



ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ/PROCESSES AND DEVICES OF CHEMICAL TECHNOLOGIES

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.167.3> EDN: VTCEXE**ВОЗМОЖНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОЛОННЫ С РАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ СТЕНКОЙ НА УСТАНОВКЕ ГАЗОФРАКЦИОНИРОВАНИЯ**

Научная статья

Иевлев А.А.^{1,*}, Попов С.В.²² ORCID : 0000-0003-0533-9049;^{1,2} Самарский государственный технический университет, Новокуйбышевский филиал, Новокуйбышевск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (skyline74[at]ya.ru)

Предложена: 21.02.2026; Принята: 06.05.2026; Опубликовано: 18.05.2026

Аннотация

На блок газофракционирования комплекса газоразделения и стабилизации бензина нефтеперерабатывающего предприятия для разделения углеводородов поступает смесь конденсата высокого давления и широкой фракции лёгких углеводородов, заметно различающихся по углеводородному составу. Анализ промышленных данных показал, что процесс характеризуется недостаточной чёткостью разделения углеводородов и значительным наложением фракций. Пропан-пропиленовая фракция содержит значительное количество бутанов (до 58% масс.) и более тяжёлых углеводородов более 5% масс, бутан-бутиленовая фракция загрязнена пентанами и более тяжёлыми углеводородами до 40% масс. Целью работы являлось технико-технологическое обоснование применения колонны с разделительной стенкой в составе блока газофракционирования с использованием математического моделирования и сравнительного анализа с существующей двухколонной схемой. Исследование проводили с использованием программной среды Aspen HYSYS, в которой разработана модель блока газофракционирования с учетом данных на типовое технологическое оборудование и параметров технологического режима. Предложена модернизированная технологическая схема с использованием колонны с разделительной стенкой DWC, обеспечивающая достижение фракционных характеристик ППФ и ББФ, удовлетворяющих требованиям технических условий к качеству товарных продуктов, и уменьшение энергозатрат на 39%, что сокращает расход пара, охлаждающей воды и электроэнергии. Предлагаемое использование колонны с разделительной стенкой в блоке газофракционирования нефтеперерабатывающего предприятия является экономически обоснованным, быстро окупаемым и стратегически выгодным решением.

Ключевые слова: газофракционирование, ректификация, энергоэффективность, термически связанные колонны, колонна с разделительной стенкой, моделирование, Aspen HYSYS.

POSSIBLE USE OF A COLUMN WITH A PARTITION WALL IN A GAS FRACTIONATION PLANT

Research article

Ievlev A.A.^{1,*}, Popov S.V.²² ORCID : 0000-0003-0533-9049;^{1,2} Samara State Technical University, Novokuibyshevsk branch, Novokuibyshevsk, Russian Federation

* Corresponding author (skyline74[at]ya.ru)

Suggested: 21.02.2026; Accepted: 06.05.2026; Published: 18.05.2026

Abstract

The gas fractionation unit of the gas separation and petrol stabilisation complex at an oil refinery receives a mixture of high-pressure condensate and a broad fraction of light hydrocarbons, which differ significantly in their hydrocarbon composition, for the purpose of hydrocarbon separation. Analysis of operational data has shown that the process is characterised by insufficient separation of hydrocarbons and significant fraction overlap. The propane-propylene fraction contains a significant amount of butanes (up to 58% by mass) and heavier hydrocarbons exceeding 5% by mass; the butane-butylene fraction is contaminated with pentanes and heavier hydrocarbons up to 40% by mass. The aim of the work was to provide a technical and technological substantiation for the use of a column with a partition wall within a gas fractionation unit, utilising mathematical modelling and a comparative analysis with the existing two-column scheme. The research was conducted using the Aspen HYSYS software environment, in which a model of the gas fractionation unit was developed, taking into account data on standard process equipment and operating parameters. A modernised process scheme is suggested, utilising a column with a DWC partition wall, ensuring that the fractionation characteristics of PPF and BBP meet the technical specifications for the quality of commercial products, and reducing energy consumption by 39%, which lowers the consumption of steam, cooling water and electricity. The proposed use of a column with a partition wall in the gas fractionation unit of an oil refinery is an economically viable, rapidly recoupable and strategically advantageous solution.

Keywords: gas fractionation, rectification, energy efficiency, thermally linked columns, column with a partition wall, modelling, Aspen HYSYS.

Введение

В современных условиях химической, нефтегазовой и перерабатывающей промышленности наблюдается тенденция расширения ассортимента продукции и повышения её качества, поскольку от степени разделения углеводородных фракций зависит возможность их дальнейшего применения. На многих предприятиях наблюдается недостаточно чёткое разделение лёгких углеводородов, приводящее к взаимному присутствию компонентов в товарных фракциях и, как следствие, к экономическим потерям из-за несоответствия продукции требованиям технических условий.

Процесс ректификации является одним из основных методов разделения многокомпонентных смесей. Его популярность обусловлена универсальностью и способностью обеспечивать высокую чистоту продуктов разделения. В то же время ректификация отличается высокой энергоёмкостью: на неё приходится до 40% энергопотребления в химико-технологическом секторе [1]. Кроме того, для разделения сложных многокомпонентных смесей зачастую требуется каскад из нескольких последовательно соединённых ректификационных колонн, что увеличивает суммарные энергозатраты и капитальные вложения по сравнению с одной колонной.

В связи с энергетическими и технологическими ограничениями традиционной ректификации возникает необходимость интенсификации процессов разделения. Интенсификация ректификационных процессов направлена на повышение эффективности и снижение энергозатрат, в том числе за счёт внедрения новых схем, аппаратурных решений и автоматизации процессов [1], [2].

Особое внимание при разделении лёгких углеводородов уделяется узлу выделения этан-пропановой и пропановой фракций. Это обусловлено тем, что использование данных фракций становится всё более востребованным в процессе пиролиза — они служат ценным сырьём для производства этилена и пропилена, применяемых далее при синтезе полимеров и алкилировании углеводородов. На отечественных установках сырьём пиролиза преимущественно служит этан-пропановая фракция, поэтому повышение эффективности её разделения имеет важное прикладное значение. Таким образом, задача увеличения выхода пропановой фракции требуемого качества и, при возможности, получения отдельной этановой фракции является актуальной для нефтегазоперерабатывающих предприятий.

Эффективным инструментом решения задач разделения лёгких углеводородов выступают методы математического моделирования. Моделирование используется как на этапе проектирования (статические расчёты балансов и ректификационных колонн), так и на этапе эксплуатации для анализа динамического поведения установки, отработки режимов пуска/останов и систем управления. Помимо этого, быстрое развитие методов вычислительной гидродинамики (*CFD*) даёт возможность исследовать тонкие гидродинамические особенности работы колонн, недоступные для упрощённых моделей. Интеграция процессных моделей с системами автоматического управления (*АСУ ТП*) открывает дополнительные возможности для оптимизации и предиктивного управления технологическими процессами [3].

Моделирование стационарного состояния газодиффузионных установок (*ГФУ*) используется при проектировании и оптимизации для расчета материальных и тепловых балансов, определения параметров оборудования (число тарелок или высота насадки колонн, расход и состав потоков, требуемые теплонагрузки в ребойлерах и конденсаторах и др.) в установившемся режиме. Расчёт переходных режимов *ГФУ* учитывает запасы вещества и энергии в аппаратах (колоннах, теплообменниках, трубопроводах), инерционность датчиков и исполнительных механизмов и позволяет рассчитывать изменение параметров во времени.

В работах [4] и [5] выполнено моделирование типовой системы фракционирования широкой фракции лёгких углеводородов, где полученные результаты показали возможность разделения метана, этана, пропана, изобутана и н-бутана с высокой степенью чистоты продуктов. Валидизация модели подтвердила соответствие результатов теоретическим принципам ректификации, что даёт основание использовать модель для дальнейших анализов и оптимизации процесса.

В исследовании [6] результаты моделирования показали более высокую эффективность работы газодиффузионного блока с циркуляцией потоков по сравнению с типовой схемой без циркуляции.

В [7] проведено цифровое моделирование действующей газодиффузионной установки в *Aspen HYSYS V12* с последующим созданием модели машинного обучения для оптимизации процесса. На основе результатов симуляции разработан *ML*-алгоритм (*Python/Pandas/Sklearn*) для прогноза выхода целевого продукта в зависимости от расхода абсорбента и состава сырья. Модель предсказывает изменение выхода с точностью 99,4% и позволяет оперативно выбирать оптимальные параметры, повышая эффективность и экономичность работы *ГФУ*.

Модель *ГФУ* нефтеперерабатывающего завода позволила выявить потенциальные резервы модернизации установки и её узкие места [8].

Исследование эффективности фракционирующего абсорбера против традиционной ректификационной колонны на *ГФУ* показало, что замена абсорбера на колонну дезанизации может снизить энергопотребление и повысить полноту разделения газов [9].

Одним из инновационных решений является применение колонн с разделительной стенкой (*DWC*), которые позволяют существенно интенсифицировать процесс разделения [10]. Технология колонн с разделительной стенкой представляет собой практическую реализацию концепции термически связанной ректификации в рамках одного аппарата. В такой колонне внутренняя вертикальная перегородка разделяет пространство на две секции — предварительную и основную, при этом используется лишь один общий конденсатор наверху колонны и один кипятильник (ребойлер) внизу. Фактически одна колонна *DWC* заменяет собой две традиционные колонны, обеспечивая разделение исходной смеси сразу на три продуктовых потока (дистиллят, боковой продукт и кубовый остаток). Ввиду отсутствия промежуточных теплообменников и снижения внутреннего перемешивания потоков *DWC* характеризуется значительно более высокой энергетической эффективностью процесса по сравнению с классической колонной. В исследованиях [11], [12], [13] показано, что применение колонны с разделительной стенкой позволяет

снизить энергопотребление на величину до 30% и сократить капитальные затраты (за счёт уменьшения числа аппаратов) на 15–40% относительно традиционной схемы разделения. Эти конкурентные преимущества делают технологию колонн с разделительной стенкой актуальной, в том числе для модернизации газодиффузионных установок. На сегодняшний день в мире эксплуатируется уже более 300 колонн DWC, включая установки не только для тройных смесей, но и для более сложных задач [14], [15].

К преимуществам технологии DWC относятся её *энергетическая эффективность* [10], [11], [15], *меньшие капитальные затраты и компактность* [10], [13], [14], [16], *сокращение эксплуатационных расходов* [3], [4], [7], *повышение чистоты (концентрации) продукта и его выхода* [10], [11], [16], [17], *упрощение схемы управления и обслуживания* [10], [14], [16], [18].

В число недостатков и сегодняшних возникающих вопросов по использованию DWC можно включить *сложность проектирования, изготовления и расчета изделия* [11], [16], [19], [20], *уменьшение гибкости к изменению условий процесса и вопросы его регулирования системой автоматического контроля для поддержания стабильной работы* [10], [11], [16], [17], *механические и конструктивные сложности аппарата* [11], [16], [18], *сложности технического обслуживания и ремонта* [17], [19], *отсутствие серийных типовых решений и квалифицированного опыта* [10], [12], [16], [18].

Несмотря на указанные недостатки, современный уровень развития технологии DWC позволяет считать ее надежной и отработанной: в промышленности эксплуатируются более 300 колонн с перегородкой, накоплен положительный опыт. По мере развития средств моделирования и появления стандартных проектов (template designs), многие сложности (особенно на этапе проектирования) будут преодолеваются легче [17]. Тем не менее, при выборе DWC всегда следует проводить технико-экономический анализ применимости для конкретного процесса — с учетом ограничений по составу смеси, требуемой гибкости и др. Если условия подходят, преимущества DWC обычно перевешивают недостатки, обеспечивая существенное повышение эффективности процесса [10].

В ряде исследований рассматривается влияние снижения энергопотребления на управляемость системы, поскольку оптимальная конструкция может обеспечить максимальную экономию энергии, но не обладать хорошей управляемостью [21], [22], [23]. В работе [24] предложен возможный метод проектирования DWC и отмечается необходимость проведения анализа как термодинамических свойств, так и свойств управляемости. Полученные в исследовании [25] динамические результаты свидетельствуют о возможной хорошей управляемости DWC, относительно коротком времени переходного процесса и низком превышении допустимых значений.

В колоннах DWC контуры систем регулирования предназначены для подавления влияния возмущений технологических режимов на целевые показатели процесса и оптимальную чистоту продуктов и могут быть реализованы с использованием разных стратегий управления [26], [28], [30], [31].

В исследовании [32] показано, что фракционирование ШФЛУ с применением технологии DWC даёт возможность эффективно извлекать ценные компоненты газа (этан и пропан) без применения внешней холодильной установки. Проектом предусмотрено использование колонны с разделительной стенкой. Создана стационарная модель установки в программном комплексе *Aspen HYSYS*, проведена оценка капитальных и эксплуатационных затрат (*CAPEX* и *OPEX*) и выполнено сравнение с классической каскадной схемой из нескольких колонн. Достигнута степень извлечения этана 60% и пропана 97%, что вполне сопоставимо с традиционными схемами. Несмотря на более высокую стоимость колонны DWC, общие эксплуатационные затраты (включая энергию и обслуживание) оказались заметно ниже — это дало снижение совокупных годовых затрат.

На блок газодиффузии комплекса газоразделения и стабилизации бензина нефтеперерабатывающего предприятия для разделения углеводородов поступает смесь конденсата высокого давления (КВД) и широкой фракции лёгких углеводородов (ШФЛУ), различающихся по углеводородному составу. КВД содержит значительное количество тяжёлых компонентов (до 22% масс. фракции C_{6+}), в то время как ШФЛУ представлена преимущественно бутанами (до 63% масс. нормального-бутана). Такое сочетание создаёт сложную для разделения многокомпонентную систему, требующую высокой эффективности ректификации.

Анализ промышленного состава потоков показал, что в технологической схеме разделение компонентов осуществляется неполностью: диапазоны кипения фракций пересекаются, в результате формируются смешанные продукты (СПБТ), что препятствует получению товарных фракций требуемой чистоты.

Недостаточная эффективность разделения обусловлена как ограниченной разделяющей способностью колонн, так и тепловыми потерями между аппаратами двухколонной системы. Это приводит к росту энергопотребления, необходимости в дополнительных циклах орошения и рециркуляции, а также снижает экономическую целесообразность выделения отдельных фракций для коммерческой реализации.

Цель работы — повышение чёткости разделения углеводородов и энергетической эффективности блока газодиффузии за счёт внедрения технологии колонны с разделительной стенкой DWC вместо существующей двухколонной схемы с обеспечением требований технических условий к качеству получаемых фракций.

Методы и принципы исследования

Исследование работы рассматриваемого блока и его достигаемых показателей проводили с использованием программной среды *Aspen HYSYS*. Модель блока газодиффузии с учетом данных на типовое технологическое оборудование и параметров технологического режима показана на рисунке 1. Модель адекватно рассчитывает показатели работы блока, в частности погрешность описания энергетических параметров составляет величину менее 1,4%.

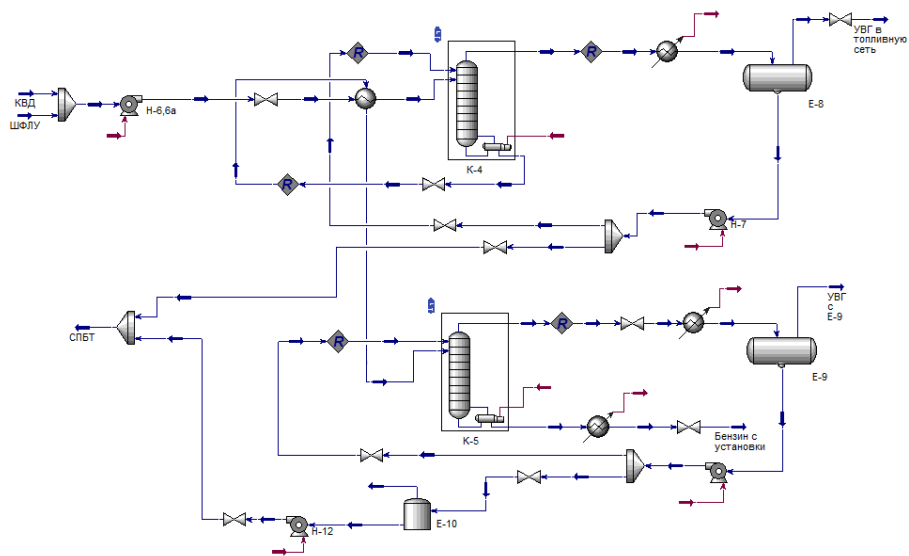


Рисунок 1 - Технологическая схема блока газодифракционирования
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.167.3.1>

На рассматриваемом блоке процесс осуществляется в двух колонной системе. С верха первой колонны (К-4) смесь сухого газа и пропан-пропиленовой фракции (ППФ) через водяной холодильник поступает в емкость, в которой происходит сепарация сухого газа и ППФ. Сухой газ с верха емкости уходит в топливную сеть, а ППФ разделяется на 2 потока: часть ее поступает на орошение колонны К-4, а балансовый избыток откачивается на смешение с бутан-бутиленовой фракцией (ББФ) и уходит с установки. С верха второй колонны (К-5) ББФ (аналогично ППФ) проходит водяной холодильник, емкость-сепаратор и двумя потоками идет на орошение и смешение с ППФ. С низа колонны К-5 газовый бензин поступает в водяной холодильник и откачивается на дальнейшую переработку.

На блок газодифракционирования поток КВД поступает с блока компримирования и очистки газов в полном объеме. ШФЛУ после щелочной очистки частично направляется на переработку, смешиваясь с КВД, а основная часть откачивается в товарный парк с последующей ее коммерческой реализацией.

В таблице 1 представлен усредненный углеводородный состав сырьевых фракций, которые после смешения поступают на разделение углеводородов в колонну К-4.

Таблица 1 - Усредненный углеводородный состав сырьевых фракций

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.167.3.2>

Наименование компонента	Наименование сырья	
	КВД, % масс.	ШФЛУ, % масс.
Метан	0,04	0,05
Этан	0,95	1,34
Пропен	4,09	0,00
Пропан	9,27	15,88
Изобутан	15,58	17,79
Нормальный бутан	22,03	63,43
Сумма бутенов	7,83	0,07
Изопентан	14,88	1,10
Нормальный пентан	3,15	0,33
Сумма пентенов	0,01	0,00
Сумма C ₆₊	22,17	0,01
Итого	100,00	100,00

В таблице 2 приведен рассчитанный компонентный состав пропан-пропиленовой и бутан-бутиленовой фракций до их смешения, и газового бензина.

Анализ компонентного состава сырья и продуктов рассматриваемого блока газодифракционирования показывает, что действующая двухколонная система установки не обеспечивает требуемой глубины и чёткости разделения углеводородных фракций. Пропан-пропиленовая фракция содержит значительное количество бутанов (до 58% масс.) и более тяжёлых углеводородов более 5% масс. (выделено шрифтом). Бутан-бутиленовая фракция загрязнена пентанами

и более тяжёлыми углеводородами до 40% масс, что также указывает на недостаточную эффективность массообмена и неполное разделение потоков по летучести. Газовый бензин, напротив, содержит примеси лёгких компонентов (бутанов и бутиленов), что снижает его стабильность и усложняет последующую переработку. Такое наложение фракций объясняет количественный отбор, не соответствующий их потенциальному содержанию в разделяемой смеси (рисунок 2).

Таблица 2 - Компонентный состав пропан-пропиленовой, бутан-бутиленовой и бензиновой фракций

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.167.3.3>

Наименование компонента	Наименование продукции		
	ППФ, % масс.	ББФ, % масс.	Бензин, % масс.
Метан	0,00	0,00	0,00
Этан	0,35	0,95	0,00
Пропен	8,24	4,09	0,00
Пропан	18,86	9,27	0,00
Изобутан	32,39	15,58	0,55
Нормальный бутан	25,41	22,03	3,40
Сумма бутенов	3,89	7,83	0,11
Изопентан	2,39	14,88	23,25
Нормальный пентан	0,32	3,15	6,81
Сумма пентенов	2,72	0,01	0,84
Сумма C ₆₊	0,00	22,17	65,04
Итого	100,00	100,00	100,00

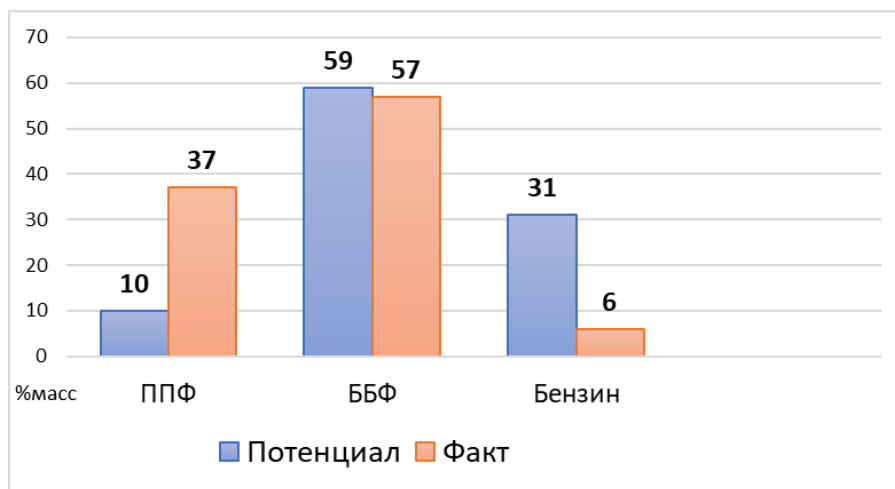


Рисунок 2 - Фракции разделяемой смеси:
потенциал - потенциальное содержание; *факт* - фактический отбор
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.167.3.4>

Основные результаты

Низкая чёткость разделения ППФ и БФФ является не критичной для случая их последующего смешения (схема на рисунке 1), однако при рассмотрении вопроса коммерческой реализации в виде отдельных фракций требуется оптимизация технологического процесса и его аппаратурного оформления.

С целью совершенствования рассматриваемого блока предлагается технологическая схема с включением в неё колонны DWC (рисунок 3, рисунок 4).

Рисунок 3 - Предлагаемая схема блока газодифракционирования с колонной DWC

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.167.3.5>

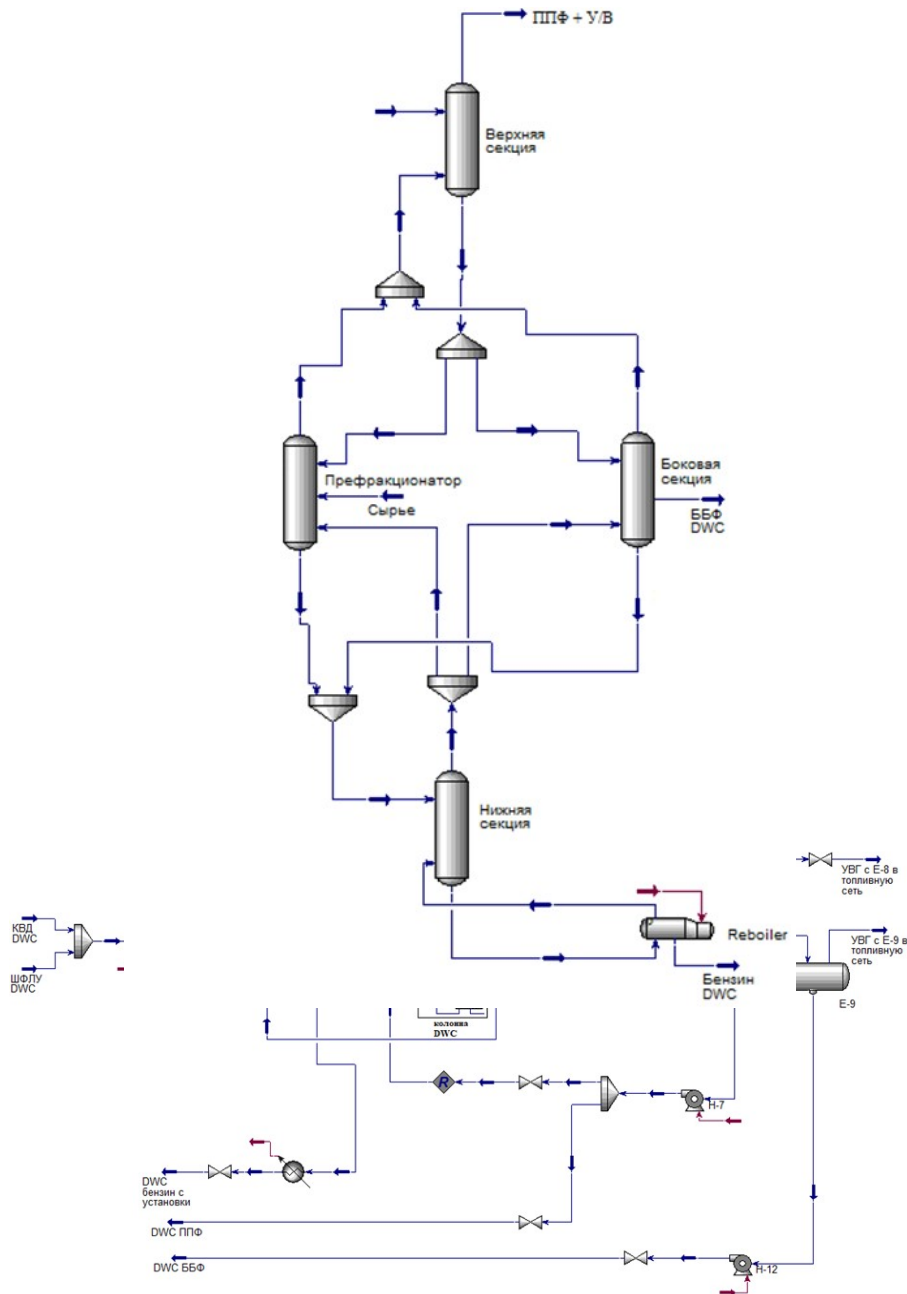


Рисунок 4 - Эквивалентная схема предлагаемой колонны DWC

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.167.3.6>

В таблице 3 представлены технологические режимы работы аппаратов К-4 и К-5 двух колонной системы и колонны DWC предлагаемой схемы.



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

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.167.3.7>

Параметры	Типовая схема — колонна К-4	Типовая схема — колонна К-5	Колонна DWC
Температура конденсатор/ребойлер, °С	56/95	92/147	28/146
Давление верх/куб, кгс/см ²	12,0/12,5	8,0/8,3	12,0/12,6
Флегмовое число	0,84	0,5	0,9
Отбор ППФ факт/потенциал, %масс.	37/10	-	10/10
Отбор ББФ факт/потенциал, %масс.	-	57/59	59/59

Параметры	Типовая схема — колонна К-4	Типовая схема — колонна К-5	Колонна DWC
Отбор бензина факт/потенциал, %масс.	-	6/31	31/31

Таблица 4 - Компонентный состав получаемых фракций

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.167.3.8>

Наименование компонента	Наименование продукции		
	ППФ, % масс.	ББФ, % масс.	Бензин, % масс.
Метан	0,09	0,00	0,00
Этан	5,13	0,00	0,00
Пропен	23,33	0,10	0,00
Пропан	71,45	3,13	0,00
Изобутан	0,00	28,24	0,01
Нормальный бутан	0,00	55,12	0,89
Сумма бутенов	0,00	10,82	0,02
Изопентан	0,00	2,39	33,88
Нормальный пентан	0,00	0,20	8,00
Сумма пентенов	0,00	0,00	0,02
Суммы C ₆ +	0,00	0,00	57,18
Итого	100,00	100,00	100,00

Результаты расчетов показывают, что применение DWC-технологии существенно повышает чистоту целевых продуктов по сравнению с традиционной двухколонной схемой, показатели работы которой приведены в таблице 2. В DWC-колонне удаётся практически полностью вывести бутановые компоненты из ППФ: в составе пропан-пропиленовой фракции отсутствуют изо- и н-бутан (0,00% масс.), а основную её массу составляют пропан и пропилен (в сумме более 94%) при незначительных примесях метана и этана. Аналогичная картина наблюдается для бутан-бутиленовой фракции. DWC-колонна обеспечивает практически чистый выход C₄-фракции — содержание пентановых и более тяжёлых углеводородов снижаются до ~2,6% масс. (было до 40% масс.).

Таким образом, разделение фракций в системе с DWC существенно превосходит по качеству традиционную схему, позволяя получать более чистые ППФ и ББФ без взаимных наложений.

Для рассматриваемых технологических схем (рисунок 1 и рисунок 3) количественное распределение фракций также заметно отличается. В действующей двухколонной системе большая часть углеводородов выходит с фракциями ППФ и ББФ (94%масс.), тогда как тяжёлый (C₅₊) продукт имеет небольшой выход (6%масс.), составляющий 19,4%масс. от номинального количества бензина. При переходе к DWC-схеме достигается номинальный выход фракций (рисунок 2). В частности, отбор пропан-пропиленовой фракции уменьшается в ~3,8 раз, что обусловлено переносом части компонентов, ранее входивших в ППФ (бутанов и тяжёлых углеводородов), в другие продуктовые потоки. Выход бутан-бутиленовой фракции увеличился на 0,7% масс., то есть практически остался на уровне исходной системы. Нижний продукт (фракция C₅₊) заметно увеличивается до номинального значения, то есть почти в 5 раз по сравнению с двух колонным (типовым) вариантом.

Эта перестройка материального баланса свидетельствует о более полном извлечении тяжёлых компонентов в отдельные целевые потоки. В результате DWC-схема распределяет углеводородное сырьё более рационально: лёгкие фракции (C₃ и C₄) выделяются в виде относительно чистых продуктов, а тяжёлые углеводороды (C₅ и выше) концентрируются в газовом бензине для дальнейшей переработки.

Важнейшим технико-экономическим показателем функционирования ректификационной схемы является потребление энергии — тепловой (на ребойлерах), холодильной (на водяных холодильниках) и электроэнергии. Система с DWC демонстрирует кардинальное улучшение по энергопотреблению. Рассчитанный суммарный расход тепловой энергии, требуемой для разделения в колонне DWC, снижается и экономия тепла составляет около 39% относительно базового варианта. Потребность в холодильной мощности уменьшается на ~9%. Сокращение энергозатрат объясняется выводом из схемы кипятильника/конденсатора и другого дополнительного оборудования второго колонного блока и более эффективным тепловым распределением внутри колонны DWC. В результате DWC-схема превосходит двух колонную систему не только по чёткости разделения, но и по энергетической эффективности.

Для оценки показателей работы колонны в стационарном состоянии в зависимости от изменения состава сырья проведен вычислительный эксперимент, в котором варьировалось соотношение КВД/ШФЛУ при максимальной регламентной загрузке и ранее принятых геометрических размерах аппарата. Для повышения устойчивости колонны и поддержания качественных показателей получаемой продукции предусмотрено два узла ввода сырья в нижнюю и центральную части секции префракционатора.

В таблице 5 представлены рассчитанные режимы работы колонны DWC при различных составах сырья.

Таблица 5 - Рассчитанные режимы работы колонны DWC
при различных составах сырья

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.167.3.9>

Параметры	Соотношение состава сырья КВД/ШФЛУ				
	1/0	0,75/0,25	0,5/0,5	0,25/0,75	0/1
Температура конденсатор/ребойлер, °С	28/160	28/151	29/151	29/151	28/86
Давление верх/куб, кгс/см ²	12,0/12,6	12,0/12,6	12,0/12,6	12,0/12,6	12,0/12,6
Флегмовое число	0,9	0,9	1	1	1
Соотношение подачи сырья в центральную и нижнюю части префракционатора	1/0	0,8/0,2	0,8/0,2	0,8/0,2	1/0
УВГ, кг/ч	559	518	520	588	384
Выход ППФ, кг/ч	1644	1748	1784	1630	2363
Выход ББФ, кг/ч	7591	9093	10628	12342	13253
Выход бензина, кг/ч	6206	4641	3068	1510	-
Затраты тепловой энергии DWC/промсхема, кВт	2034/2884	2286/3035	2298/3166	2102/3271	1980/-
Затраты на охлаждение DWC/промсхема, кВт	1864/2062	2134/2055	2094/2014	1963/1858	1836/-

В таблицах 6,7,8 сведены компонентные составы получаемых фракций.

Таблица 6 - Компонентный состав пропан-пропиленовой фракции

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.167.3.10>

Наименование компонента	Соотношение состава сырья КВД/ШФЛУ				
	1/0	0,75/0,25	0,5/0,5	0,25/0,75	0/1
Метан, % масс	0,08	0,09	0,09	0,09	0,11
Этан, % масс	4,90	5,33	5,83	6,34	6,45
Пропен, % масс	29,81	21,18	13,08	6,57	0,01
Пропан, % масс	65,21	73,41	80,98	86,92	93,36
Изобутан, % масс	0,00	0,00	0,02	0,07	0,06
Нормальный бутан, % масс	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
Сумма бутенов, % масс	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Изопентан, %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Наименование компонента	Соотношение состава сырья КВД/ШФЛУ				
	1/0	0,75/0,25	0,5/0,5	0,25/0,75	0/1
масс					
Нормальный пентан, % масс	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Сумма пентенов, % масс	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Суммы C ₆ +, % масс	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
Итого	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Таблица 7 - Компонентный состав бутан-бутиленовой фракции

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.167.3.11>

Наименование компонента	Соотношение состава сырья КВД/ШФЛУ				
	1/0	0,75/0,25	0,5/0,5	0,25/0,75	0/1
Метан, % масс	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Этан, % масс	0,00	0,02	0,02	0,02	0,00
Пропен, % масс	0,15	0,26	0,19	0,10	0,00
Пропан, % масс	1,09	1,36	1,92	3,88	0,10
Изобутан, % масс	32,83	28,41	25,20	22,51	21,63
Нормальный бутан, % масс	45,99	56,65	64,16	68,85	76,87
Сумма бутенов, % масс	16,49	10,63	6,42	3,22	0,85
Изопентан, % масс	3,25	2,46	1,89	1,21	0,13
Нормальный пентан, % масс	0,20	0,20	0,20	0,20	0,40
Сумма пентенов, % масс	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Суммы C ₆ +, % масс	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
Итого	100,00	100,00	100,00	100,00	100

Таблица 8 - Компонентный состав бензина

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.167.3.12>

Наименование компонента	Соотношение состава сырья КВД/ШФЛУ				
	1/0	0,75/0,25	0,5/0,5	0,25/0,75	0/1
Метан, % масс	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Этан, % масс	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Пропен, % масс	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Пропан, % масс	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Изобутан, % масс	0,01	0,01	0,01	0,01	-
Нормальный бутан, % масс	0,54	0,84	1,19	1,48	-
Сумма бутенов, % масс	0,02	0,02	0,01	0,01	-

Наименование компонента	Соотношение состава сырья КВД/ШФЛУ				
	1/0	0,75/0,25	0,5/0,5	0,25/0,75	0/1
Изопентан, % масс	34,38	33,75	32,55	30,42	-
Нормальный пентан, % масс	7,88	8,04	8,38	9,34	-
Сумма пентенов, % масс	0,02	0,02	0,02	0,02	-
Суммы C ₆ +, % масс	57,15	57,33	57,83	58,72	-
Итого	100,00	100,00	100,00	100,00	-

Получаемая продукция характеризуется высокой гибкостью состава в зависимости от соотношения КВД/ШФЛУ. Пропан-пропиленовая фракция изменяется от пропилен-содержащего нефтехимического сырья (до ~30% пропена) до практически чистого пропана, пригодного для товарной реализации. Бутан-бутиленовая фракция при высоком содержании КВД содержит значительное количество бутенов и может использоваться как нефтехимическое сырьё, тогда как при увеличении доли ШФЛУ формируется преимущественно товарный бутан. Бензиновая фракция (C₅+) отличается стабильным составом с преобладанием углеводородов C₆+ и может использоваться как компонент автобензинов или сырьё для дальнейшей переработки. При соотношении КВД/ШФЛУ = 0/1 содержание C₅+ в сырье становится недостаточным для формирования отдельного бензинового потока, вследствие чего колонна функционирует в двухпродуктовом режиме с получением ППФ и ББФ.

Пуск колонны с разделительной стенкой осуществляется в двухпродуктовом режиме (дистиллят — куб), аналогично традиционной ректификационной колонне. После стабилизации температурного и гидравлического режимов, а также состава потоков производится включение в работу бокового отбора. Такой подход обеспечивает устойчивость процесса и упрощает его регулирование на начальном этапе эксплуатации.

Особенностью управления колонной DWC является наличие дополнительных степеней свободы, связанных с распределением потоков между секциями и регулированием бокового отбора. Ключевыми регулируемыми параметрами являются флегмовое число, тепловая нагрузка ребойлера, а также соотношение жидкостных и паровых потоков между секциями. Поддержание стабильного температурного и концентрационного профилей требует координированного регулирования нескольких контуров, что усложняет систему управления по сравнению с традиционными колоннами, однако обеспечивает более высокую энергоэффективность процесса.

Выше показано, что в целом колонна DWC обеспечивает устойчивую работу в широком промышленном диапазоне изменения состава сырья, позволяя варьировать режим функционирования и товарную направленность продукции без изменения конструктивных характеристик аппарата. В этой связи для её управления могут быть использованы описанные в литературе системы регулирования [29], [30], [31].

Можно отметить, что экономический эффект предлагаемой схемы с колонной DWC проявляется в снижении эксплуатационных затрат и повышении выхода ценных продуктов. Сокращение тепловой нагрузки на 39% ведёт к эквивалентному снижению расхода топлива в ребойлере и затрат на охлаждение, что непосредственно улучшает экономические показатели процесса. Известно, что на практике внедрение DWC-колонн позволяет снизить операционные затраты на ~35–40% и сократить капитальные вложения на 25–35% за счёт уменьшения числа аппаратов. Текущие расчеты подтверждают этот тренд: единая DWC-колонна потребляет существенно меньше энергии, а отсутствие второй колонны подразумевает уменьшение объёмов обслуживания и ремонтов. Помимо энергосбережения, в рассматриваемом случае DWC-технология повысила извлечение тяжелых углеводородов в отдельный поток (газовый бензин), что открывает дополнительную возможность для более полной переработки сырья внутри предприятия, и тем самым повышая конкурентоспособность установки.

Обсуждение

Для рассматриваемого блока газодифракционирования внедрение предлагаемой схемы с DWC не будет сопровождаться принципиальными производственными трудностями. Одна из причин использовать предлагаемую технологию DWC — возможность отдельного получения пропан-пропиленовой и бутан-бутиленовой фракций достаточной чистоты для их коммерческой реализации. В существующей конфигурации блока низкая чистота ППФ и ББФ в двухколонной системе фактически исключала их продажу по отдельности без дополнительной очистки. Результаты вычислительного эксперимента показали, что с помощью DWC-колонны данные фракции могут быть получены с существенно лучшим качеством и количеством. В частности, пропан-пропиленовый поток содержит ~95% C₃-углеводородов и минимальное количество примесей C₄ и тяжелее, что соответствует действующим стандартам на сжиженный нефтяной газ пропановой фракции. Бутановый продукт из DWC также практически не содержит посторонних компонентов (присутствие пентанов <3%) и удовлетворяет требованиям к товарной бутановой фракции. Таким образом, при реализации DWC-схемы появляется техническая возможность отгружать пропан-пропиленовую и бутан-бутиленовую фракции как отдельные товарные продукты.

Экономическая целесообразность разделения рассматриваемых потоков зависит от рыночных условий и внутренних задач предприятия. Раздельная продажа ППФ и ББФ может предоставить дополнительную выручку, поскольку эти фракции ценны как нефтехимическое сырьё и компонент моторного топлива. Пропан-пропиленовая



фракция может быть использована, например, для производства полипропилена или в качестве реактанта при алкилировании, тогда как бутан-бутиленовая — для производства метил-трет-бутилового эфира (МТБЭ), алкилата или прямой продажи в баллонах как сжиженный углеводородный газ (СУГ). Поэтому разделение способно повысить суммарную стоимость продуктов. С другой стороны, переход к коммерческой реализации отдельных фракций потребует затрат — организационных (создание инфраструктуры хранения и отгрузки, адаптация технологии под товарные стандарты) и потенциально капитальных (модернизация оборудования для поддержания стабильного товарного качества, например, дополнительной осушки или очистки газов). Необходимо учесть и относительно небольшой выход пропан-пропиленовой фракции, достаточный для продажи, но требующий оценки логистической эффективности.

Заключение

На основе полученных данных можно заключить, что раздельное получение ППФ и ББФ в схеме с использованием DWC-колонны технологически осуществимо и экономически оправдано, а внедрение предлагаемой схемы с DWC не будет сопровождаться принципиальными производственными трудностями. Применение DWC обеспечивает достижение фракционных характеристик ППФ и ББФ, удовлетворяющих требованиям к товарным продуктам, что позволит реализовать их и компенсировать дополнительные издержки.

Существенным источником эффективности предлагаемой схемы также является снижение эксплуатационных энергозатрат. За счёт интеграции процессов испарения и конденсации внутри одной колонны, исключения межколонных теплопотерь и оптимизации внутреннего распределения потоков тепловая нагрузка уменьшается на 39%, что сопровождается сокращением расхода пара, охлаждающей воды и электроэнергии.

Предлагаемое использование колонны с разделительной стенкой в блоке газофракционирования нефтеперерабатывающего предприятия является экономически обоснованным, быстро окупаемым и стратегически выгодным решением. Проект обеспечивает не только улучшение технологических параметров разделения углеводородов, но и значительное повышение доходности и энергоэффективности установки.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

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.

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. Kiss A.A. Distillation technology – still young and full of breakthrough opportunities / A.A. Kiss // *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. — 2014. — № 89. — P. 479–498. — DOI: 10.1002/jctb.4262
2. Лю Ч. Технологии повышения эффективности процесса ректификации / Ч. Лю, М.Ю. Куприянов, В.Д. Кононова // *Холодильная техника*. — 2024. — № 113 (2). — С. 54–62. — DOI: 10.17816/RF635216
3. Голубева И.А. Газопереработка: перезагрузка / И.А. Голубева, Е.В. Родина, О.Ф. Глаголева и др. // *Neftegaz.RU*. — 2019. — URL: <https://neftegaz.ru/science/booty/331423-gazopererabotka-perezagruzka/>. (дата обращения: 21.02.26)
4. Букембаев Р.Ж. Моделирование газофракционирующей установки в ПО Petro-SIM с использованием ШФЛУ Амурского ГПЗ / Р.Ж. Букембаев // МЦНС «НАУКА и Просвещение»; под ред. Гуляев Герман Юрьевич — Пенза: Наука и Просвещение, 2023. — С. 77–80. — URL: <https://naukaip.ru/wp-content/uploads/2023/02/МК-1615-1.pdf> (дата обращения: 21.02.26).
5. Воронов М.В. Совершенствование технологической схемы установки газофракционирования широкой фракции легких углеводородов / М.В. Воронов, С.В. Попов // *Международный научно-исследовательский журнал*. — 2024. — № 10 (148). — С. 1–9. — DOI: 10.60797/IRJ.2024.148.43
6. Мясин Я.О. Повышение эффективности разделения продуктов каталитического крекинга в результате моделирования и анализа работы газофракционирующих блоков / Я.О. Мясин, Е.А. Мясина, А.В. Ганцев и др. // *Башкирский химический журнал*. — 2017. — № 3 (24). — С. 77–84.
7. Бронская В.В. Цифровое моделирование установки газофракционирования с использованием методов машинного обучения / В.В. Бронская, О.В. Зиннурова, А.А. Фирсин и др. // *Современные наукоёмкие технологии*. — 2024. — № 11. — С. 10–16. — DOI: 10.17513/snt.40204
8. Нурисламов Р.М. Моделирование установки газофракционирования / Р.М. Нурисламов, Н.Р. Кензин, А.Н. Нефедов и др. // *Новости науки Казахстана*. — 2023. — № 2 (157). — С. 13–17. — DOI: 10.53939/15605655/2023_2_13
9. Голованов М.Л. Повышение эффективности АГФУ Куйбышевского НПЗ путем замены фракционирующего абсорбера на ректификационную колонну / М.Л. Голованов, А.В. Оскирко, А.В. Тимошенко и др. // *Научно-технический журнал «Вестник МИТХТ»*. — 2007. — № 2 (2). — С. 55–58.
10. 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. — № 3 (80). — P. 403–417. — DOI: 10.1016/j.seppur.2011.05.009
11. Lorenz H.M. Divided Wall Columns: Usefulness and Challenges / H.M. Lorenz, D. Staak, T. Grützner et al. // *Chemical Engineering Transactions*. — 2018. — № 69. — P. 229–234. — DOI: 10.3303/CET1869039



12. Petlyuk F.B. Thermodynamically optimal method for separating multicomponent mixtures / F.B. Petlyuk, V.M. Platonov, D.M. Slavinskii // *International Chemical Engineering*. — 1965. — № 3 (5). — P. 555–561.
13. Kaibel G. Distillation columns with vertical partitions / G. Kaibel // *Chemical Engineering Technology*. — 1987. — № 10. — P. 92–98. — DOI: 10.1002/ceat.270100112
14. Kaibel B. Unfixed dividing wall technology for packed and tray distillation columns / B. Kaibel, H. Jansen, E. Zich et al. // *Distillation and Absorption Symposium Series*. — 2006. — № 152. — P. 252–266.
15. Montz GmbH. MONTZ Trennwandkolonnen. — 2020. — URL: <https://www.montz.de/montz-trennwandkolonnen> (abgerufen am: 21.02.26)
16. Dejanović I. Dividing wall column—A break through towards sustainable distilling / I. Dejanović, Lj. Matijašević, Ž. Olujić // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. — 2010. — № 6 (49). — P. 559–580. — DOI: 10.1016/j.cep.2010.04.001
17. Sulzer Chemtech Dividing Wall Column / Sulzer Chemtech Ltd. — 2025. — URL: https://www.sulzer.com/-/media/files/products/separation-technology/brochures/english/dividing_wall_column_e10935_en_web.pdf (accessed: 21.02.26)
18. Kiss A.A. Advanced Control Strategies for Dividing-Wall Columns / A.A. Kiss, C.D. Ruben // *Computer Aided Chemical Engineering*. — 2010. — № 28. — P. 511–516. — DOI: 10.1016/S1570-7946(10)28086-0
19. Meik F.B. Design of Dividing-Wall Columns by Mixed-Integer Nonlinear Programming Optimization / F.B. Meik // *Chemie Ingenieur Technik*. — 2017. — № 5 (89). — P. 582–597. — DOI: 10.1002/cite.201700005
20. Uwitonze H. Improving NGL recovery process with dividing-wall column for offshore applications / H. Uwitonze, K.S. Hwang, I. Lee // *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. — 2020. — № 147. — DOI: 10.1016/j.cep.2019.107747
21. Duanmu F. Optimal design of reduced vapor transfer dividing wall structures with and without heat integration / F. Duanmu, E. Sorensen // *AIChE Journal*. — 2024. — № 70 (11). — DOI: 10.1002/aic.18572
22. Robles-Zapiain S. Energy-efficient complex distillation sequences: Control properties / S. Robles-Zapiain, J.G. Segovia-Hernandez, A. Bonilla-Petriciolet et al. // *Canadian Society for Chemical Engineering*. — 2008. — № 86. — P. 249–259. — DOI: 10.1002/cjce.20021
23. Tamayo-Galvan V.E. Controllability analysis of alternate schemes to complex column arrangements with thermal coupling for the separation of ternary mixtures / V.E. Tamayo-Galvan, J.G. Segovia-Hernández, S. Hernández et al. // *Computers & Chemical Engineering*. — 2008. — № 32. — P. 3057–3066. — DOI: 10.1016/j.compchemeng.2008.04.007
24. Gómez-Castro F.I. Dividing wall distillation columns: Optimization and control properties / F.I. Gómez-Castro, J.G. Segovia-Hernández, S. Hernández et al. // *Chemical Engineering & Technology*. — 2008. — № 31. — P. 1246–1260. — DOI: 10.1002/ceat.20080011
25. Kiss A.A. Energy efficient control of a BTX dividing-wall column / A.A. Kiss, R.R. Rewagad // *Computers & Chemical Engineering*. — 2011. — № 35. — P. 2896–2904. — DOI: 10.1016/j.compchemeng.2011.03.024
26. Kiss A.A. A control perspective on process intensification in dividing-wall columns / A.A. Kiss, C.S. Bildea // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. — 2011. — № 50. — P. 281–292. — DOI: 10.1016/j.cep.2011.01.011
27. Donahue M.M. Dividing wall column control: Common practices and key findings / M.M. Donahue, B.J. Roach, J.J. Downs et al. // *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. — 2016. — № 107. — P. 106–115. — DOI: 10.1016/j.cep.2016.05.013
28. Qian X. Model Predictive Control of Reactive Dividing Wall Column for the Selective Hydrogenation and Separation of a C3 Stream in an Ethylene Plant / X. Qian, S. Jia, S. Skogestad et al. // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. — 2016. — № 36. — P. 9738–9748. — DOI: 10.1021/acs.iecr.6b02112
29. Wang H. Optimization and Sliding Mode Control of Dividing-Wall Column / H. Wang, Z. Wang, Q. Zhou // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. — 2020. — № 45. — P. 20102–20111. — DOI: 10.1021/acs.iecr.0c03564
30. Walk M. Validation of Differential Temperature Control for a Dividing Wall Distillation Column / M. Walk, J. Hamacher, J.J. Downs et al. // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. — 2021. — № 3. — P. 1341–1355. — DOI: 10.1021/acs.iecr.0c04570
31. Ramírez-Márquez C. Integrated process design and control of divided-wall distillation columns using molecular tracking / C. Ramírez-Márquez, E. Sánchez-Ramírez, N. Nazemzadeh et al. // *AIChE Journal*. — 2023. — № 11. — P. pp.e18225. — DOI: 10.1002/aic.18225
32. Uwitonze H. Improving NGL recovery process with dividing-wall column for offshore applications / H. Uwitonze, K.S. Hwang, I. Lee // *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. — 2020. — № 147. — DOI: 10.1016/j.cep.2019.107747

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kiss A.A. Distillation technology – still young and full of breakthrough opportunities / A.A. Kiss // *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. — 2014. — № 89. — P. 479–498. — DOI: 10.1002/jctb.4262
2. Lyu Ch. Texnologii povыsheniya effektivnosti processa rektifikacii [Technologies increasing the distillation performance] / Ch. Lyu, M. Yu. Kupriyanov, V.D. Kononova // *Refrigeration Technology*. — 2024. — № 113 (2). — P. 54–62. — DOI: 10.17816/RF635216 [in Russian]
3. Golubeva I.A. Gazopererabotka: perezagruzka [Gas Processing: Reboot] / I.A. Golubeva, E.V. Rodina, O.F. Glagoleva et al. // *Neftgaz.RU*. — 2019. — URL: <https://neftgaz.ru/science/booty/331423-gazopererabotka-perezagruzka/>. (accessed: 21.02.26) [in Russian]



4. Bukembaev R.Zh. Modelirovanie gazofraktsioniruyushchei ustanovki v PO Petro-SIM s ispolzovaniem ShFLU Amurskogo GPZ [Simulation of a gas fraction plant in the petr-sim software with the use of bflue from the Amur GPP] / R.Zh. Bukembaev // ICSC "Science and Education"; edited by Gulyaev German Yurevich — Penza: Nauka i Prosveshchenie, 2023. — P. 77–80. — URL: <https://naukaip.ru/wp-content/uploads/2023/02/MK-1615-1.pdf> (accessed: 21.02.26). [in Russian]
5. Voronov M.V. Sovershenstvovanie texnologicheskoy sxemy' ustanovki gazofraktsionirovaniya shirokoj frakcii legkix uglevodorodov [Improvement of the technological scheme of the gas fractionation unit for wide fraction of light hydrocarbons] / M.V. Voronov, S.V. Popov // International Research Journal. — 2024. — № 10 (148). — P. 1–9. — DOI: 10.60797/IRJ.2024.148.43 [in Russian]
6. Myasin Ya.O. Povyshenie e'ffektivnosti razdeleniya produktov kataliticheskogo krekinga v rezul'tate modelirovaniya i analiza raboty' gazofraktsioniruyushhix blokov [Raising of efficiency of separating of fcc products in results of simulating and operational analysis of gas5fractionation plants] / Ya.O. Myasin, E.A. Myasina, A.V. Gancev et al. // Bashkir Chemical Journal. — 2017. — № 3 (24). — P. 77–84. [in Russian]
7. Bronskaya V.V. Cifrovoe modelirovanie ustanovki gazofraktsionirovaniya s ispol'zovaniem metodov mashinnogo obucheniya [Digital modeling of gas fractionation unit using machine learning methods] / V.V. Bronskaya, O.V. Zinnurova, A.A. Firsin et al. // Modern high technologies. — 2024. — № 11. — P. 10–16. — DOI: 10.17513/snt.40204 [in Russian]
8. Nurislamov R.M. Modelirovanie ustanovki gazofraktsionirovaniya [Modeling a gas fractionation plant] / R.M. Nurislamov, N.R. Kenzin, A.N. Nefedov et al. // News of Kazakhstan Science. — 2023. — № 2 (157). — P. 13–17. — DOI: 10.53939/15605655/2023_2_13 [in Russian]
9. Golovanov M.L. Povyshenie e'ffektivnosti AGFU Kujby'shevskogo NPZ putem zameny' fraktsioniruyushhego absorbera na rektifikacionnyu kolonnu [Improving the Efficiency of the Gas Fractionation Unit at the Kuibyshev Refinery by Replacing the Fractionating Absorber with a Distillation Column] / M.L. Golovanov, A.V. Oskirko, A.V. Timoshenko et al. // The Scientific and Technical Journal 'Bulletin MITHT'. — 2007. — № 2 (2). — P. 55–58. [in Russian]
10. 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. — № 3 (80). — P. 403–417. — DOI: 10.1016/j.seppur.2011.05.009
11. Lorenz H.M. Divided Wall Columns: Usefulness and Challenges / H.M. Lorenz, D. Staak, T. Grützner et al. // Chemical Engineering Transactions. — 2018. — № 69. — P. 229–234. — DOI: 10.3303/CET1869039
12. Petlyuk F.B. Thermodynamically optimal method for separating multicomponent mixtures / F.B. Petlyuk, V.M. Platonov, D.M. Slavinskii // International Chemical Engineering. — 1965. — № 3 (5). — P. 555–561.
13. Kaibel G. Distillation columns with vertical partitions / G. Kaibel // Chemical Engineering Technology. — 1987. — № 10. — P. 92–98. — DOI: 10.1002/ceat.270100112
14. Kaibel B. Unfixed dividing wall technology for packed and tray distillation columns / B. Kaibel, H. Jansen, E. Zich et al. // Distillation and Absorption Symposium Series. — 2006. — № 152. — P. 252–266.
15. Montz GmbH. MONTZ Trennwandkolonnen [Montz GmbH. MONTZ Dividing Wall Columns]. — 2020. — URL: <https://www.montz.de/montz-trennwandkolonnen> (accessed: 21.02.26) [in German]
16. Dejanović I. Dividing wall column—A break through towards sustainable distilling / I. Dejanović, Lj. Matijašević, Ž. Olujić // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. — 2010. — № 6 (49). — P. 559–580. — DOI: 10.1016/j.cep.2010.04.001
17. Sulzer Chemtech Dividing Wall Column / Sulzer Chemtech Ltd. — 2025. — URL: https://www.sulzer.com/-/media/files/products/separation-technology/brochures/english/dividing_wall_column_e10935_en_web.pdf (accessed: 21.02.26)
18. Kiss A.A. Advanced Control Strategies for Dividing-Wall Columns / A.A. Kiss, C.D. Ruben // Computer Aided Chemical Engineering. — 2010. — № 28. — P. 511–516. — DOI: 10.1016/S1570-7946(10)28086-0
19. Meik F.B. Design of Dividing-Wall Columns by Mixed-Integer Nonlinear Programming Optimization / F.B. Meik // Chemie Ingenieur Technik. — 2017. — № 5 (89). — P. 582–597. — DOI: 10.1002/cite.201700005
20. Uwitonze H. Improving NGL recovery process with dividing-wall column for offshore applications / H. Uwitonze, K.S. Hwang, I. Lee // Chemical Engineering and Processing - Process Intensification. — 2020. — № 147. — DOI: 10.1016/j.cep.2019.107747
21. Duanmu F. Optimal design of reduced vapor transfer dividing wall structures with and without heat integration / F. Duanmu, E. Sorensen // AIChE Journal. — 2024. — № 70 (11). — DOI: 10.1002/aic.18572
22. Robles-Zapiain S. Energy-efficient complex distillation sequences: Control properties / S. Robles-Zapiain, J.G. Segovia-Hernandez, A. Bonilla-Petriciolet et al. // Canadian Society for Chemical Engineering. — 2008. — № 86. — P. 249–259. — DOI: 10.1002/cjce.20021
23. Tamayo-Galvan V.E. Controllability analysis of alternate schemes to complex column arrangements with thermal coupling for the separation of ternary mixtures / V.E. Tamayo-Galvan, J.G. Segovia-Hernández, S. Hernández et al. // Computers & Chemical Engineering. — 2008. — № 32. — P. 3057–3066. — DOI: 10.1016/j.compchemeng.2008.04.007
24. Gómez-Castro F.I. Dividing wall distillation columns: Optimization and control properties / F.I. Gómez-Castro, J.G. Segovia-Hernández, S. Hernández et al. // Chemical Engineering & Technology. — 2008. — № 31. — P. 1246–1260. — DOI: 10.1002/ceat.20080011
25. Kiss A.A. Energy efficient control of a BTX dividing-wall column / A.A. Kiss, R.R. Rewagad // Computers & Chemical Engineering. — 2011. — № 35. — P. 2896–2904. — DOI: 10.1016/j.compchemeng.2011.03.024
26. Kiss A.A. A control perspective on process intensification in dividing-wall columns / A.A. Kiss, C.S. Bildea // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. — 2011. — № 50. — P. 281–292. — DOI: 10.1016/j.cep.2011.01.011



27. Donahue M.M. Dividing wall column control: Common practices and key findings / M.M. Donahue, B.J. Roach, J.J. Downs et al. // *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. — 2016. — № 107. — P. 106–115. — DOI: 10.1016/j.cep.2016.05.013
28. Qian X. Model Predictive Control of Reactive Dividing Wall Column for the Selective Hydrogenation and Separation of a C3 Stream in an Ethylene Plant / X. Qian, S. Jia, S. Skogestad et al. // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. — 2016. — № 36. — P. 9738–9748. — DOI: 10.1021/acs.iecr.6b02112
29. Wang H. Optimization and Sliding Mode Control of Dividing-Wall Column / H. Wang, Z. Wang, Q. Zhou // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. — 2020. — № 45. — P. 20102–20111. — DOI: 10.1021/acs.iecr.0c03564
30. Walk M. Validation of Differential Temperature Control for a Dividing Wall Distillation Column / M. Walk, J. Hamacher, J.J. Downs et al. // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. — 2021. — № 3. — P. 1341–1355. — DOI: 10.1021/acs.iecr.0c04570
31. Ramírez-Márquez C. Integrated process design and control of divided-wall distillation columns using molecular tracking / C. Ramírez-Márquez, E. Sánchez-Ramírez, N. Nazemzadeh et al. // *AIChE Journal*. — 2023. — № 11. — P. pp.e18225. — DOI: 10.1002/aic.18225
32. Uwitonze H. Improving NGL recovery process with dividing-wall column for offshore applications / H. Uwitonze, K.S. Hwang, I. Lee // *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. — 2020. — № 147. — DOI: 10.1016/j.cep.2019.107747