

**ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ/PROCESSES AND DEVICES OF CHEMICAL TECHNOLOGIES**DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.33> EDN: [HPHBBS](#)**ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ БУТАН-БУТИЛЕНОВОЙ ФРАКЦИИ**

Научная статья

Серебрякова Е.В.^{1,*}, Попов С.В.²¹ORCID : 0009-0003-8531-4809;²ORCID : 0000-0003-0533-9049;^{1,2} Самарский государственный технический университет, Новокуйбышевский филиал, Самара, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (serebryakova_1967[at]inbox.ru)

Аннотация

Увеличение глубины переработки нефти на современных нефтеперерабатывающих предприятиях влечет за собой рост объемов сжиженных углеводородных газов, включая бутан-бутиленовую фракцию (ББФ). Применяемые в настоящее время технологии использования углеводородов ББФ (алкилирование, изомеризация бутена-1, получение МТБЭ и т.д.) не обеспечивают рациональное использование её потенциала, что приводит к необоснованным потерям ценного углеводородного сырья и снижению общей рентабельности перерабатывающих процессов. В связи с этим целесообразно концентрирование индивидуальных углеводородов предварительной ректификацией ББФ и последующим их использованием в нефтехимических процессах. С этой целью в работе выполнено исследование двух схем ректификации ББФ — системы из трех простых колонн и технологической схемы колонны с разделительной стенкой (DWC). Вычислительный эксперимент реализован в специализированной программной среде UniSim Design. Расчёты показали, что в каждой из рассмотренных схем достигается возможность фракционирования ББФ на практически чистые компоненты изобутан, н-бутан и смесь транс-2-бутена и цис-2-бутена, присутствие которых в выделенных целевых фракциях составляет 98,1%, 98,7%, 95,2% и 100% соответственно от их номинального содержания в ББФ, что указывает на практическое отсутствие наложения фракций. Применение колонны DWC является наиболее предпочтительным, так как в этом варианте экономия тепла достигает 22%, потребность в холодильной мощности уменьшается на 19%, а в схеме присутствует меньшее количество основных и дополнительных аппаратов по сравнению с трех колонной схемой. Предлагаемое использование колонны с разделительной стенкой является быстро окупаемым и может рассматриваться как перспективное решение для промышленного внедрения.

Ключевые слова: каталитический крекинг, бутан-бутиленовая фракция, ректификация, колонна с разделительной стенкой, моделирование, UniSim Design.

INCREASING THE TECHNOLOGICAL EFFICIENCY OF THE USE OF BUTANE-BUTYLENE FRACTION COMPONENTS

Research article

Serebryakova E.V.^{1,*}, Popov S.V.²¹ORCID : 0009-0003-8531-4809;²ORCID : 0000-0003-0533-9049;^{1,2} Samara State Technical University branch in Novokuibyshevsk, Samara, Russian Federation

* Corresponding author (serebryakova_1967[at]inbox.ru)

Abstract

Increased oil refining capacity at modern oil refineries leads to an increase in the volume of liquefied hydrocarbon gases, including butane-butylene fraction (BBF). The technologies currently used for BBF hydrocarbons (alkylation, isomerisation of butene-1, production of MTBE, etc.) do not ensure the rational use of its potential, which leads to unnecessary losses of valuable hydrocarbon raw materials and a decrease in the overall profitability of refining processes. In this regard, it is advisable to concentrate individual hydrocarbons by preliminary rectification of BBF and their subsequent use in petrochemical processes. To this end, the study examined two BBF rectification schemes: a system of three simple columns and a technological scheme of a divided wall column (DWC). The computational experiment was carried out in the specialised software environment UniSim Design. The calculations showed that each of the studied schemes allows for the fractionation of BBF into practically pure components of isobutane, n-butane and a mixture of trans-2-butene and cis-2-butene, whose presence in the isolated target fractions is 98.1%, 98.7%, 95.2% and 100% of their nominal content in BBF, respectively, indicating a practical absence of fraction overlap. The use of a DWC column is the most preferable option, as it achieves heat savings of up to 22%, reduces the cooling capacity requirement by 19%, and requires fewer main and auxiliary devices compared to a three-column scheme. The proposed use of a divided wall column is quickly amortised and can be regarded as a promising solution for industrial implementation.

Keywords: catalytic cracking, butane-butylene fraction, rectification, divided wall column, modelling, UniSim Design.

Введение

В последние десятилетия глубина переработки нефти демонстрирует рост благодаря модернизации предприятий нефтеперерабатывающей промышленности. Этот процесс обусловлен ужесточением экологических норм, истощением легких месторождений и растущим спросом на высококачественные нефтепродукты. Средняя глубина переработки на современных НПЗ увеличилась до 90–97% на передовых предприятиях, что связано с внедрением технологий гидрокрекинга, каталитического крекинга и переработки тяжелых остатков [1].

Одним из основных процессов переработки тяжелых нефтяных остатков является каталитический крекинг. Именно в этой области наблюдается значительное количество инноваций для оптимизации процесса: создание моделей для прогнозирования, улучшения в конструкции и конфигурации реакторов и регенераторов, модификация катализаторов, сокращение выбросов [2], [3], [4], [5]. Эти новшества позволили повысить эффективность процесса и увеличить глубину переработки нефти. Вместе с этим увеличилось производство сжиженных углеводородных газов и ББФ [6], которая является ценным сырьем для дальнейших нефтехимических процессов.

Технологическим процессом, использующим компоненты ББФ, является изомеризация бутена-1 — его каталитическое преобразование в изобутилен, требующее сырья с содержанием этого реактанта 30–45%. Реакция протекает через кислотно-катализируемый карбокатионный механизм при минимальном присутствии примесей (<0,5% диенов). Современные катализаторы (модифицированные цеолиты, суперкислотные системы) обеспечивают селективность 90–95% по изобутилену, сохраняя молекулярный состав сырья [7]. Разрабатываются и низкотемпературные пути олигомеризации бутена-1 на фосфорной кислоте, позволяющие повысить гибкость в производстве бензина из олефинов [8].

Полученный в процессе изомеризации высокочистый изобутилен служит ключевым сырьем для синтеза метил-трет-бутилового эфира (МТБЭ) — важного кислородосодержащего компонента бензинов. Процесс получения МТБЭ представляет собой жидкофазную этерификацию изобутилена с метанолом на кислотных катализаторах при умеренных условиях. Оптимальное сырьё должно содержать 15–25% изобутилена, при этом предпочтительнее использовать предварительно изомеризованную ББФ с повышенным содержанием $i\text{-C}_4\text{H}_8$ [9]. В качестве катализаторов применяют сульфокатиониты, обеспечивающие выход МТБЭ 90–95% [10]. Современные формованные катализаторы сочетают каталитическую активность с функциями массообменной насадки, повышая эффективность процесса [11].

Другим процессом в переработке C_4 -фракций является получение бутадиена-1,3 — ключевого мономера для синтетических каучуков. Окислительное дегидрирование (ОДГ) бутана и бутенов позволяет эффективно производить бутадиен-1,3 в экзотермическом процессе с выходом 50–70%, используя в качестве сырья ББФ с оптимальным соотношением n -бутана (40–60%) и бутенов (20–30%). В промышленности преимущественно используют VMoO_x -катализаторы с селективностью 60–75% по бутадиену. Альтернативы — ванадаты магния и Fe-цеолиты, а добавка промоторов (Se, P) повышает селективность до 80%. В отличие от классического дегидрирования ОДГ характеризуется пониженным коксообразованием и энергозатратами, что делает процесс перспективным для промышленного масштабирования [12], [13], [14].

Помимо окислительного дегидрирования, ББФ открывает возможности для других перспективных направлений каталитической конверсии. В частности, селективные процессы гидрирования и дегидрирования бутиленов направлены на получение изобутана ($i\text{-C}_4\text{H}_{10}$) и изобутилена ($i\text{-C}_4\text{H}_8$) — ключевого сырья для нефтехимии. Оптимальным сырьем для этих процессов служит та же ББФ, но с несколько иным составом: содержание бутена-1 30–40% и бутена-2 20–30%. Гидрирование на $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -катализаторах (80–120°C, 1–3 МПа) обеспечивает выход изобутана 85–95%, тогда как дегидрирование на $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (550–650°C) даёт 70–90% изобутилена. Важно отметить, что современные катализаторы с промоторами позволяют минимизировать образование побочных продуктов (5–10%), достигая селективности до 95% для гидрирования и 85% для дегидрирования [15], [16].

Параллельно с процессами селективного гидрирования и дегидрирования бутиленов важное значение в переработке ББФ занимает каталитическое алкилирование — принципиально иной класс реакций, направленный на создание высокооктановых компонентов топлив (RON 90÷96) через карбокатионный механизм. Типовое сырьё (ББФ) содержит 40–60% изобутана и 20–30% изобутилена, обеспечивая выход алкилата 85–90% при конверсии 95–98%. Чаще всего используются жидкие катализаторы: серную кислоту (температура реакции 5–10°C, селективность 88–92%) и плавиковую кислоту (20–40°C, 90–94%) [17]. В настоящее время ведутся активные исследования в области применения твёрдых катализаторов преимущественно на основе гетерополикислот [18], [19], [20], [21].

Как отмечено выше, для многих нефтехимических синтезов существенное значение имеет чистота реактантов, являющихся компонентами ББФ. Поиск вариантов фракционирования ББФ продолжает иметь важное промышленное значение.

Мембранное разделение ББФ представляет собой энергоэффективную альтернативу традиционной дистилляции, основанную на селективной проницаемости компонентов через полупроницаемые мембраны под действием градиента давления. В промышленности применяют полимерные (полиимиды, полисульфоны), неорганические (цеолитные, керамические) и гибридные MOF-полимерные мембраны, различающиеся по селективности и термостабильности (до 300°C). Типичная мембрана состоит из ультратонкого селективного слоя (0,1–1 мкм), пористой подложки и армирующей сетки [22]. Процесс позволяет получать концентрат бутенов с чистотой 85–95% (выход 70–85%) и очищенный бутан чистотой 90–98% (выход 60–75%) при умеренных параметрах (1–3 МПа, 30–80°C). Современные разработки сосредоточены на MOF-материалах и комбинированных каталитико-мембранных системах, что на 40–60% снижает энергозатраты по сравнению с дистилляцией при компактности оборудования [23], [24], [25].

Несмотря на высокие энергозатраты (до 60% эксплуатационных расходов) и проблемы с азеотропными смесями, фракционная ректификация ББФ остается основной благодаря надежности. Процесс осуществляется в ректификационных колоннах (до 8 м диаметром) с тарелками или насадкой, обеспечивая получение изобутана, бутена-

1 и изобутилена высокой чистоты. Современные разработки направлены на снижение энергопотребления через тепловую интеграцию, гибридные схемы с мембранным разделением и оптимизацию контактных устройств. Перспективы развития связаны с созданием интегрированных технологических схем, сочетающих преимущества различных методов разделения [26], [27].

Значительная интенсификация процесса фракционирования углеводородов имеет место при использовании колонн с разделительной стенкой (DWC), что делает возможным снизить энергопотребление на величину до 40% и сократить капитальные затраты (за счёт уменьшения числа аппаратов) на 15–40% относительно традиционной схемы разделения [28], [29], [30], [31]. Конструктивно колонна с разделительной стенкой представляет собой аппарат, в котором за счёт одной или нескольких перегородок создаются отдельные технологические зоны, выполняющие функции нескольких традиционных колонн в едином корпусе.

Цель работы — определение наиболее рациональной технологической схемы выделения из ББФ каталитического крекинга компонентов высокой чистоты для их эффективного использования в нефтехимических синтезах.

Методы и принципы исследования

В качестве исходных данных для исследования использован усреднённый промышленный состав ББФ каталитического крекинга, представленный на рисунке 1. Температура кипения входящих в состав ББФ углеводородов показана на рисунке 2.

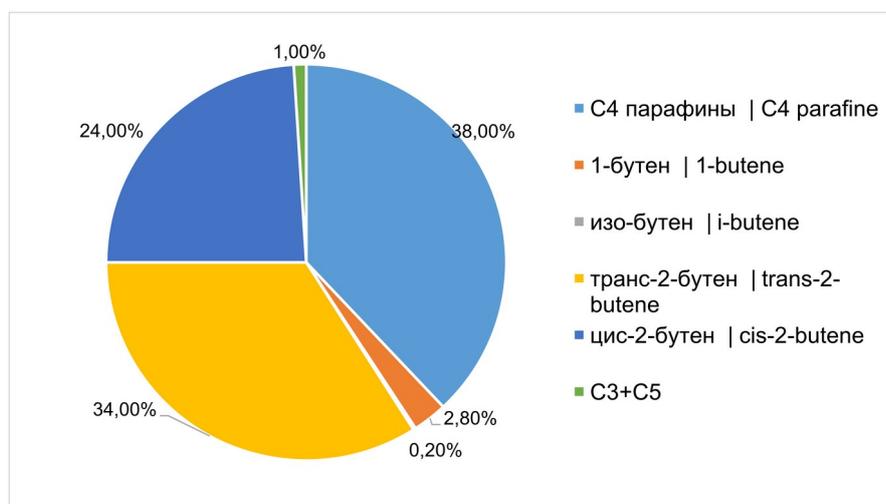


Рисунок 1 - Диаграмма состава ББФ каталитического крекинга
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.33.1>

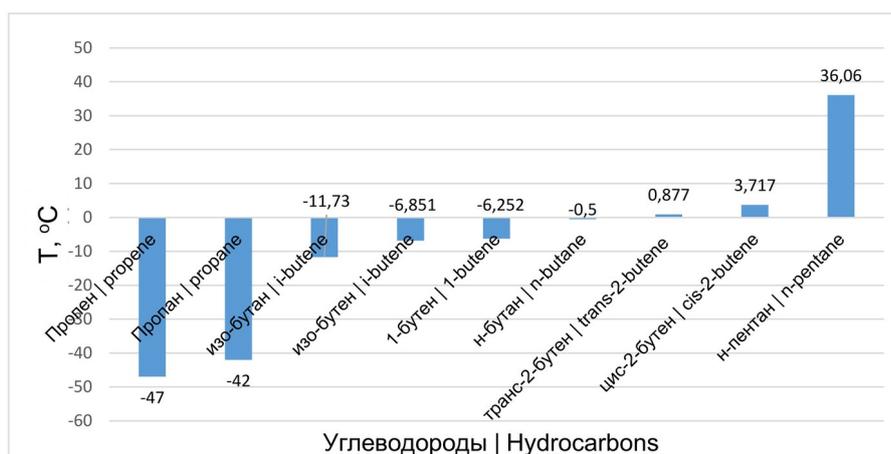


Рисунок 2 - Температура кипения углеводородов ББФ
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.33.2>

Состав исследуемой бутан-бутиленовой фракции характеризуется высоким содержанием как парафиновых, так и олефиновых компонентов. Парафиновая часть составляет порядка 38%, что указывает на значительную долю н-бутана и изобутана. Эти углеводороды, хотя и являются относительно инертными в ряде каталитических процессов, представляют ценность как сырьё для изомеризации и алкилирования, а также могут рассматриваться как отдельный поток, извлекаемый ректификацией. Олефиновые соединения составляют около 61% всей смеси, причём подавляющее

большинство приходится на цис-2-бутен и транс-2-бутен, совокупная концентрация которых достигает 58%, что делает эту целевую фракцию перспективной для процессов селективной переработки, например, изомеризации или олигомеризации. Содержание 1-бутена невысокое и не превышает 2,8%, что ограничивает возможности его целевого выделения, несмотря на значимость данного изомера в синтезе линейных полиолефинов. Изобутен присутствует лишь в следовом количестве (0,2%), поэтому его выделение не имеет промышленной целесообразности. Примеси в виде пропановой и пентановой фракций не превышают 1% и их концентрация недостаточна для оказания заметного влияния на массообменный процесс фракционирования ББФ, поэтому данные компоненты исключены из дальнейшей расчётной схемы.

Анализ направлений применения ББФ показал, что большинство промышленных процессов ориентировано на использование (в качестве реактанта) отдельного углеводорода, а не всей фракции. При этом значительная доля сопутствующих компонентов не вовлекается в реакцию, что приводит к образованию балластных потоков и снижению суммарной эффективности процесса. Кроме того, технологические схемы, как правило, проектируются под строго определённый состав сырья, в связи с чем изменение соотношения углеводородов в ББФ вызывает заметное снижение эффективности их работы.

Для устранения указанных ограничений предлагается проводить предварительную ректификацию ББФ с целью её разделения на более однородные (концентрированные) по углеводородному составу потоки, что позволяет в дальнейшем направлять каждый из них в нефтехимические процессы с максимальным вовлечением целевых компонентов. При этом необходимо отметить, что выделение углеводородов высокой чистоты сопряжено с определёнными трудностями ввиду их очень близких температур кипения (рисунок 2).

Исследования выполнялись с применением моделирующей программной среды UniSim Design. Для расчёта термодинамических свойств компонентов технологических потоков использовалось уравнение состояния Peng-Robinson.

Результаты и обсуждения

С целью концентрирования изобутана, н-бутана и совместно транс-2-бутена и цис-2-бутена рассматриваются следующие технологические варианты ректификации ББФ — схема из трёх ректификационных колонн и схема с использованием DWC. Состав потока, направляемого на фракционирование, представлен в таблице 1.

Таблица 1 - Состав потока ББФ, поступающего на ректификацию

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.33.3>

Компоненты	Содержание, % масс.
изобутан i-butene	10,87
изобутен i-butene	0,20
1-бутен 1-butene	2,87
н-бутан n-butane	26,68
транс-2-бутен trans-2-butene	34,81
цис-2-бутен cis-2-butene	24,57
Итого	100,00

Схема ректификации ББФ из трёх колонн, реализованная в среде Unisim Design, показана на рисунке 3.

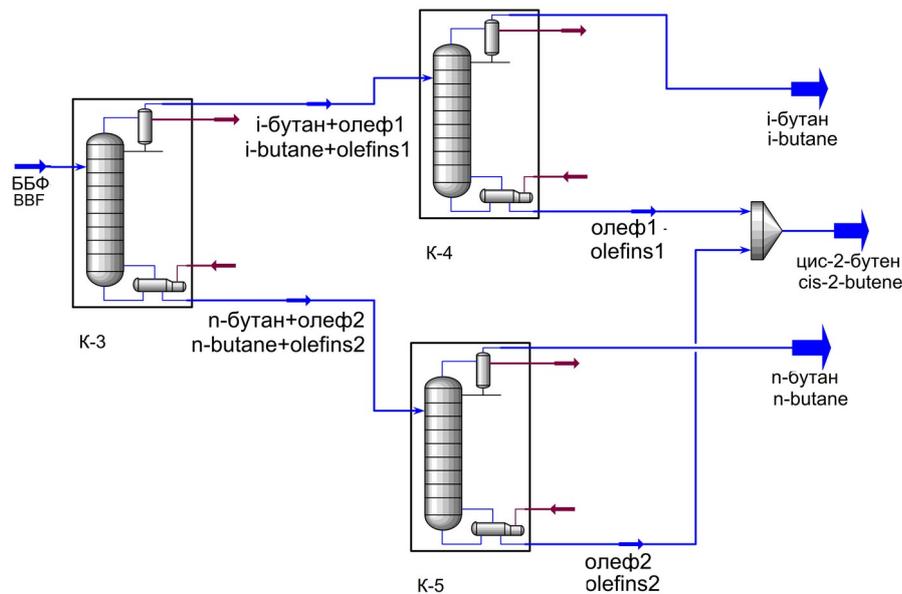


Рисунок 3 - Схема трёх колонн ректификации ББФ
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.33.4>

Колонна К-3 выполняет предварительное разделение ББФ на две группы компонентов, близких по температурам кипения. Дистиллятом отбираются углеводороды (изобутан, изобутен и 1-бутен), выкипающие до н-бутана, а кубовым продуктом являются н-бутан, транс-2-бутен и цис-2-бутен. Далее, колонны К-4 и К-5 проводят более глубокое разделение на концентрированные изобутан, н-бутан и смесь транс-2-бутена и цис-2-бутена.

Такой трёх колонный вариант технологической схемы характеризуется значительными капитальными затратами на изготовление и монтаж колонн, а также высокими энергетическими требованиями на подвод и отвод тепла — в схеме задействованы три ребойлера и три конденсатора.

Существенным улучшением технологической схемы является использование вместо трех ректификационных аппаратов одной колонны с разделительной стенкой DWC (рисунок 4).

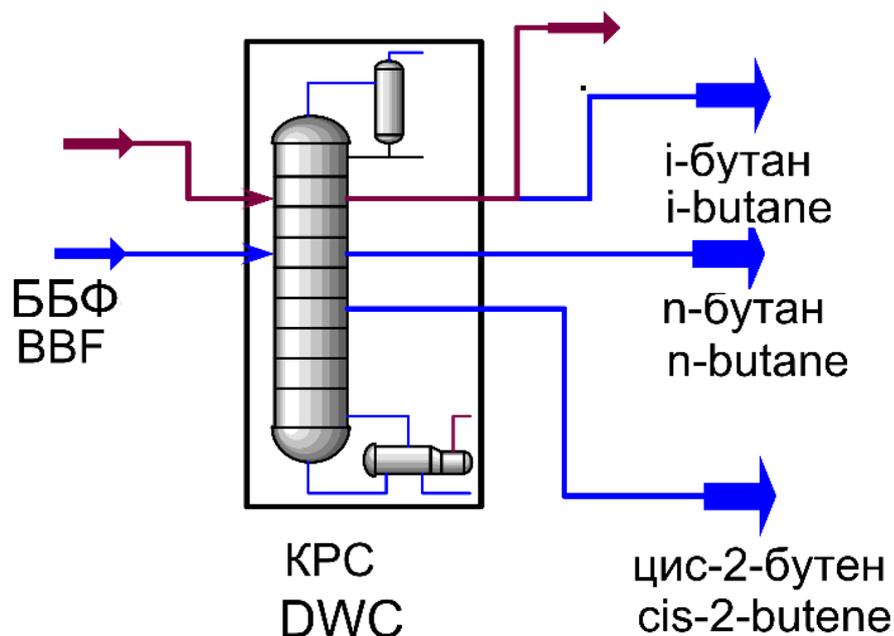


Рисунок 4 - Предлагаемая схема колонны с разделительной стенкой
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.33.5>

В программной среде модель такой колонны представлена как система из четырех взаимосвязанных секций, расположенных в одном корпусе: верхняя секция с конденсатором, нижняя секция с ребойлером, префракционатор с вводом сырья и боковая секция для погона н-бутана (рисунок 5).

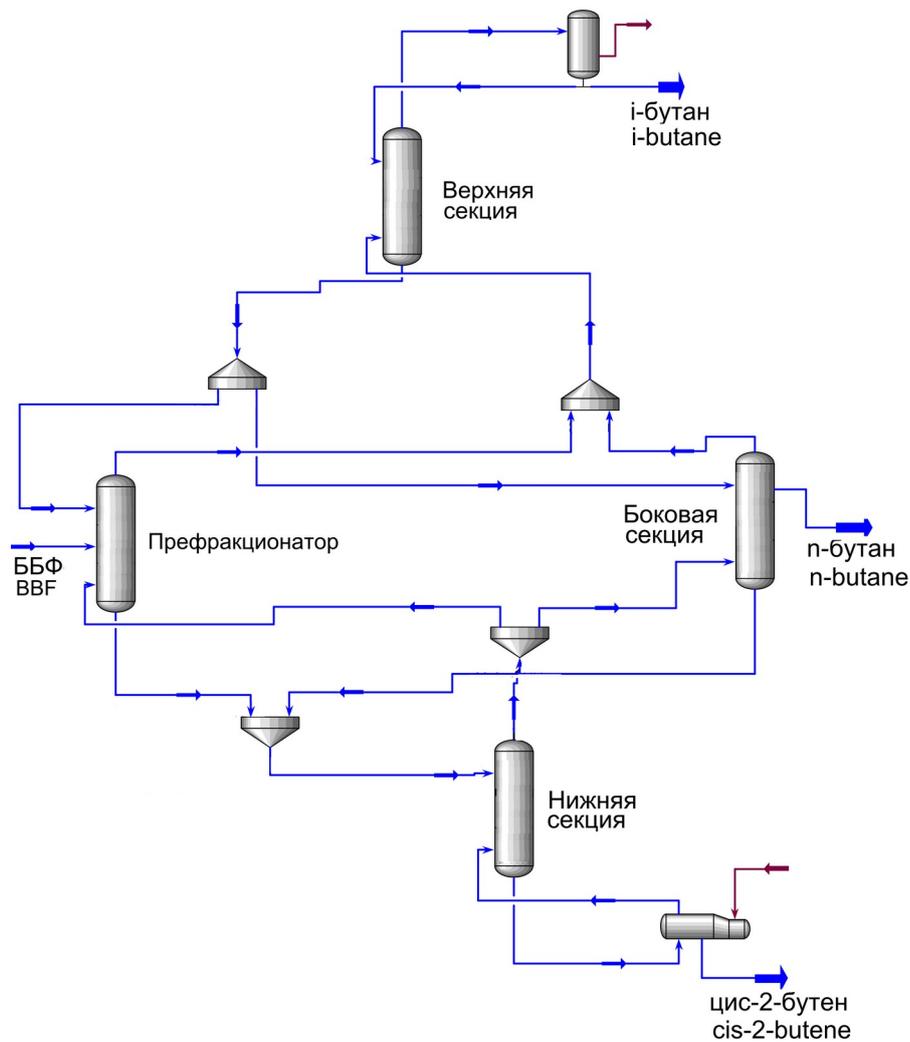


Рисунок 5 - Эквивалентная схема колонны КРС
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.33.6>

В таблице 2 представлены технологические режимы работы аппаратов К-3, К-4 и К-5 трёх колонной системы и колонны DWC предлагаемой схемы, а в таблице 3 сведены компонентные составы получаемых фракций.

Таблица 2 - Технологические режимы аппаратов К-3, К-4, К-5 и колонны DWC

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.33.7>

Параметры	Трёх колонная схема – колонна К- 3	Трёх колонная схема – колонна К- 4	Трёх колонная схема – колонна К- 5	Колонна DWC
Температура конденсатор/ребой лер, °С	27,4 / 48,2	86,6 / 93,1	-0,4 / 20,1	-10,1 / 15,0
Давление верх/куб, кПа	350 / 450	1450 / 1500	101 / 190	100 / 160
Тепловые затраты, кДж/ч	16,45e+7	0,25e+7	47,47e+7	50,07e+7
Затраты на охлаждение, кДж/ч	16,11e+7	0,20e+7	47,25e+7	51,44e+7

Таблица 3 - Компонентный состав получаемых фракций в системе трёх аппаратов и в колонне DWC

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.33.8>

Компоненты	Состав целевых фракций: система 3-х колонн / DWC, % масс.		
	Фракция i-C4	Фракция n-C4	Фракция транс-2-бутен + цис-2-бутен
изобутан i-butane	78,55 / 78,58	следы / 0,67	0,19 / следы
изобутен i-butene	1,41 / 1,41	следы / 0,03	следы / следы
1-бутен 1-butene	19,71 / 20,00	0,19 / 0,53	0,20 / следы
н-бутан n-butane	0,25 / 0,01	93,73 / 92,83	0,97 / 0,58
транс-2-бутен trans-2-butene	0,08 / следы	6,08 / 5,94	56,62 / 57,08
цис-2-бутен cis-2-butene	следы / следы	следы / следы	42,02 / 42,34
Итого	100,0	100,0	100,0

Из таблицы 3 видно, что в каждой из рассмотренных схем достигается возможность фракционирования ББФ на практически чистые компоненты изобутан, н-бутан и смесь транс-2-бутена и цис-2-бутена.

Отметим, что в составе фракционируемого потока ББФ содержание цис-2-бутена составляло 24,57 % масс., а в целевом потоке (фракция транс-2-бутен + цис-2-бутен, таблица 3) концентрация цис-2-бутена достигает значения 42,34 % масс. Учитывая, что цис-изомеры вследствие меньшей термодинамической устойчивости обладают более высокой реакционной способностью в реакциях электрофильного алкилирования по сравнению с транс-бутенами, увеличение их концентрации приводит к возрастанию общей активности фракции. Следовательно, полученное изменение изомерного состава олефинового потока существенно повышает его ценность как сырья для процессов алкилирования и будет способствовать росту выхода целевых продуктов реакции.

Одним из важных технико-экономических показателей, характеризующих работу ректификационной схемы разделения углеводородов, является потребление тепловой (на ребойлерах) и холодильной (на водяных холодильниках) энергии. Из расчетных результатов, приведенных в таблице 2, следует, что технологическая схема с колонной DWC демонстрирует заметное улучшение энергопотребления. Рассчитанный расход тепловой энергии, требуемой для разделения ББФ в колонне DWC, меньше соответствующего суммарного расхода трёх колонной системы и экономия тепла достигает 22%, потребность в холодильной мощности уменьшается на 19%. Сокращение энергозатрат объясняется более эффективным тепловым распределением внутри колонны DWC и выводом из схемы двух кипятильников, двух конденсаторов и другого дополнительного оборудования.

Для оценки перспективности промышленного использования предлагаемого решения с колонной DWC в качестве базового варианта рассмотрена промышленная установка производства алкилата с производительностью по ББФ 100 м³/ч, что соответствует промышленным масштабам и обеспечивает корректность экстраполяции прогнозируемых результатов на реальные условия эксплуатации. В результате ректификации ББФ повышение выхода участвующих в реакции бутиленов на ~17,7% позволяет увеличить единичную мощность реактора и загрузку установки алкилирования и существенно нарастить выпуск высокомаржинального алкилата, что формирует устойчивый финансовый результат и делает предложенное технологическое решение перспективным для промышленного внедрения на действующих нефтеперерабатывающих предприятиях.

Заключение

Для определения целесообразной технологической схемы выделения из ББФ каталитического крекинга концентрированных компонентов изобутана, н-бутана и совместно транс-2-бутена и цис-2-бутена рассмотрены два технологических варианта фракционирования ББФ — схема из трёх ректификационных колонн и схема с использованием DWC. Вычислительным экспериментом показано, что каждая из рассмотренных схем обеспечивает разделение ББФ на практически чистые для промышленного использования компоненты. Вместе с тем, по сравнению со схемой, состоящей из трёх колонн, применение колонны DWC является наиболее предпочтительным, так как в этом варианте экономия тепла достигает 22%, потребность в холодильной мощности уменьшается на 19%, а в схеме присутствует меньшее количество основных и дополнительных аппаратов.

Экономический эффект и экологическая привлекательность использования предлагаемой технологической схемы с колонной DWC основывается на снижении эксплуатационных затрат, повышении выхода ценных фракций (реактантов) для процессов нефтехимического синтеза, сокращении капитальных вложений за счёт уменьшения числа используемых аппаратов, уменьшении объёмов обслуживания и ремонтов.

Предлагаемое использование колонны с разделительной стенкой является быстро окупаемым и может рассматриваться как перспективное решение для промышленного внедрения.

**Конфликт интересов**

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Marinina O. Evaluating the Downstream Development Strategy of Oil Companies: The Case of Rosneft / O. Marinina, A. Tsvetkova, Y. Vasilev [et al.] // Resources. — 2022. — Vol. 11, № 1. — P. 4. — DOI: 10.3390/resources11010004.
2. Evdokimova N.G. Improvement of catalytic cracking for deepening of oil refining / N.G. Evdokimova, T.M. Levina, R.N. Mutallapov [et al.] // Oil and Gas Business. — 2024. — № 6. — P. 135–156. — DOI: 10.17122/ogbus-2024-6-135-156.
3. Nefedov B.K. Modernization of oil refineries as the basis for the development of the Russian oil refining industry in the period of 2010–2020 / B.K. Nefedov // Catalysis in Industry. — 2012. — Vol. 4, № 6. — DOI: 10.1134/S2070050411020127.
4. Clough M. Nanoporous materials forge a path forward to enable sustainable growth: Technology advancements in fluid catalytic cracking / M. Clough, J.C. Pope, L.T.X. Lin [et al.] // Microporous and Mesoporous Materials. — 2017. — Vol. 254. — P. 45–58. — DOI: 10.1016/j.micromeso.2017.03.063.
5. Oloruntoba A. State-of-the-Art Review of Fluid Catalytic Cracking (FCC) Catalyst Regeneration Intensification Technologies / A. Oloruntoba, Y. Zhang, C.S. Hsu // Energies. — 2022. — Vol. 15, № 6. — Art. 2061. — DOI: 10.3390/en15062061.
6. Siddiqui M.A.B. Enhancing the production of light olefins by catalytic cracking of FCC naphtha over mesoporous ZSM-5 catalyst / M.A.B. Siddiqui, A.M. Aitani, M.R. Saeed [et al.] // Topics in Catalysis. — 2010. — Vol. 53, № 19–20. — P. 1387–1393. — DOI: 10.1007/s11244-010-9598-1.
7. Villegas J.I. Skeletal isomerization of 1-butene: A thorough kinetic study over ZSM-22 / J.I. Villegas, M. Kangas, R. Byggningsbacka [et al.] // Catalysis Today. — 2008. — Vol. 133–135, № 1–4. — P. 762–769. — DOI: 10.1016/j.cattod.2007.11.022.
8. de Klerk A. Isomerization of 1-Butene to Isobutene at Low Temperature / A. de Klerk // Industrial & Engineering Chemistry Research. — 2004. — Vol. 43, № 20. — P. 6325–6330. — DOI: 10.1021/ie049585m.
9. Barceló D. Fuel Oxygenates / D. Barceló // The Handbook of Environmental Chemistry. — Heidelberg : Springer, 2007. — Vol. 5R. — 411 p.
10. Collignon F. Liquid phase synthesis of MTBE from methanol and isobutene over acid zeolites and Amberlyst-15 / F. Collignon, R. Loenders, J.A. Martens [et al.] // Journal of Catalysis. — 1999. — Vol. 182, № 2. — P. 302–312. — DOI: 10.1006/JCAT.1998.2366.
11. Luo J. Structured, shaped, or printed single-atom catalysts and their applications / J. Luo, H. Chand, R. Luque [et al.] // Advanced Functional Materials. — 2025. — Vol. 35, № 34. — DOI: 10.1002/adfm.202424514.
12. Albonetti S. Key aspects of catalyst design for the selective oxidation of paraffins / S. Albonetti, F. Cavani, F. Trifiro // Catalysis Reviews — Science and Engineering. — 1996. — Vol. 38, № 4. — P. 413–438. — DOI: 10.1080/01614949608006463.
13. Liu X. Oxidative dehydrogenation of n-butane to butenes on Mo-doped VMgO catalysts / X. Liu, L. Duan, W. Yang [et al.] // RSC Advances. — 2017. — Vol. 7, № 54. — P. 34131–34137. — DOI: 10.1039/C7RA04936F.
14. Soler J. Oxidative dehydrogenation of n-butane in a two-zone fluidized-bed reactor with separate n-butane and oxygen feeds / J. Soler, J.M. López Nieto, J. Herguido [et al.] // Industrial & Engineering Chemistry Research. — 1999. — Vol. 38, № 1. — P. 90–97. — DOI: 10.1021/ie980486g.
15. Yang Q. Tuning butene selectivities by Cu modification on Pd-based catalyst for the selective hydrogenation of 1,3-butadiene / Q. Yang, R. Hou, K. Sun // Journal of Catalysis. — 2019. — Vol. 374. — P. 12–23. — DOI: 10.1021/ie980486g.
16. Luo Y. Chromium oxide supported on Silicalite-1 zeolite as a novel efficient catalyst for dehydrogenation of isobutane assisted by CO₂ / Y. Luo, C. Miao, Y. Yue [et al.] // Catalysts. — 2019. — Vol. 9, № 12. — Art. 1040. — DOI: 10.3390/catal9121040.
17. Олбрайт Л.Ф. Алкилирование. Исследования и промышленное оформление процесса / Л.Ф. Олбрайт, А.Р. Голдсби. — Москва : Химия, 1982. — 336 с.
18. Baronetti G.T. Wells-Dawson heteropolyacid supported on silica: Isobutane alkylation with C₄ olefins / G.T. Baronetti, H.J. Thomas, C.A. Querini // Applied Catalysis A: General. — 2001. — Vol. 217, № 1. — P. 131–141. — DOI: 10.1016/S0926-860X(01)00576-2.
19. Derjani-Bayeh S. Solid catalyst alkylation of C₂–C₃ olefins with isobutane in the presence of hydrogen using a slurry transport reactor-hydrocyclone-regenerator system and PtSO₄/TiZrSiO₂ catalyst. I. Alkylation in continuous pilot plant operation and simulation of a slurry transport reactor-hydrocyclone settler / S. Derjani-Bayeh, R. Galiasso Tailleur, C. Farina [et al.] // Energy & Fuels. — 2018. — Vol. 32, № 2. — P. 1678–1689. — DOI: 10.1021/acs.energyfuels.7b03015.
20. De Jong K.P. Paraffin alkylation using zeolite catalysts in a slurry reactor: chemical engineering principles to extend catalyst lifetime / K.P. De Jong, C.M.A.M. Mesters, D.G.R. Peferoen [et al.] // Chemical Engineering Science. — 1996. — Vol. 51, № 10. — P. 2053–2060. — DOI: 10.1016/0009-2509(96)00062-0.
21. Zhang H. Isobutane/2-butene alkylation reaction catalyzed by Cu-modified RE-X zeolite / H. Zhang, J. Xu, H. Tang [et al.] // Chemical Engineering Journal. — 2019. — Vol. 58, № 22. — DOI: 10.1016/j.cej.2018.09.021.



22. Baker R.W. *Membrane Technology and Applications* / R.W. Baker. — 3rd ed. — Chichester, UK : John Wiley & Sons, 2012. — 592 p.
23. Yang L. Energy-efficient separation alternatives: Metal–organic frameworks and membranes for hydrocarbon separation / L. Yang, S. Qian, X. Wang et al. // *Chemical Society Reviews*. — 2020. — Vol. 49, № 15. — P. 5359–5406. — DOI: 10.1039/C9CS00756C.
24. Sholl D.S. Seven chemical separations to change the world / D.S. Sholl, R.P. Lively // *Nature*. — 2016. — Vol. 532, № 7600. — P. 435–437. — DOI: 10.1038/532435a.
25. Najari S. Mixed matrix membranes for hydrocarbons separation and recovery: a critical review / S. Najari, S. Saeidi, F. Gallucci [et al.] // *Reviews in Chemical Engineering*. — 2021. — Vol. 37, № 3. — P. 363–406. — DOI: 10.1515/revce-2018-0091.
26. *Distillation: fundamentals and principles* / ed. by A. Górak, E. Sorensen. — London : Academic Press, 2014. — 450 p.
27. Caballero J.A. Optimal Design of Heat Pump Assisted Distillation Sequences / J.A. Caballero, J.A. Labarta, Z. Mekidiche-Martínez // *Computer Aided Chemical Engineering*. — Amsterdam : Elsevier, 2024. — Vol. 53. — P. 1255–1260. — DOI: 10.1016/B978-0-443-28824-1.50210-6.
28. Yildirim Ö. Dividing wall columns in chemical process industry: a review on current activities / Ö. Yildirim, A.A. Kiss, E.Y. Kenig // *Separation and Purification Technology*. — 2011. — Vol. 80, № 3. — P. 403–417. — DOI: 10.1016/j.seppur.2011.05.009.
29. Dejanović I. Dividing wall column – A breakthrough towards sustainable distilling / I. Dejanović, L. Matijašević, Ž. Olujic // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. — 2010. — Vol. 49, № 6. — P. 559–580. — DOI: 10.1016/j.cep.2010.04.001.
30. Chen Z. Classification and Comparison of Dividing Walls for Distillation Columns / Z. Chen, R. Agrawal // *Processes*. — 2020. — Vol. 8, № 6. — Art. 699. — DOI: <https://doi.org/10.3390/pr8060699>.
31. Vazzoler A. An introduction to Dividing wall columns, design and modelling (DWC) / A. Vazzoler // *Journal of Engineering Research*. — 2022. — Vol. 2, № 2. — P. 1–27. — DOI: 10.22533/at.ed.317222230014.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Marinina O. Evaluating the Downstream Development Strategy of Oil Companies: The Case of Rosneft / O. Marinina, A. Tsvetkova, Y. Vasilev [et al.] // *Resources*. — 2022. — Vol. 11, № 1. — P. 4. — DOI: 10.3390/resources11010004.
2. Evdokimova N.G. Improvement of catalytic cracking for deepening of oil refining / N.G. Evdokimova, T.M. Levina, R.N. Mutallapov [et al.] // *Oil and Gas Business*. — 2024. — № 6. — P. 135–156. — DOI: 10.17122/ogbus-2024-6-135-156.
3. Nefedov B.K. Modernization of oil refineries as the basis for the development of the Russian oil refining industry in the period of 2010–2020 / B.K. Nefedov // *Catalysis in Industry*. — 2012. — Vol. 4, № 6. — DOI: 10.1134/S2070050411020127.
4. Clough M. Nanoporous materials forge a path forward to enable sustainable growth: Technology advancements in fluid catalytic cracking / M. Clough, J.C. Pope, L.T.X. Lin [et al.] // *Microporous and Mesoporous Materials*. — 2017. — Vol. 254. — P. 45–58. — DOI: 10.1016/j.micromeso.2017.03.063.
5. Oloruntoba A. State-of-the-Art Review of Fluid Catalytic Cracking (FCC) Catalyst Regeneration Intensification Technologies / A. Oloruntoba, Y. Zhang, C.S. Hsu // *Energies*. — 2022. — Vol. 15, № 6. — Art. 2061. — DOI: 10.3390/en15062061.
6. Siddiqui M.A.B. Enhancing the production of light olefins by catalytic cracking of FCC naphtha over mesoporous ZSM-5 catalyst / M.A.B. Siddiqui, A.M. Aitani, M.R. Saeed [et al.] // *Topics in Catalysis*. — 2010. — Vol. 53, № 19–20. — P. 1387–1393. — DOI: 10.1007/s11244-010-9598-1.
7. Villegas J.I. Skeletal isomerization of 1-butene: A thorough kinetic study over ZSM-22 / J.I. Villegas, M. Kangas, R. Bygningsbacka [et al.] // *Catalysis Today*. — 2008. — Vol. 133–135, № 1–4. — P. 762–769. — DOI: 10.1016/j.cattod.2007.11.022.
8. de Klerk A. Isomerization of 1-Butene to Isobutene at Low Temperature / A. de Klerk // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. — 2004. — Vol. 43, № 20. — P. 6325–6330. — DOI: 10.1021/ie049585m.
9. Barceló D. Fuel Oxygenates / D. Barceló // *The Handbook of Environmental Chemistry*. — Heidelberg : Springer, 2007. — Vol. 5R. — 411 p.
10. Collignon F. Liquid phase synthesis of MTBE from methanol and isobutene over acid zeolites and Amberlyst-15 / F. Collignon, R. Loenders, J.A. Martens [et al.] // *Journal of Catalysis*. — 1999. — Vol. 182, № 2. — P. 302–312. — DOI: 10.1006/JCAT.1998.2366.
11. Luo J. Structured, shaped, or printed single-atom catalysts and their applications / J. Luo, H. Chand, R. Luque [et al.] // *Advanced Functional Materials*. — 2025. — Vol. 35, № 34. — DOI: 10.1002/adfm.202424514.
12. Albonetti S. Key aspects of catalyst design for the selective oxidation of paraffins / S. Albonetti, F. Cavani, F. Trifiro // *Catalysis Reviews – Science and Engineering*. — 1996. — Vol. 38, № 4. — P. 413–438. — DOI: 10.1080/01614949608006463.
13. Liu X. Oxidative dehydrogenation of n-butane to butenes on Mo-doped VMgO catalysts / X. Liu, L. Duan, W. Yang [et al.] // *RSC Advances*. — 2017. — Vol. 7, № 54. — P. 34131–34137. — DOI: 10.1039/C7RA04936F.
14. Soler J. Oxidative dehydrogenation of n-butane in a two-zone fluidized-bed reactor with separate n-butane and oxygen feeds / J. Soler, J.M. López Nieto, J. Herguido [et al.] // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. — 1999. — Vol. 38, № 1. — P. 90–97. — DOI: 10.1021/ie980486g.
15. Yang Q. Tuning butene selectivities by Cu modification on Pd-based catalyst for the selective hydrogenation of 1,3-butadiene / Q. Yang, R. Hou, K. Sun // *Journal of Catalysis*. — 2019. — Vol. 374. — P. 12–23. — DOI: 10.1021/ie980486g.



16. Luo Y. Chromium oxide supported on Silicalite-1 zeolite as a novel efficient catalyst for dehydrogenation of isobutane assisted by CO₂ / Y. Luo, C. Miao, Y. Yue [et al.] // *Catalysts*. — 2019. — Vol. 9, № 12. — Art. 1040. — DOI: 10.3390/catal9121040.
17. Albright L.F. Alkilirovaniye. Issledovaniya i promyshlennoye oformleniye protsessa [Alkylation. Research and Industrial Process Design] / L.F. Albright, A.R. Goldsby. — Moscow : Khimiya, 1982. — 336 p. [in Russian]
18. Baronetti G.T. Wells-Dawson heteropolyacid supported on silica: Isobutane alkylation with C₄ olefins / G.T. Baronetti, H.J. Thomas, C.A. Querini // *Applied Catalysis A: General*. — 2001. — Vol. 217, № 1. — P. 131–141. — DOI: 10.1016/S0926-860X(01)00576-2.
19. Derjani-Bayeh S. Solid catalyst alkylation of C₂–C₃ olefins with isobutane in the presence of hydrogen using a slurry transport reactor-hydrocyclone-regenerator system and PtSO₄/TiZrSiO₂ catalyst. I. Alkylation in continuous pilot plant operation and simulation of a slurry transport reactor-hydrocyclone settler / S. Derjani-Bayeh, R. Galiasso Tailleur, C. Farina [et al.] // *Energy & Fuels*. — 2018. — Vol. 32, № 2. — P. 1678–1689. — DOI: 10.1021/acs.energyfuels.7b03015.
20. De Jong K.P. Paraffin alkylation using zeolite catalysts in a slurry reactor: chemical engineering principles to extend catalyst lifetime / K.P. De Jong, C.M.A.M. Mesters, D.G.R. Peferoen [et al.] // *Chemical Engineering Science*. — 1996. — Vol. 51, № 10. — P. 2053–2060. — DOI: 10.1016/0009-2509(96)00062-0.
21. Zhang H. Isobutane/2-butene alkylation reaction catalyzed by Cu-modified RE-X zeolite / H. Zhang, J. Xu, H. Tang [et al.] // *Chemical Engineering Journal*. — 2019. — Vol. 58, № 22. — DOI: 10.1016/j.cej.2018.09.021.
22. Baker R.W. *Membrane Technology and Applications* / R.W. Baker. — 3rd ed. — Chichester, UK : John Wiley & Sons, 2012. — 592 p.
23. Yang L. Energy-efficient separation alternatives: Metal–organic frameworks and membranes for hydrocarbon separation / L. Yang, S. Qian, X. Wang et al. // *Chemical Society Reviews*. — 2020. — Vol. 49, № 15. — P. 5359–5406. — DOI: 10.1039/C9CS00756C.
24. Sholl D.S. Seven chemical separations to change the world / D.S. Sholl, R.P. Lively // *Nature*. — 2016. — Vol. 532, № 7600. — P. 435–437. — DOI: 10.1038/532435a.
25. Najari S. Mixed matrix membranes for hydrocarbons separation and recovery: a critical review / S. Najari, S. Saeidi, F. Gallucci [et al.] // *Reviews in Chemical Engineering*. — 2021. — Vol. 37, № 3. — P. 363–406. — DOI: 10.1515/revce-2018-0091.
26. *Distillation: fundamentals and principles* / ed. by A. Górak, E. Sorensen. — London : Academic Press, 2014. — 450 p.
27. Caballero J.A. Optimal Design of Heat Pump Assisted Distillation Sequences / J.A. Caballero, J.A. Labarta, Z. Mekidiche-Martínez // *Computer Aided Chemical Engineering*. — Amsterdam : Elsevier, 2024. — Vol. 53. — P. 1255–1260. — DOI: 10.1016/B978-0-443-28824-1.50210-6.
28. Yildirim Ö. Dividing wall columns in chemical process industry: a review on current activities / Ö. Yildirim, A.A. Kiss, E.Y. Kenig // *Separation and Purification Technology*. — 2011. — Vol. 80, № 3. — P. 403–417. — DOI: 10.1016/j.seppur.2011.05.009.
29. Dejanović I. Dividing wall column – A breakthrough towards sustainable distilling / I. Dejanović, L. Matijašević, Ž. Olujčić // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. — 2010. — Vol. 49, № 6. — P. 559–580. — DOI: 10.1016/j.cep.2010.04.001.
30. Chen Z. Classification and Comparison of Dividing Walls for Distillation Columns / Z. Chen, R. Agrawal // *Processes*. — 2020. — Vol. 8, № 6. — Art. 699. — DOI: <https://doi.org/10.3390/pr8060699>.
31. Vazzoler A. An introduction to Dividing wall columns, design and modelling (DWC) / A. Vazzoler // *Journal of Engineering Research*. — 2022. — Vol. 2, № 2. — P. 1–27. — DOI: 10.22533/at.ed.317222230014.