omega_{\text{к}}$  – скорость газа в сечении колонны, м/с;

$S_{\text{к}}$  – площадь свободного сечения колонны, м<sup>2</sup>;

$R_{\text{кл}}$  – радиус клапана, м;

$h$  – высота подъема клапана, м;

$n$  – количество клапанов;

$\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$m_{\text{кл}}$  – масса клапана. [7]

При расчете эффективности разделения по степени извлечения компонента  $\phi$  важным параметром является коэффициент кинематической турбулентной вязкости:

$$v_{\text{т}} = 1,1 \frac{(u_{\text{ж}}^*)^4}{\varepsilon}, \quad (4)$$

где  $u_{\text{ж}}^*$  – динамическая скорость жидкости, м/с;

$\varepsilon$  – энергия газа ключевого компонента, диссипируемая в жидкости, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>. [8]

**В третьем разделе** представлено описание технологического процесса блока разделения изобутан-бутановой фракции.

Сырье – ШФЛУ – подается в колонну К-1, где отделяется этан-пропановая фракция, которая отправляется на дальнейшее разделение в К-6 или выводится с установки. Кубовый продукт колонны К-1 – смесь углеводородов С<sub>4</sub> и выше – поступает в качестве питания в колонну К-2, где из смеси выделяется дистиллят

– изобутан-бутановая фракция, – а кубовая жидкость – смесь углеводородов  $C_5$  и выше – выводится и отправляется на ректификацию в К-4 или выводится с установки.

Разделение изобутан-бутановой фракции осуществляется в колоннах К-3/1 и К-3/2, которые являются частями одной так называемой «разрезной колонны». Косвенной задачей работы является выяснить, возможно ли проводить процесс в одной цельной колонне адекватных габаритов.

**Четвёртый раздел** представляет собой поэтапное описание алгоритма расчета колонны разделения фракции  $C_4$ .

Исходные данные для расчёта:

- содержание  $i-C_4H_{10}$  в изобутановой фракции не менее 98,0% масс. (марка высшая) [9];
- содержание  $n-C_4H_{10}$  во фракции  $n$ -бутана не менее 98,6% масс. (марка высшая) [10];
- $T$  верха колонны: не более 60 °С;
- $T$  низа колонны: не более 80 °С;
- $P$  верха колонны: не более 7,0 кгс/см<sup>2</sup>;
- $R_{\text{оцен}} = 10...14$ ;
- $T_{\text{кип}}^{\text{питан}} = 36...63$  °С.

Первоначально был проведён приближённый расчет и определены ЧТТ и  $R$  и их взаимосвязь. С повышением  $P$  увеличивается ЧТТ, необходимых для достижения требуемой степени разделения исходной смеси. А поскольку с увеличением числа тарелок в колонне увеличивается ее высота, то при моделировании процесса при повышенном давлении следует учитывать экономический аспект проектирования будущей колонны, затрагивающий стоимость материала на изготовление корпуса, опор и т. д. Также потребуются соответствующие насосы с большими напором и мощностью, способные доставлять технологические потоки на достаточно большую высоту.

Результаты приближенного расчета служат условием для строго расчета. Полученные значения тепловых нагрузок теплообменников позволяют вывести зависимость  $q_{ТО} = f(\text{ЧТТ})$ . С увеличением ЧТТ уменьшается абсолютное значение количества теплоты, передаваемого от теплоносителя к технологическому потоку: в случае дефлегматора с целью полностью сконденсировать пары потока, выходящего с верха колонны; в случае кипятильника с целью подогреть циркулирующую кубовую жидкость. Следовательно, чем больше тарелок в колонне, тем с меньшими расходами необходимо подавать теплоносители в соответствующие теплообменники: в кипятильник – греющий пар, в дефлегматор – хладагент.

Из всей серии расчетов (по результату модуля строгого расчета) был выбран оптимальный режим работы колонны:

- $T_{\text{кип}}^{\text{питан}} = 51,17 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;
- $P = 5,0 \text{ кгс/см}^2$ ;
- $T_{\text{верха}} = 43,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;
- $T_{\text{низа}} = 56,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;
- $\text{ЧТТ} = 72$ ;
- $G_R = 203105 \text{ кг/ч}$ ;
- $R = 13,1317$ ;
- $G_{\Pi} = 204943,15 \text{ кг/ч}$ .

Последний этап расчета – моделирование в динамическом режиме. Исследовано влияние высоты переливной планки на степень разделения изобутан-бутановой фракции. Показатель эффективности – концентрации ключевых компонентов в дистилляте и кубовом остатке.

Результат: с увеличением высоты сливной перегородки концентрация изобутана в дистилляте увеличивается, а концентрация бутана в кубовом остатке уменьшается. То есть, чем выше столб жидкости на тарелке, тем больше должно быть давление пара, чтобы массообмен протекал достаточно эффективно для достижения требуемой степени разделения.



По итогу четвертого раздела представлено несколько технологических режимов работы ректификационной колонны для получения товарной продукции (изобутановая фракция и фракция нормального бутана) различных марок (таблица 1). То есть, изменяя высоту переливной перегородки в колонне, можно воздействовать на качество выпускаемых продуктов. Неизменными для всех режимов, указанных в таблице 2, являются следующие параметры:

- Температура сырьевого потока (питания колонны): 51,17 °С;
- Давление в колонне: 5,0 кгс/см<sup>2</sup>;
- Температура верха колонны: 43,2 °С;
- Температура низа колонны: 56,5 °С;
- Общий КПД колонны: 0,7;
- Число тарелок – 72 шт.

Таблица 1 – Технологические режимы процесса разделения изобутан-бутановой фракции с получением продуктов разных марок

| Режим проведения процесса        | $h_{сп} = 0,15$ м<br>$G_F = 45286$ кг/ч<br>$R = 6,95$ | $h_{сп} = 0,19$ м<br>$G_F = 45038$ кг/ч<br>$R = 7,66$ | $h_{сп} = 0,27$ м<br>$G_F = 49206$ кг/ч<br>$R = 14,06$ |
|----------------------------------|---|---|--|
| Марка изобутановой фракции       | «Б»   | «Б»   | «А»  |
| Марка фракции нормального бутана | «Б»   | «В»   | «В»  |

**Заключение.** В данной бакалаврской работе рассмотрены основы и особенности такого технологического процесса, как ректификация, представлены современные патентные изобретения КМУ, которые могут быть в перспективе использованы в химической технологии, нефтепереработке и нефтехимии. В литературном обзоре на обозначенную тему приведены факторы, влияющие на эффективность массообмена.

Экспериментально выявлены взаимосвязи различных технологических параметров, таких как флегмовое число, давление, число теоретических тарелок, высота сливной перегородки, тепловые нагрузки дефлегматора и кипятильника.

Результатом работы служит колонна разделения изобутан-бутановой фракции, в которой ректификация осуществляется в нескольких разных режимах, позволяющих получать товарные продукты разных категорий.

#### **Выводы:**

1. Проведен расчет колонны, обеспечивающей ректификационное разделение изобутан-бутановой фракции, установлено, что для обеспечения заданной степени разделения и производительности необходима колонна, имеющая 72 теоретические тарелки. Таким образом, при повышении КПД реальной тарелки до 0,8-0,9 появится возможность упростить конструкцию установки, заменив две отдельные колонны на одну цельную.
2. Исследовано влияние различных факторов на ректификацию изобутан-бутановой фракции:  $T$ ,  $P$ ,  $R$ ,  $q_{то}$ ,  $ЧГТ$ ,  $h_{сп}$ , установлено, что на существующей колонне возможно проводить ректификацию с получением продуктов с различной степенью чистоты.
3. Предложено несколько режимов работы колонны, позволяющих получать бутан и изобутан различных торговых марок, таким образом, появляется возможность реагировать на меняющуюся рыночную обстановку.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Поникаров, И. И. Машины и аппараты химических производств и нефтегазопереработки [Электронный ресурс] : учебник / И. И. Поникаров, М. Г. Гайнуллин. – Электрон. дан. – Санкт-Петербург : Лань, 2018. – 604 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/103194>. – Загл. с экрана. Яз. рус.
- 2 Пат. 2522072 Российская Федерация. Чешуйчато-клапанная тарелка / Р. Р. Везиров, И. В. Сахаров. – Заявка № 2012111918/05 от 27.03.2012 ; опубл. 10.07.2014, Бюл. № 19.
- 3 Пат. 2453353 Российская Федерация. Контактный элемент клапанной тарелки и способ монтажа контактного элемента / М. И. Фарахов [и др.] – Заявка № 2011100341/05 от 11.01.2011 ; опубл. 20.06.2012, Бюл. № 17.
- 4 Пат. 2482898 Российская Федерация. Колонна с контактным устройством тарельчатого типа / И. А. Мнушкин, Э. С. Гасанов. – Заявка № 2011142724/05 от 21.10.2011 ; опубл. 27.05.2013, Бюл. № 15.
- 5 Мерзляков, С. А. Эффективность тарельчатых аппаратов разделения углеводородов на основе гидродинамической аналогии : автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. А. Мерзляков. – Казань, 2013. – 17 с.
- 6 Генералов, М. Б. Машиностроение. Энциклопедия. В 40 т. Т. 12. Машины и аппараты химических и нефтехимических производств / М. Б. Генералов [и др.] ; под общ. ред. М. Б. Генералова ; ред. совет : К. В. Фролов (пред.) [и др.] – М. : Машиностроение, 2004 – 832 с.
- 7 Елизаров, Д. В. Выбор оптимальных конструктивных параметров ситчатых и клапанных тарелок ректификационных аппаратов / Д. В. Елизаров, В. В. Елизаров, С. А. Мерзляков // Вестн. Казан. технол. ун-та. – 2013. – Т. 16, № 12. – С. 187-190.
- 8 Мерзляков, С. А. Математическое моделирование и оценка массопереноса в барботажном слое по степени извлечения компонентов / С. А. Мерзляков, Д. В. Елизаров, В. И. Елизаров // Вестн. Казан. технол. ун-та. – 2011. – Т. 14, № 19. – С. 199-206.

9 ТУ 0272-025-00151638-99 Фракция изобутановая.

10 ТУ 0272-026-00151638-99 Фракция нормального бутана.