

Научная статья / Original research article

УДК 66.048.3

DOI: <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2026-4-100-116>

EDN: SIOTPS



Оптимизация работы колонны стабилизации установки каталитического риформинга

Л. В. Таранова*, В. С. Сергеев

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация

*taranovlv@tyuiu.ru

Аннотация. Представлены результаты исследований, направленных на оптимизацию работы стабилизационной колонны узла стабилизации реформата. Цель статьи — решение проблемы повышенного уноса части бензиновых фракций с дистиллятным продуктом с одновременным соблюдением требований к целевому продукту — стабильному реформату. Путем расчета и моделирования процесса стабилизации в среде Aspen HYSYS изучено и проанализировано влияние основных показателей: расхода орошения, температурного режима колонны и возможности конструктивной модернизации на качество получаемых продуктов. Выполнен гидравлический анализ, определен гидравлический лимит колонны. Установлен характер изменения целевых концентрационных показателей, осуществлена оценка дополнительных затрат на проведение процесса при увеличении расхода флегмы. Рассмотрена возможность увеличения количества тарелок, замена тарелок на насадки. Из предложенных вариантов для обеспечения требуемых показателей качества дистиллята с учетом содержания в нем высококипящих углеводородов и реформата с учетом давления насыщенных паров в качестве приоритетных отмечены варианты оптимизации температурного режима нижней части колонны и замены тарелок на регулярную пакетную насадку.

Ключевые слова: каталитический риформинг, стабилизация реформата, параметры стабилизации, контактные устройства

Для цитирования: Таранова Л. В., Сергеев В. С. Оптимизация работы колонны стабилизации установки каталитического риформинга. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2026;30(4):100–116. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2026-4-100-116> EDN: SIOTPS

Optimization of the catalytic reforming unit stabilization column operation

Lyubov V. Taranova*, Vadim S. Sergeev

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

*taranovlv@tyuiu.ru

Abstract. This article explores approaches for optimizing the performance of the reformat stabilizer within a catalytic reforming unit. This study aims to minimize the loss of gasoline-range hydrocarbons in the distillate while ensuring the required quality of the final product, stable reformat. The authors modeled the stabilization process in Aspen HYSYS and evaluated the influence of the main parameters: reflux rate, column temperature profile, and possible design modifications on product quality. The researchers also performed a hydraulic analysis and determined the hy-

draulic capacity limit of the column. The study demonstrates how the key product specifications change under different operating conditions. Authors also evaluate the additional operating costs associated with higher reflux rates. The article considers an increase in the number of trays and the replacement of trays with packings. The authors analyzed several options to ensure product quality. To limit high-boiling hydrocarbons in the distillate and control the Reid Vapor Pressure of the reformat, they suggest two solutions. The first solution involves optimizing the temperature regime in the lower part of the column. The second solution requires replacing the trays with structured packed beds.

Keywords: catalytic reforming, reformat stabilization, stabilization parameters, contact devices

For citation: Taranova L. V., Sergeev V. S. Optimization of the catalytic reforming unit stabilization column operation. *Oil and Gas Studies*. 2026;30(4):100–116. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2026-4-100-116>

Введение

Газовые конденсаты, добываемые при разработке газоконденсатных и нефтегазоконденсатных месторождений, являются основой для получения моторных топлив и исходного сырья для последующих преобразований на предприятиях нефтехимии путем его переработки.

При этом широко распространен процесс каталитического риформинга для химического преобразования прямогонной гидроочищенной бензиновой фракции (85–180 °C) в среде водородсодержащего газа с целью получения основы высокооктановых бензинов и ароматических углеводородов ряда бензола [1–3].

Продукт процесса — катализат, представляющий собой смесь различных углеводородов (УВ), перед разделением с получением целевых продуктов нуждается в стабилизации для удаления легких УВ — газов состава C₁–C₄, образующихся в качестве побочных продуктов риформинга. Эта стадия весьма важна с позиций обеспечения требуемого качества риформата по совокупному показателю — давлению насыщенных паров (ДНП), предотвращения потерь легких УВ как ценного сырья нефтехимии. Присутствие легких УВ в составе риформата негативно сказывается также на процессах его внутритехнологического транспорта, а применительно к автомобильному бензину как конечному продукту переработки — к возможности образования паровых пробок в топливной системе. Все это в совокупности определяет значимость процессов стабилизации при реализации каталитического риформинга, что и обусловило направление настоящих исследований по решению задач его оптимизации.

В основе стабилизационных процессов, как известно, лежит ректификация с делением компонентов смеси с учетом разницы температур их кипения. Для повышений эффективности ректификации можно применять разные подходы как технологического, так и конструктивного плана, в частности:

- определение оптимальной точки ввода сырья с учетом возможного изменения его состава;
- оптимизация температурного режима по высоте колонны, что определяется подачей потоков орошения (флегмы) и пара, а также давления реализации процесса [4–7];
- повышение эффективности контактных устройств или переход к более совершенным их разновидностям как в пределах типа устройств (тарелки или насадки), так и с переходом от одного типа к другому (в частности, от тарелок к насадочным устройствам) [8–12] с разработкой более совершенных конструкций, в частности клапанных тарелок с перфорированными элементами [12], перекрестноточных и струйно-плёночных насадок [9, 11], а также широкое применение новых материалов — пластиков для изготовления новой линейки элементов контактных устройств.

При решении задач оптимизации ректификационных процессов следует учитывать лимитирующие моменты, связанные с гидродинамическими режимами их реализации [13, 14] и возникающими сопротивлениями, а также необходимость корректировки параметров (температуры, давления) потоков установки в целом при их изменении в основном колонном аппарате с учетом реализации технологических процессов как непрерывно действующих. Это определяет необходимость комплексных подходов при реализации оптимизационных задач с ориентировкой на технологическое совершенствование и техническую модернизацию.

Цели настоящей работы связаны с выработкой предложений для повышения эффективности процесса стабилизации продуктовой смеси риформинга с повышением качества продуктов разделения применительно к узлу стабилизации установки каталитического риформинга.

Задачи: анализ влияния параметров процесса (расход флегмы, температура) и конструктивных изменений (количество и тип контактных устройств) на гидродинамические и температурные режимы работы колонны стабилизации риформата на состав и качество продуктов стабилизации с учетом предъявляемых к ним требований.

Объекты и методы исследования

Объект изучения — типовая установка каталитического риформинга для производства высокооктанового компонента автобензинов (рис. 1) с детальным рассмотрением блока стабилизации, предназначенного для извлечения легких УВ-газов состава C_1 - C_4 из продуктов риформинга — после сепарации ВСГ из их состава с получением стабильного риформата.

Целевой процесс — ректификационное разделение нестабильного риформата — осуществляется в колонне стабилизации К-1 переменного диаметра ($D_v = 1,4$ м; $D_n = 2,8$ м), оснащенной клапанными тарелками (одно- и двухпоточными, с расстоянием между тарелками $h_r = 0,5$ и $0,6$ м в верхней и нижней части соответственно).

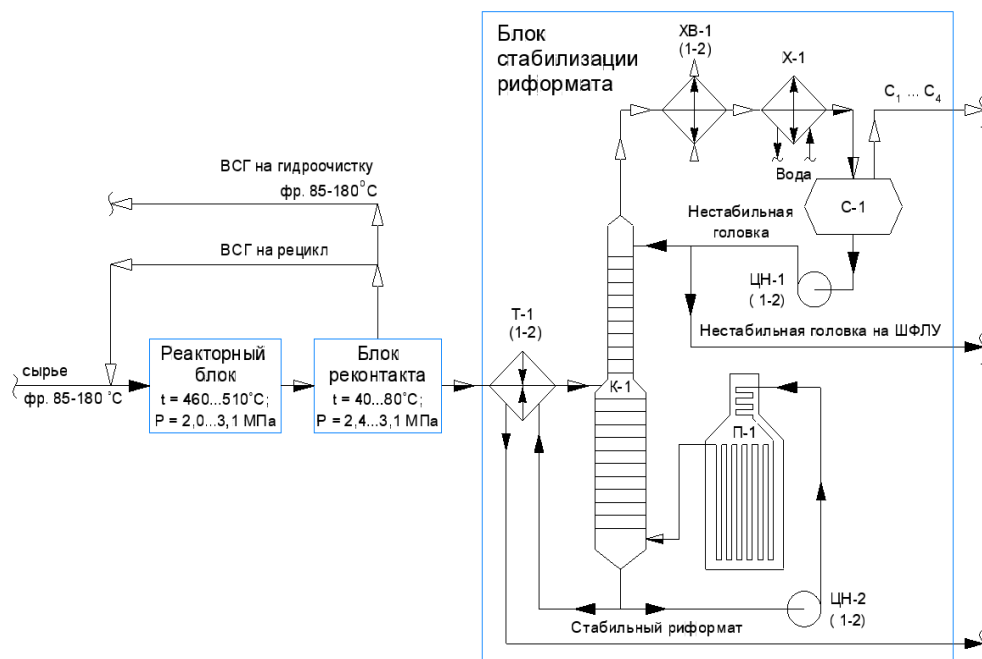


Рис. 1. Блочная схема установки каталитического риформинга и принципиальная схема узла стабилизации риформата: Т-1 — регенеративный теплообменник; ХВ-1 — аппарат воздушного охлаждения; Х-1 — водяной холодильник; П-1 — печь горячей струи; К-1 — колонна стабилизации риформата; С-1 — буферная емкость; ЦН-1, 2 — насосы центробежные

Fig. 1. Block diagram of the catalytic reforming unit and process flow diagram of the reformat stabilization section: Т-1 — recuperative heat exchanger; ХВ-1 — air cooler; Х-1 — water cooler; П-1 — hot-oil furnace; К-1 — reformat stabilization column; С-1 — surge vessel; ЦН-1, 2 — centrifugal pumps

Ключевые параметры работы и характеристики потоков сырья и продуктов разделения, требования к ним и значения, принятые для моделирования, сведены в таблицу 1.

Анализ работы изучаемого объекта позволил выявить проблемы, возникшие в работе узла стабилизации и связанные с недостаточной эффективностью реализации процесса в основной колонне: унос части жидких УВ дистиллятным продуктом с превышением содержания высококипящих компонентов в дистилляте (C_{C5+}^D) выше допустимых значений, определенных порогом — $C_{C5+}^D \leq 0,5$ % масс. при текущем значении этого показателя порядка 1,5 % масс.

С учетом этого в рамках детализации задач исследований определили выработку предложений по минимизации содержания C_{C5+}^D с одновременным удовлетворением требований к стабильному риформату по совокупному показателю — давление насыщенных паров (ДНП): $P_{\text{днп}} \leq 15,0$ кПа.

Таблица 1. Параметры процесса стабилизации и характеристики потоков
Table 1. Operating conditions and stream specifications

Показатель		Норма по регламенту	Параметр в модели
Параметр работы	Температура верха, °C	30,00÷64,00	56,38
	Температура низа, °C	180,00÷216,00	211,85
	Давление верха, кПа	700÷1200	1 040
	Давление низа, кПа	750÷1350	1 050
Нестабильный риформат	Расход (F), м ³ /ч	—	108,67
	Сумма C ₁ ÷C ₄ , % масс	—	10,24
	УВ состав, % масс.:	—	
	- парафиновые		22,51
	- нафтеновые		4,78
	- ароматические		72,54
	- непредельные		0,17
Орошение	Расход флегмы (L), м ³ /ч	≤ 40,00	30,00
Дистиллят	Расход (D), м ³ /ч	≤ 18,70	15,93
	УВ состав, % масс.:		
	C ₁ ÷C ₂	≤ 15,00	3,04
	C ₃ ÷C ₄	≤ 99,0	95,43
	C ₅ +выше	≤ 0,5	1,53
Стабильный риформат	Расход (W), м ³ /ч	81,00÷135,00	92,71
	Сумма C ₁ ÷C ₄ , % масс.	—	0,06
	ДНП (P _{днп}), кПа	≤ 15,00	10,54

Для решения поставленных задач выполнили построение математической модели стабилизационной колонны в среде Aspen HYSYS на основе параметров работы изучаемого аппарата. Принятые для моделирования показатели приведены также в таблице 1. Для оптимизации параметров по аналогии с подходом [7] применяли метод итеративного моделирования.

При решении задач внутриаппаратурной модернизации при моделировании тарельчатой колонны тип тарелок оставляли без изменения с использованием минимальных для клапанных тарелок значений КПД — $\eta = 0,7$ [15]. Моделирование процесса с заменой контактных устройств на насадочные проводили на примере предварительно отобранной насадки GT-РАК [16], используя выработанный ранее подход к выбору насадок [17]. Насадка GT-РАК — регулярная структурная пакетная гофрированная насадка с характеристиками для разновидностей GT-РАК 250, 350, 440:

- удельная поверхность (f_a) — 250–440 м²/м³;
- объемная плотность 93–168 кг/м³.

Результаты и обсуждение

Для решения целевой проблемы оптимизации работы колонны авто-рами изучены и оценены влияние количества орошения (флегмы), температурного режима в кубовой части колонны и варианты конструктивных изменений на качество продуктов стабилизации.

Увлечение расхода флегмы (L) благоприятно сказывается на интенсификации взаимодействия паровой и жидкой фаз, что повышает эффективность процесса, однако при этом снижается выработка дистиллятного продукта, возрастают затраты на перекачку увеличенного количества флегмы и ее испарение внутри колонны, возникает риск превышения гидравлического предела работы колонны ввиду роста расходов пара и жидкости.

В этой связи на основе анализа программного гидравлического расчета оценили гидравлический лимит работы концентрационной части колонны — максимальные расходные показатели до перехода в режим «захлебывания» контактного устройства, рассмотрев влияние изменения расхода флегмы в диапазоне от текущих рабочих до предельных регламентных значений — $L = 30 \div 40 \text{ м}^3/\text{час}$ с шагом $1 \text{ м}^3/\text{час}$ с построением и анализом гидравлических графиков, приведенных на рисунке 2, на примере одной из тарелок верхней части колонны.

Анализ показал, что с увеличением плотности орошения рабочая точка стремится к верхней границе резерва переливной трубы и выходит за пределы эффективной работы тарелки при значениях $L = 40 \text{ м}^3/\text{час}$, то есть гидравлический лимит в условиях моделирования определен как $L \leq 39 \text{ м}^3/\text{ч}$.

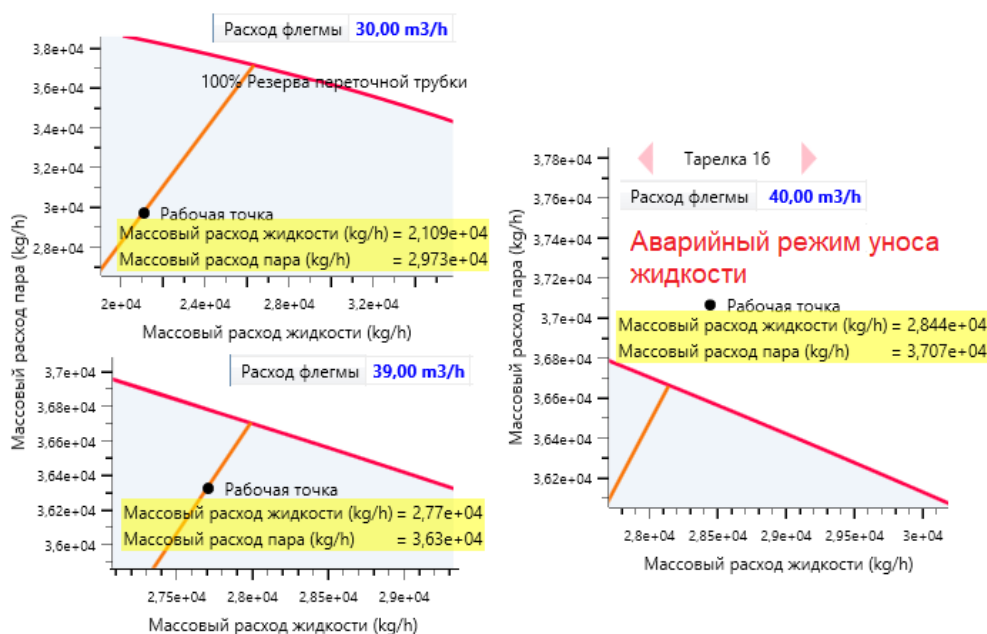


Рис. 2. Верификация модели по допустимому расходу флегмы
Fig. 2. Model verification based on allowable reflux rate

В качестве параметров оценивали изменение содержания компонентов C5+ в дистилляте, изменение гидравлических сопротивлений (ΔP) а

также тепловых нагрузок (Q) в единицах теплообменного оборудования на линиях дистиллята и кубовой жидкости (рис. 3), обеспечивающих поддержание температурного режима. При этом для обеспечения требований по ДНП стабильного риформата задавались концентрацией н-бутана на уровне 0,05 % масс.

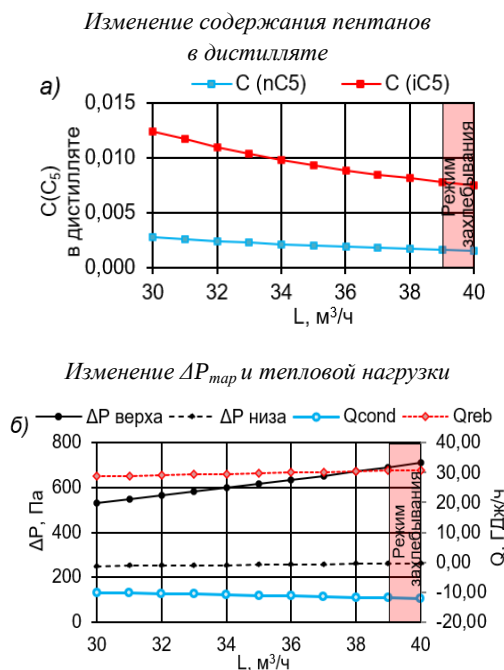


Рис. 3. Влияние расхода флегмы (L , m^3/h) на массовую долю пентанов в дистилляте (а); гидравлические сопротивления и тепловую нагрузку конденсатора и кипятыльника (б) (базовая модель)
Fig. 3. Effect of reflux rate (L , m^3/h) on the mass fraction of pentanes in the distillate (a); hydraulic resistance, and condenser and reboiler duties (b) (base model)

Результаты моделирования процесса, приведенные на рисунке 3, показывают, что при увеличении количества флегмы с 30 до 39 m^3/h в базовой модели наблюдается следующее:

- содержание пентанов в дистилляте ($C_{C_5+}^D$) снижается с 1,53 до 0,94 % масс. (на 38,6 %);
- рост гидравлического сопротивления с повышением ΔP на каждой контактной ступени верхней части ($\Delta P_{\text{тар}}$) с 530,41 до 690,68 Па (увеличение порядка 30 %); в нижней части при этом рост $\Delta P_{\text{тар}}$ незначительный — с 249,2 до 261,0 Па с увеличением показателя на 4,7 %;
- повышение тепловой нагрузки в ребойлере Q_{reb} с 28,76 до 30,66 ГДж/ч; изменение нагрузки в конденсаторе Q_{cond} с минус 10,07 до минус 11,98 ГДж/ч (увеличение общей тепловой нагрузки в узле стабилизации порядка 9,8 %).

Исследования по оптимизации температурного режима, как одного из действенных способов удовлетворения качественных показателей процесса, включали оптимизацию диапазона температур в кубовой части колонны, с учетом диапазона регламентных значений параметра — $t_n = 180 \div 216$ °C (см. табл. 1). При этом исходили из одновременного вы-

полнения требований и по содержанию остаточных пентанов в дистилляте ($C_{C5+}^D \leq 0,5\%$ масс), и по достаточному извлечению легких УВ из стабильного конденсата для удовлетворения требований по ДНП ($P_{\text{днп}} \leq 15,0$ кПа). При определении путей поиска оптимального температурного режима по аналогии с [7] применяли многовариантное моделирование, проводя процедуру в условиях, заданных выше параметров модели по расходу флегмы, давлению в соответствующих частях колонны (см. табл. 1) при неизменности температуры в конденсаторе.

Термодинамически, при заданных параметрах, для нижней части колонны модель работает в диапазоне температур $180 \div 214^\circ\text{C}$. Результаты программного расчета температурного режима кубовой части стабилизатора приведены на рисунке 4, где показано изменение целевых показателей (содержание пентанов и ДНП) для дистиллятного и остаточного продуктов, а также изменение бутанов в стабильном риформате в зависимости от температуры кубовой части колонны. Повышение температуры в кубе (при прочих равных условиях) закономерно увеличивает нагрузку по пару, что ведет к снижению флегмового числа и ухудшению разделительной способности верхней части колонны. Температурный режим куба колонны поддерживается испарителем, и в условиях постоянства расхода флегмы $L = 30 \text{ м}^3/\text{ч}$ при проведении расчетных итераций увеличение температуры закономерно приводит к повышенному парообразованию и неполной конденсации возросшего количества паров с ростом доли пентанов в дистилляте.

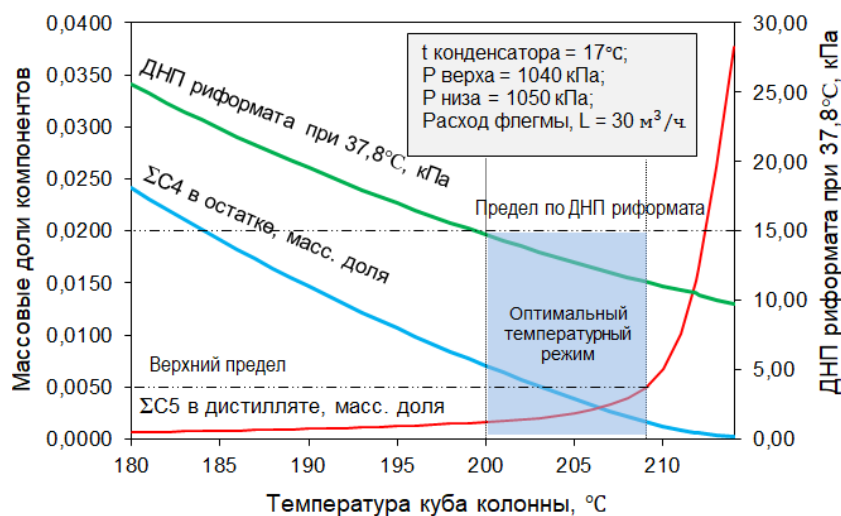


Рис. 4. Результаты программных расчетов температурного режима кубовой части колонны

Fig. 4. Simulation temperature profile in the bottom section of the column.

При анализе данных многовариантных расчетов можно отметить, что повышение температуры куба увеличивает парообразование и унос пента-

новых УВ (C_{5+}) с резким их ростом при температуре более 210 °С, а чрезмерное снижение показателя ухудшает степень отпарки бутанов (ΣC_4), приводя к повышению $P_{\text{ДНП}}$ стабильного риформата выше допустимых значений при температуре $t_n < 185$ °С.

Анализ графических построений с учетом верхних пределов по ДНП и содержанию C_{5+} в дистилляте (пунктирные линии) позволил определить оптимальный температурный диапазон $t_n = 200 \div 209$ °С с варьированием целевых показателей в пределах: 0,16÷0,49 % масс. по содержанию пентанов в дистилляте и 11,34÷14,72 кПа по ДНП. Таким образом, в этих условиях одновременно выполняются заданные требования к качеству и дистиллята ($C_{C_{5+}}^D \leq 0,5\%$ масс.), и стабильного риформата ($P_{\text{ДНП}} \leq 15$ КПа).

Так, обозначенная проблема, связанная с избыточно высокой концентрацией пентанов в дистилляте, может быть решена посредством снижения температуры в нижней части колонны с 211,85 °С (параметр исходной модели) до 200÷209 °С при постоянстве температуры в конденсаторе, давления верха и низа колонны и расхода острого орошения.

При анализе влияния температурных изменений в кубе стабилизатора на изменение тепловых нагрузок теплообменное оборудование и расходы потоков отмечено, что снижение t_n до уровня 200÷209 °С:

- обеспечивает снижение тепловых нагрузок на кипятильник на 0,76÷3,06 % (с 28,76 ГДж/ч до 28,54÷27,88 ГДж/ч) и на конденсатор на 1,29÷3,77 % (с минус 10,08 ГДж/ч до минус 9,95 ÷ минус 9,70 ГДж/ч), то есть экономически оправдано с учетом минимизации и тепловых и эксплуатационных затрат при работе узла стабилизации;
- приводит к изменению расходов потоков: для дистиллята — к снижению на 1,94÷7,03 % (с 15,93 м³/ч до 15,62÷14,81 м³/ч); для остатка — к увеличению на 0,31÷1,11 % (с 92,71 м³/ч до 93,00÷93,74 м³/ч).

Дополнительную оптимизацию температуры куба с учетом этого следует проводить исходя из технико-экономических соображений.

При рассмотрении возможностей аппаратурной модернизации в работе изучили два сценария — возможность увеличения количества тарелок (n_d), оставаясь в пределах используемого типа тарелок; возможность перехода к насадкам с проработкой предложений применительно к верхней части колонны.

В первом случае ориентировались на возможность сокращения расстояния между тарелками с $h_t = 500$ мм до $h_t = 400$ мм (отталкиваясь от небольшого диаметра верха колонны), что обеспечит возможность установки двух дополнительных тарелок в верхней части с увеличением n_d с 10 до 12. При этом определяли новый гидравлический лимит в изменившихся условиях, учитывая, что сокращение межтарельчатого расстояния усложняет гидродинамическую обстановку за счет сокращения сепарационного пространства и неблагоприятно влияет на работу сливных устройств. Это за-

кономерно приведет к уменьшению максимально возможного для безаварийного режима работы расхода флегмы.

По сравнению с результатами, полученными для базового варианта (см. рис. 2), при $h_r = 400$ мм по результатам моделирования (рис. 5) получили сокращение предельно допустимых значений по параметру L с 39 до 34 м³/ч с риском аварийного уноса жидкости при более высоких расходах орошения.

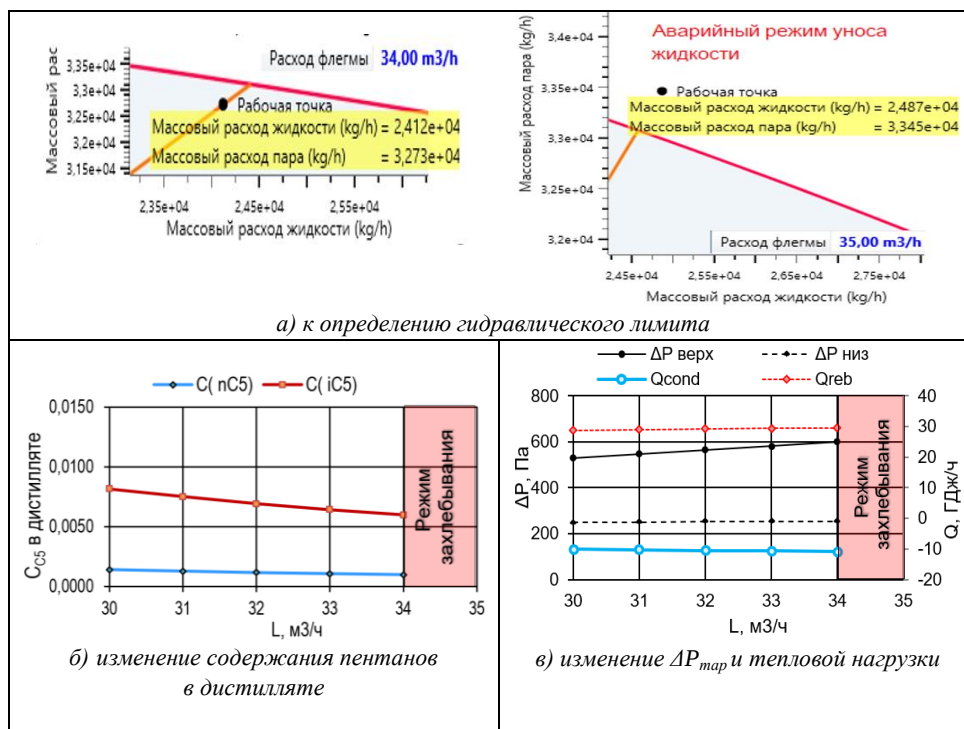


Рис. 5. Определение гидравлического лимита (а) и изменение показателей процесса (б, в) в зависимости от расхода флегмы (при $h_m = 400$ мм)
Fig. 5. Hydraulic limit (а) and performance (б, в) as a function of reflux rate (at $h_m = 400$ mm)

Добавление двух ступеней контакта при увеличении флегмового расхода обеспечивает следующие изменения показателей процесса:

- содержание УВ состава C_{5+} снижается до $C_{C_{5+}}^D = 0,70$ % масс;
- гидравлическое сопротивление ступени контакта ($\Delta P_{\text{тар}}$) в верхней тарельчатой части повышается с 530,41 до 598,5 Па (на 12,8 %);
- суммарная тепловая нагрузка в кипятильнике (Q_{reb}) и конденсаторе (Q_{cond}) возрастает на 4,3 %.

При этом, как и при рассмотрении варианта увеличения расхода флегмы, задавались содержанием бутанов в риформате на уровне $C_{C_4} = 0,05$ % масс для соблюдения требований по $P_{\text{днп}}$.

В качестве еще одного подхода к оптимизации работы колонны рассмотрена возможность замены тарелок на насадочные контактные устройства в укрепляющей части колонны, учитывая небольшой диаметр этой части ($D_b = 1,4$ м). В качестве насадки рассмотрели разновидности регулярной пакетной насадки GT-PAK с удельной поверхностью $f_a = 250, 350, 440 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

Преимущество данного подхода заключается в возможности повышения четкости разделения без изменения габаритных размеров колонны, а также в снижении ΔP верха части колонны, что обусловлено гидродинамикой пленочного течения в регулярных насадках.

Для оценки применимости насадки в колонне с удовлетворением требований к качеству дистиллятного продуктов оценили возможность размещения требуемого количества насадки в верхней секции с учетом ее габаритных размеров ($D_b = 1,4$ м, $H_{\text{тар}} = 4$ м), рассчитав требуемую высоту слоя насадки, обеспечивающей выполнение требований $C_{C5+}^D \leq 0,5 \text{ \% масс.}$

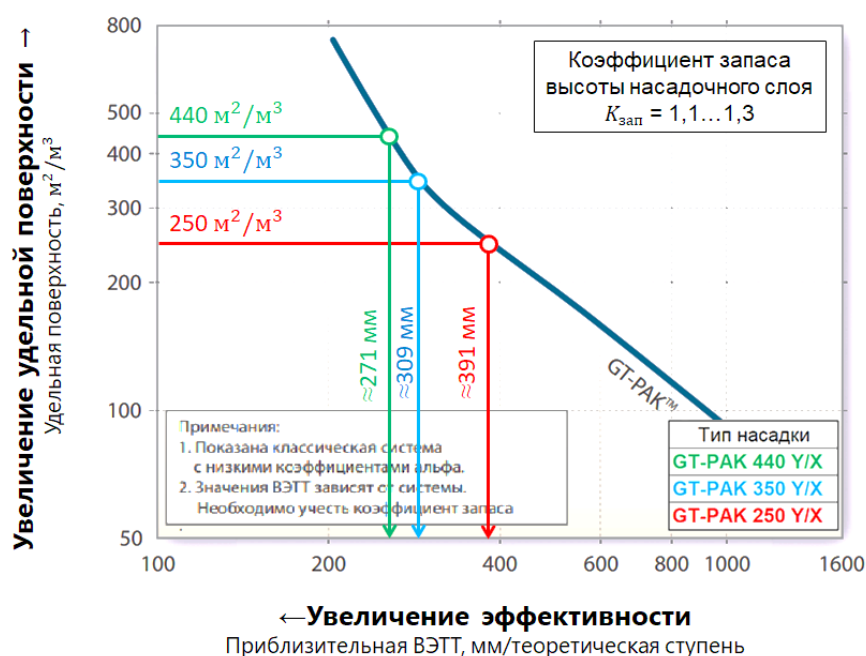


Рис. 6. Результаты подбора высоты теоретической ступени насадки GT-PAK
Fig. 6. Results of height equivalent to a theoretical stage for GT-PAK structured packing

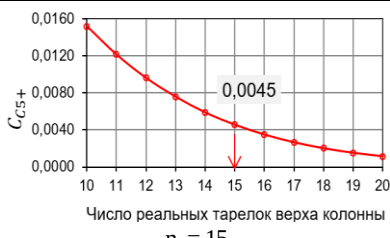
При этом высоту эквивалентной теоретической тарелки (ВЭТТ — $h_{\text{этт}}$) для насадок подбирали по эмпирическим корреляциям от производителя насадки GT-PAK [16] (рис. 6) с учетом удельной поверхности (f_a) [16]. Закономерно, что с увеличением значений f_a , определяющих эффективность устройств, наблюдается снижение ВЭТТ и, следовательно, расчетной

высоты насадочного слоя ($H_{\text{сл}}$, м), необходимой для достижения заданной степени разделения. Исходя из этих соображений, к последующему расчету принята насадка с $f_a = 440 \text{ м}^2/\text{м}^3$ с величиной $h_{\text{этт}} = 271 \text{ мм}$.

При выборе модели насадки произведен расчет $H_{\text{сл}}$ как произведение $h_{\text{этт}}$ на требуемое число теоретических тарелок в верхней секции колонны (ЧТТВ – $n_{\text{тТВ}}$). С целью обеспечения гарантированного запаса разделительной способности в расчет введен коэффициент запаса ($K_{\text{зап}} = 1,1 \div 1,3$) [18]. Для расчета приняты максимальные значения. Значения числа теоретических тарелок в верхней секции найдены с учетом предварительно определенного числа реальных тарелок для удовлетворения требований $C_{C5+}^D \leq 0,5 \text{ \% масс}$ ($n_p=15$) с учетом КПД используемых контактных устройств ($\eta=0,7$). Результаты расчетов сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Расчет высоты слоя насадки (верхняя часть колонны)

Table 2. Calculation of the required structured packing height in the upper section of the column

Характеристики GT-PAK		Число реальных тарелок (верх) n_p , шт (при $C_{C5+}^D \leq 0,5 \text{ \% масс}$)	Число теоретических тарелок (верх) $n_{\text{тТВ}}$, шт.	Высота слоя насадки (верх) $H_{\text{сл}}$, м
$f_a \text{ м}^2/\text{м}^3$	$h_{\text{этт}}$, мм			
440	271	 Число реальных тарелок верха колонны $n_p = 15$	$n_{\text{тТВ}} = n_p \cdot \eta = 15 \cdot 0,7 = 10,5$	$H_{\text{сл}} = h_{\text{этт}} \cdot n_{\text{тТВ}} \cdot K_{\text{зап}} = 0,271 \cdot 10,5 \cdot 1,3 = 3,7 \text{ м}$ $H_{\text{сл}} < H_{\text{тар}}$

В итоге получили требуемую высоту слоя насадки с учетом максимального запаса на уровне $H_{\text{сл}} = 3,7 \text{ м}$, что ниже суммарной высоты тарельчатого слоя в верхней части стабилизатора ($H_{\text{тар}} = 4 \text{ м}$). Следовательно, в верхней части действующей колонны можно разместить необходимое количество насадки для удовлетворения требований к составу дистиллятного продукта. При этом обеспечивается содержание $C_{C5+}^D \leq 0,5 \text{ \% масс}$. без изменения технологической схемы и основных режимных параметров процесса стабилизации. Переход от тарелок к насадкам, особенно регулярным, должен обеспечить также снижение гидравлических сопротивлений. По ориентировочным расчетам и результатам моделирования этот показатель для расчетной высоты слоя насадки оценили на уровне 340 Па. Обобщая проведенные в работе исследования, сопоставили данные по изменению ключевых показателей процесса при рассмотренных вариантах оптимизации (табл. 3).

Таблица 3. Сравнение показателей процесса стабилизации для различных вариантов
Table 3. Comparison of stabilization process parameters for different variants

Показатель/ вариант	Базовый	Увеличение L	Увеличение n_d и L	Оптимизация t_n	Слой насадки
$L \text{ м}^3/\text{ч}$	30	39	34	30	30
$C_{C5+}^D, \% \text{ масс}$	1,53	0,94	0,70	0,16 – 0,49	$\leq 0,5$
$\Delta P_{\text{тар}} \text{ верха, Па}$	530,41	690,68	598,5	–	340*
$\Sigma Q, \text{ ГДж/ч}$	38,83	42,64	40,51	37,58 – 38,49	–

Примечание * — сопротивление слоя насадки

При сравнении рассмотренных вариантов можно заключить, что увеличение флегмового расхода и в сочетании с увеличением количества тарелок в верхней части колонны (в пределах допустимых для действующей колонны значений) не обеспечивает выполнение требований по содержанию компонентов C_{5+} в дистиллятном продукте. Кроме того, наблюдается рост гидравлических сопротивлений и увеличение затрат тепла на реализацию процесса.

В качестве предпочтительных вариантов выделены:

- оптимизация температуры куба колонны с определением оптимального диапазона $t_n = 200 \div 209 \text{ }^\circ\text{C}$, что обеспечивает выполнение требований к качеству дистиллята ($C_{C5+}^D \leq 0,5\% \text{ масс} - 0,16 \div 0,49 \% \text{ масс.}$) и риформата ($P_{\text{днп}} \leq 15 \text{ КПа} - 11,34 \div 14,72 \text{ кПа}$); снижение температуры по сравнению с базовым вариантом обеспечивает сокращение тепловых нагрузок на теплообменники узла стабилизации;
- размещение регулярной пакетной насадки в верхней части колонны взамен используемых тарелок; при этом высоты верхней контактной зоны достаточно для размещения требуемого количества насадки для удовлетворения требований $C_{C5+}^D \leq 0,5 \% \text{ масс}$ без изменения температурных и расходных параметров процесса.

Выводы

Рассмотрены возможные варианты оптимизации гидравлических и температурных режимов работы с элементами конструктивной модернизации стабилизационной колонны установки каталитического риформинга для обеспечения требуемого качества продуктов разделения катализата.

1. Путем программного моделирования процесса определен гидравлический лимит концентрационной части колонны; изучено влияние количества орошения на эффективность разделения продуктов риформинга и затраты на реализацию процесса стабилизации.

2. Показана возможность повышения качества дистиллятного продукта с уменьшением содержания компонентов C_{5+} в 1,5–2 раза при соблюдении требований к стабильному риформату за счет повышения флег-

мового расхода и в сочетании с увеличением количества тарелок с 10 до 12 в верхней части стабилизатора. Однако в этих случаях не обеспечиваются целевые показатели для дистиллята — $C_{C5+}^D \leq 0,5$ % масс, происходит рост гидравлических сопротивлений (порядка 13–30%) с увеличением тепловой нагрузки на в конденсаторе и испарителе (на уровне 5–10 %).

3. Изучено влияние температуры на показатели процесса с определением оптимального диапазона температур нижней части колонны на уровне $t_n = 200 \div 209$ °С, что обеспечивает удовлетворение требований к качеству продуктов на уровне $C_{C5+}^D = 0,16 \div 0,49$ % масс. (при норме $\leq 0,50$ % масс) — для дистиллята и $P_{днп} = 14,72 \div 11,34$ кПа (при норме ≤ 15 кПа) — для риформата; снижение температуры по сравнению с базовым вариантом обеспечивает также сокращение тепловой нагрузки на поддержание температурного режима колонны.

4. Предложен и расчетно обоснован вариант замены контактных устройств в концентрационной части колонны с использованием насадок взамен тарелок с определением необходимой для удовлетворения требований к качеству продуктов разделения высоты насадочного слоя. Показано, что применение пакетной насадки GT-РАК 440 обеспечит достижение целевых показателей без изменения температурного режима и расходных показателей участвующих в процессе потоках с уменьшением при этом затрат на преодоление гидравлических сопротивлений. Предложение технически реализуемо, учитывая, что расчетное значение высоты слоя насадки удовлетворяет конструктивным ограничениям, не превышая высоты контактной зоны верхней части стабилизатора.

Таким образом, для решения проблемы сверхнормативного уноса пентанов в колонне стабилизации, с удовлетворением требований к стабильному риформату по давлению насыщенных паров, можно предложить коррекцию температурного режима куба колонны или вариант замены тарелок на насадку с оптимизацией выбора на основе технико-экономического обоснования.

Вклад авторов

Таранова Л. В.: формулирование идеи, цели исследования; теоретический анализ и обобщение данных; концептуализация; написание статьи; научное редактирование.

Сергеев В. С.: сбор и анализ исходных материалов; формулирование цели и задач; проведение исследования; проработка методических подходов; выполнение расчетов; создание иллюстраций; написание статьи.

Authors' contributions

Lyubov V. Taranova: formulation of idea and aim; theoretical analysis and data synthesis; conceptualization; writing; scientific editing.

Vadim S. Sergeev: collection and analysis of study materials; formulation of aim and objectives; study; development of methodological approaches; calculations; creating illustrations; writing.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Список источников

1. Маслянский Г. Н., Шапиро Р. Н. *Каталитический риформинг бензинов. Химия и технология*. Санкт-Петербург : Химия; 1985. 213 с.
2. Ахметов С. А. *Технология глубокой переработки нефти и газа*. Уфа: Гилем; 2002. 672 с.
3. Капустин В. М., Гуреев А. А. *Технология переработки нефти. Часть 2. Деструктивные процессы*. Москва: КолосС; 2007. 334 с.
4. Ермолин Д. Б., Магарил Е. Р., Магарил Р. З. Повышение эффективности работы стабилизационных колонн в нефтегазовой промышленности. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2018;(4):107–114. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2018-4-107-114>
5. Матякубов Ш. Э., Хуснутдинов И. Ш., Гаффаров А. И., Заббаров Р. Р., Хуснутдинов С. И., Сафиулина А. Г. [и др.]. *Способ повышения разделяющей и/или пропускной способности ректификационных колонн разделения бинарных или многокомпонентных смесей*. Российская Федерация. Патент № 2694341 С1. 11 июля 2019. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2694341C1/ru>
6. Коронатов Н. Н., Кузичкин Н. В., Лисицын Н. В. Моделирование и оптимизация химико-технологической системы вторичной ректификации бензинов ксилольного риформинга. *Известия Санкт-Петербургского государственного технического университета (технического университета)*. 2014; 27(53):47–55.
7. Абдурахимов К. А., Абдурахимов М. А., Ли Р. Ч. Исследование по определению температурного режима эксплуатации колонны дебутанизации на установке стабилизации конденсата «Кокдумалак». *Universum: технические науки*. – 2024;3-5(120):16–20. URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/17117>
8. Пятаев И. И., Москалев Л. Н., Францкевич В. С., Ланкин Р. И. Сравнение эффективности внутренних устройств колонны стабилизации при переработке нестабильного бензина. *Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология*. 2025;2(295):102–108.
9. Марешова Л. А., Богатых К. Ф., Рольник Л. З., Ягафарова Г. Г. Результаты внедрения в промышленность разработок по регулярным перекрестноточным насадкам учеными Уфимского государственного нефтяного технического университета. *Электронный научный журнал Нефтегазовое дело*. 2007;(1):74.
10. Беренгартен М. Г., Козин Ю. В. Экспериментальное изучение структуры потоков в тарельчато-насадочных колонных экстракторах. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2022;84(2(92)):228–233. <http://doi.org/10.20914/2310-1202-2022-2-228-233>
11. Мадышев И. Н., Харьков В. В., Маясова А. О., Дмитриев А. В. Расширение диапазона устойчивой и эффективной работы тепломассообменных аппаратов со струйно-плёночными контактными устройствами. *Вестник Технологического университета*. 2020; 23(12):118–121.
12. Халил В. Б., Аль-Саэди М. Д., Мисюля Д. И. Исследование гидравлического сопротивления и эффективности клапанной тарелки новой конструкции. *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки*. 2013;(3):172–175.
13. Ахмеров Д. Р., Мухаметзянова А. Г. Повышение эффективности технологических установок нефтеперерабатывающих заводов с применением Aspen HYSYS. *Вестник Технологического университета*. 2025;28(1):127–131. http://doi.org/10.55421/1998-7072_2025_28_1_127

14. Калимгулова А. М., Самойлов Н. А., Просочкина Т. Р., Ишалина О. В., Никитина А. П., Калимгулова И. М. [и др.]. Анализ гидравлического режима работы контактных устройств с целью повышения эффективности разделения в ректификационной колонне стабилизации дизельного топлива. *Башкирский химический журнал*. 2019;26(2):127–132. <http://doi.org/10.17122/bcj-2019-2-127-132>
15. Таранова Л. В. Машины и аппараты химических производств: учебное пособие. Тюмень : ТюмГНГУ; 2011. 200 с.
16. РИФИНГ: сайт. URL : <http://www.reefing.ru/index.php?id=32>
17. Таранова Л. В., Сергеев В. С. Оптимизация выбора контактных устройств массообменных аппаратов для повышения качества продукции. В сб.: *Российская наука в фокусе перемен: сборник статей по итогам Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Волгоград, 4 сентября 2025 года*. Стерлитамак: ООО «Агентство международных исследований»; 2025. С. 55–59.
18. INNER: сайт. URL: <https://inner.su/articles/raschet-vysoty-nasadochnykh-kolonn-cherez-vett-i-gidravlichesкое-soprotivlenie/>

References

1. Maslyansky G. N., Shapiro R. N. *Catalytic reforming of gasoline. Chemistry and technology*. St. Petersburg: Chemistry; 1985. (In Russ.).
2. Akhmetov S. A. *Deep Oil and Gas Refining Technology*. Ufa: Gilem; 2002. (In Russ.).
3. Kapustin V. M., Gureev A. A. *Oil Refining Technology*. Part 2. Destructive Processes. Moscow: KolosS; 2007. (In Russ.).
4. Ermolin D. B., Magaril E. R., Magaril R. Z. Increasing the effectiveness of stabilization columns in the oil and gas industry. *Oil and Gas Studies*. 2018;(4):107–114. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2018-4-107-114>
5. Matyakubov Sh. E., Khusnutdinov I. Sh., Gaffarov A. I., Zabbarov R. R., Khusnutdinov S. I., Safiulina A. G. [et al.]. *A method for increasing the separation and/or capacity of rectification columns for separating binary or multicomponent mixtures*. Russian Federation. Patent No. 2694341 C1. July 11, 2019. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2694341C1/ru>
6. Koronotov N. N., Kuzichkin N. V., Lisitsyn N. V. Modeling and optimization of gasoline distillation in chemical engineering zylene catalytic reforming. *Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*. 2014; 27(53):47–55. (In Russ.).
7. Abdurakhimov K. A., Abdurakhimov M. A., Li R. A study to determine the temperature regime of operation of the debutanization column at the Kokdumalak condensate stabilization unit. *Universum: Technical Sciences*. 2024;3-5(120):16–20. (In Russ.). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/17117>
8. Pyataev I. I., Moskalev L. N., Frantskevich V. S., Lankin R. I. Comparison of the efficiency of the internal devices of the stabilization column in processing unstable gasoline. *Proceedings of BSTU. Series 2*. 2025;2(295):102–108. (In Russ.).
9. Mareshova L. A., Bogatykh K. F., Rol'nik L. Z., Yagafarova G. G. Results of industrial implementation of developments on regular crossflow packings by scientists of the Ufa State Petroleum Technological University. *Electronic Scientific Journal Oil and Gas Business*. 2007;(1):74. (In Russ.).
10. Berengarten M. G., Kozin Yu. V. Experimental study of the flow structure in packed tray-type column extractors. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2022;84(2(92)):228–233. (In Russ.). <http://doi.org/10.20914/2310-1202-2022-2-228-233>

11. Madyshev I. N., Kharkov V. V., Mayasova A. O., Dmitriev A. V. Expanding the range of stable and efficient operation of heat and mass exchangers with jet-film contact devices. *Bulletin of the Technological University*. 2020; 23(12):118–121. (In Russ.).
12. Khalil V. B., Al-Saedi M. D., Misyulya D. I. Study of hydraulic resistance and effectiveness of a valve collar of new design. *Herald of Polotsk state university. Series B. Industry. Applied sciences*. 2013;(3):172–175. (In Russ.).
13. Akhmerov D. R., Mukhametzyanova A. G. Improvement of the efficiency of technological units of oil refineries using Aspen HYSYS. *Bulletin of the Technological University*. 2025;28(1):127–131. (In Russ.). http://doi.org/10.55421/1998-7072_2025_28_1_127
14. Kalimgulova A. M., Samoilov N. A., Prosochkina T. R., Ishalina O. V., Nikitina A. P., Kalimgulova I. M. [et al.]. Analysis of the hydraulic operation mode of contact devices for increasing the efficiency of separation process in the rectification column of stabilization of diesel fuel. *Bashkir Chemical Journal*. 2019;26(2):127–132. (In Russ.). <http://doi.org/10.17122/bcj-2019-2-127-132>
15. Taranova L. V. *Machinery and Apparatus for Chemical Productions*. Tyumen: Tyumen State Oil and Gas University, 2011. (In Russ.).
16. REEFING. URL: <http://www.reefing.ru/index.php?id=32> (In Russ.).
17. Taranova L. V., Sergeev V. S. Optimization of the Selection of Contact Devices for Mass Transfer Apparatuses to Improve Product Quality. In: *Russian Science in the Focus of Change: Collection of Articles Based on the Results of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation, Volgograd, September 4, 2025*. Sterlitamak: International Research Agency LLC; 2025. P. 55–59. (In Russ.).
18. INNER. URL: <https://inner.su/articles/raschet-vysoty-nasadochnykh-kolonn-cherez-vett-i-gidravlicheskie-soprotivleniya/> (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors

Таранова Любовь Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры переработки нефти и газа, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, taranovalv@tyuiu.ru	Lyubov V. Taranova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Oil and Gas Processing, Industrial University of Tyumen, taranovalv@tyuiu.ru
Сергеев Вадим Сергеевич, магистрант, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, vadim.sergeev.02@list.ru	Vadim S. Sergeev, Student, Industrial University of Tyumen, vadim.sergeev.02@list.ru

Поступила в редакцию / Received 04.03.2026

Поступила после рецензирования / Revised 07.04.2026

Принята к публикации / Accepted 14.04.2026