

Научная статья / Original research article

УДК 66.074.3

DOI: <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2026-2-89-103>

EDN: HVCWRS

Выбор контактных устройств для абсорбционного концентрирования ВСГ установок каталитического риформинга

Л. В. Таранова*, **В. С. Сергеев**

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация

*taranova.lv@tyuiu.ru

Аннотация. В статье изучена актуальная проблема повышения эффективности работы полурегенеративных установок каталитического риформинга за счет увеличения межрегенерационного пробега катализаторов с рассмотрением возможности абсорбционной очистки водородсодержащего газа от углеводородов для минимизации отложений кокса на поверхности катализатора. Целью работы явилось обоснование возможности реализации абсорбционного концентрирования на установке с достижением целевых показателей по степени концентрирования циркулирующего водородсодержащего газа на уровне 98 %. В задачи входил анализ насадочных контактных устройств с выработкой рекомендаций по их выбору для осуществления целевого процесса. Для решения задач использовали комплекс расчетно-аналитических методов, включающих анализ характеристик насадок разных типов, технологические и гидравлические расчеты с определением размерных характеристик насадочных слоев. Проведен сравнительный анализ ряда моделей регулярных и нерегулярных насадок, отличающихся размерными характеристиками, материалами и численными значениями ключевых характеристик — удельной поверхности и свободного объема. На основе выполнения параметрического анализа установлена взаимосвязь между показателями эффективности контактных устройств и размерными характеристиками абсорбционных колонн, что можно использовать при решении прогнозных задач при выборе типа насадок. На этой основе предложен методический подход сравнительного анализа и выбора насадок с учетом конкретных условий массообмена; предложен критерий их применимости. Для решения целевых задач с обеспечением заданной степени концентрирования водородсодержащего газа применительно к рассматриваемой установке предложены две наиболее эффективные разновидности насадок с учетом габаритных ограничений, с позиций минимизации объема насадочного слоя, и с учетом введенного коэффициента применимости насадок, что позволит в итоге минимизировать коксоотложение и увеличить межрегенерационный пробег катализатора.

Ключевые слова: каталитический риформинг, водородсодержащий газ, абсорбционная очистка, контактные устройства

Для цитирования: Таранова Л. В., Сергеев В. С. Выбор контактных устройств для абсорбционного концентрирования ВСГ установок каталитического риформинга. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ.* 2026;30(2):89–103. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2026-2-89-103> EDN: HVCWRS

Selection of mass transfer devices for absorption concentration of hydrogen-containing gas (HCG) in catalytic reforming units

Lyubov V. Taranova*, **Vadim S. Sergeev**

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

taranova.lv@tyuiu.ru

Abstract. This article examines the pressing issue of improving the efficiency of semi-regenerative catalytic reforming units by increasing the cycle length between catalyst regenerations. This work also considers the possibility of using absorption purification of hydrogen-containing gas to remove hydrocarbons to minimize coke deposition on the catalyst surface. This article aims to prove the feasibility of absorption concentration within the unit and to achieve a target hydrogen gas concentration of up to 98 % in the circulating stream. The tasks involve analysis of packed contact devices and development of recommendations for their selection for this process. To solve these tasks, the authors employ a combination of calculation and analytical methods. These methods include evaluating different packing types, technological and hydraulic calculations to determine the geometric parameters of packed beds. The work compares several structured and random packing types that differ in size, material, and numerical values of key characteristics – specific surface area, and void fraction. Based on a parametric analysis performed, the authors identify a correlation between the performance of contact devices and the geometric characteristics of absorption columns. This correlation can support predictive selection of suitable packings. On this basis, the article proposes a methodological approach for comparative analysis and selection of packings based on specific mass transfer conditions, and a criterion for evaluating their applicability. In order to achieve these objectives, the authors select two most efficient types of packing that meet the process requirements. The selection considers geometric constraints, the minimization of packing volume, and the proposed applicability coefficient. This approach aids in reducing coke formation and increasing the catalyst cycle length between regenerations.

Keywords: catalytic reforming, hydrogen-containing gas, absorption cleaning, mass transfer internals

For citation: Taranova L. V., Sergeev V. S. Selection of mass transfer devices for absorption concentration of hydrogen-containing gas (HCG) in catalytic reforming units. *Oil and Gas Studies*. 2026;30(2):89–103. (In Russ.). <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2026-2-89-103>

Введение

В группу наиболее распространенных процессов переработки углеводородного (УВ) сырья (нефтей, газового конденсата) входят процессы каталитического риформинга (КР), направленные на выработку качественных продуктов переработки — высокооктановых бензинов при использовании в качестве сырья бензиновых фракций первичной переработки с пределами выкипания 85–180°C [1–3].

Процесс КР осуществляется на пористых полифункциональных катализаторах общего состава [Pt/Al₂O₃] при давлениях 1÷3 МПа и при температурах 480÷530°C (для полурегенеративных установок) [1–3]. Активность и стабильность каталитических систем постепенно снижается в ходе межрегенационного цикла, что обусловлено постепенным зауглероживанием активных центров. Кокс, образуемый на поверхности катализатора, физически блокирует доступ конвертируемых молекул УВ к металлическим и кислотным центрам, что негативно сказывается на общей эффективности гидрокаталитического процесса.

Согласно статистическим данным [4] на отечественных промышленных площадках широко распространены классические полурегенеративные установки КР, со стационарным слоем и периодической регенерацией катализаторов с остановкой технологической установки на этот период, что

определяет актуальность решения задач максимизации межрегенерационного пробега (MP-периода). В результате — увеличение продолжительности бесперебойной работы установки и соответственно объема выпускаемой продукции; снижение уровня затрат на проведение регенерационных мероприятий; увеличение срока службы катализатора.

В целях продления MP-периода установки и для минимизации коксоотложений можно предложить [1–3] оптимизацию параметров проведения процесса, в частности, повышение парциального давления водорода в реакционной системе или увеличение доли водорода в циркулирующем водородсодержащем газе (ЦВСГ). При рассмотрении фактора парциального давления компонента газовой смеси следует учитывать его взаимосвязь с общим давлением в системе [5] и тот факт, что высокое давление в процессе КР хотя и предотвращает коксообразование, но сдерживается рядом технологических ограничений.

Увеличение доли водорода в составе ЦВСГ риформинга является приемлемой альтернативой повышению парциального давления водорода в системе. Так, в [6] на основании ориентировочных прогнозных расчетов коксуемости катализаторов по методике [1] показано снижение доли коксовых отложений с 42,7 до 34,2 % при увеличении доля H_2 в ЦВСГ с 82 до 98 % об.

На практике для концентрирования водорода применяют адсорбционное и абсорбционное разделение, а также мембранные и криогенные технологии, в ходе которых УВ метанового ряда выделяются из ЦВСГ [6, 7].

В работе для решения проблемы рассмотрен процесс абсорбционного концентрирования. Его ключевая особенность в данном случае состоит в возможности использования материальных потоков установки (стабильный риформат) в качестве жидкого поглотителя алканов [7], который как насыщенный абсорбент-рифформат далее направляется на стабилизацию. При этом не требуется отдельный блок регенерации абсорбента.

Как известно, эффективность работы колонных аппаратов (в том числе и для процессов абсорбции) и эксплуатационные показатели, такие как КПД, гидравлическое сопротивление, гидродинамическая устойчивость, во многом определяются характеристиками принимаемых контактных устройств (КУ). Для практической реализации абсорбционной очистки ЦВСГ от алканов в работе рассматривались насадочные КУ, ключевыми параметрами которых являются удельная поверхность f_a (m^2/m^3), свободный объем $V_{св}$ (m^3/m^3), эквивалентный диаметр d_e (м), фактор формы, материал изготовления, геометрические размеры и прочие конструктивные особенности [8–10], определяющие их выбор для изучаемых процессов.

Удельная поверхность определяет эффективность массообмена и более развитая поверхность, в целом, способствует интенсификации процесса. Значения этой характеристики связаны с фактором формы, то есть ее сложностью. Любые изменения (усложнения) поверхности, содействующие турбулизации потоков, должны обеспечивать повышение эффективности контакта фаз [11] и в итоге способствовать минимизации габаритных размеров аппаратов.

Показатель свободного объема определяет гидравлические сопротивления в слое насадки, для минимизации которых стремятся к повышению значений $V_{св}$, что, в свою очередь, связано с размерными характеристиками насадочных элементов.

Ассортимент насадок для реализации массообменных процессов достаточно широк [12–14] с учетом их типа (регулярные или нерегулярные), материала для их изготовления (метал, керамика, пластик), формы и размеров насадочных тел и других факторов. Анализ ассортимента насадок показывает, что удельная поверхность современных промышленных упорядоченных насадок изменяется в широких пределах — $f_a = 125 \div 1700 \text{ м}^2/\text{м}^3$, а для нерегулярных, несмотря на чрезвычайное конструктивное многообразие, редко превышает $300 \text{ м}^2/\text{м}^3$ (для более распространенных типоразмеров — 38 и 50 мм). Показатели свободного объема современных насадок находятся, как правило, на уровне 90 % и выше (за исключением керамических моделей).

Цель настоящей работы заключается в обосновании возможности реализации абсорбционного способа концентрирования циркуляционного ВСГ на полурегенеративных установках каталитического риформинга с достижением целевых показателей по степени концентрирования циркулирующего водородсодержащего газа на уровне 98%-й концентрации водорода в его составе. В задачи входит сравнительный анализ насадочных контактных устройств с выработкой рекомендаций по их выбору и комплексный расчет процесса абсорбции, включая технологические и гидравлические расчеты с определением размерных характеристик насадочных слоев, с ориентировкой на максимально достижимый результат по степени очистки ЦВСГ от алканов.

Объекты и методы исследования

Объектом была выбрана типовая установка КР для производства высокооктанового компонента автобензинов, блочная схема которой приведена на рисунке 1 наряду с основными параметрами по блокам установки.

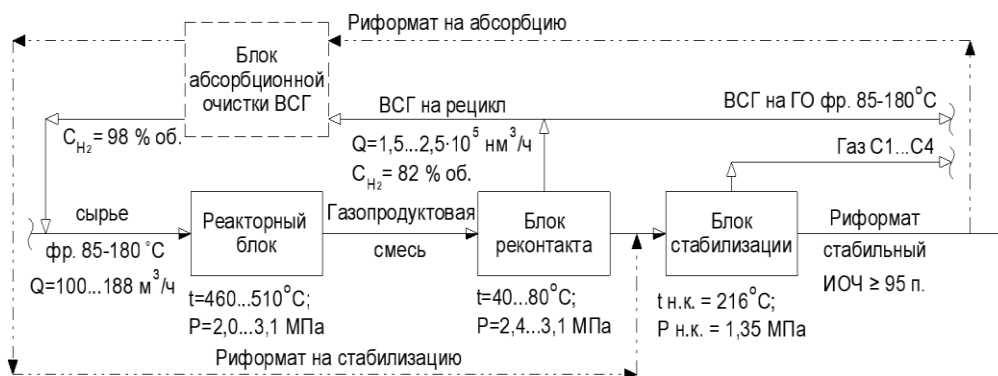


Рис. 1. Блочная схема установки каталитического риформинга:

$t_{н.к.}$; $P_{н.к.}$ — параметры нижней части колонны стабилизации

Fig. 1. Block flow diagram of the catalytic reforming unit:

$t_{н.к.к.}$; $P_{н.к.}$ — parameters of the lower section of the stabilizer column

Схема установки представлена тремя основными блоками. Сырьевой поток (стабильный гидрогенизат) после смешения с ЦВСГ поступает в реакторный блок, где протекают ключевые реакции преобразования сырья. Блок представлен каскадом пяти реакторов с одинаковым объемом загрузки эрионитного алюмоплатинового катализатора марки ГПС. С учетом эндотермичности процесса, предусмотрен межступенчатый нагрев газосырьевой смеси в трубчатой печи. Продуктовая смесь из реакторного блока поступает далее на разделение в блок реконтакта.

В продуктовых сепараторах блока реконтакта ВСГ отделяется от жидкого продукта, далее направляемого на стабилизацию с целью извлечения легких газов и обеспечения требований по уровню давления насыщенных паров продуктового риформата. ВСГ из блока реконтакта затем используется на установке гидроочистки (ГО) и возвращается на риформинг в виде ЦВСГ. Кратность циркуляции ВСГ в реакторном блоке не превышает $1\,500\text{ нм}^3/\text{м}^3$.

На схеме показано возможное включение блока абсорбционной очистки ВСГ после сепарационного блока с использованием в качестве абсорбента части продуктового стабильного риформата.

Для оценки возможностей концентрирования ЦВСГ методом абсорбции на основе предварительного анализа ассортимента насадочных КУ отобран ряд разновидностей регулярных и нерегулярных насадок, характеристики которых, по данным [12], представлены в таблице 1. Для расчетов отобраны насадки с широкими диапазонами по удельной поверхности $f_a = 125\div596\text{ м}^2/\text{м}^3$ и преимущественно высоким уровнем пустотности — $V_{св} = 0,76\div0,97\text{ м}^3/\text{м}^3$.

Таблица 1. Основные характеристики отобранных к расчетам насадок [12]
Table 1. Key characteristics of the packings selected for calculations [12]

| № | Модель насадки | Материал насадки | Типоразмер, мм | f_a , м ² /м ³ | $V_{об}$, м ³ /м ³ |
|--------------------------------------|---|------------------|----------------|--|---|
| Регулярные пакетные | | | | | |
| 1 | <i>Plate packing (PP), 125Y</i> | Пластик | – | 125 | 0,98 |
| 8 | <i>Mellapack (MP), 250Y</i> | Пластик | – | 250 | 0,97 |
| 13 | <i>Metal Corrugated Plate Packing (MCP), 350Y</i> | Металл | – | 350 | 0,95 |
| 15 | <i>Metal Mesh Packing BX (MMP), BX</i> | Металл | – | 500 | 0,95 |
| 17 | <i>Plastic Corrugated Plate Packing (CP)</i> | Пластик | – | 400 | 0,76 |
| Нерегулярные насадки кольцевой формы | | | | | |
| 2 | <i>NorPack (NP), 38 mm</i> | Пластик | 38 | 165 | 0,90 |
| 3 | <i>Conjugate ring (CR), 25mm</i> | Металл | 25 | 185 | 0,95 |
| 9 | <i>Conjugate ring (CR), 16 mm</i> | Металл | 16 | 313 | 0,97 |
| 10 | <i>Ralu ring (RR), 15 mm</i> | Металл | 15 | 320 | 0,94 |
| 16 | <i>Nutter ring (NR), 76 mm</i> | Металл | 76 | 596 | 0,99 |
| Нерегулярные насадки седловой формы | | | | | |
| 4 | <i>Intalox Saddles (IS), 50mm</i> | Пластик | 50×25×1,5 | 250 | 0,96 |
| 7 | <i>Intalox Saddles (IS), 38mm</i> | Пластик | 38×19×1,2 | 265 | 0,95 |
| 11 | <i>Intalox Saddles (IS), 25mm</i> | Пластик | 25×12×1,2 | 288 | 0,85 |
| Нерегулярные насадки шаровой формы | | | | | |
| 6 | <i>Polyhedra Hollow Ball (PHB), 50 mm</i> | Пластик | 50 | 237 | 0,91 |
| 12 | <i>Polyhedra Hollow Ball (PHB), 38 mm</i> | Пластик | 38 | 325 | 0,91 |
| 14 | <i>Polyhedra Hollow Ball (PHB), 25 mm</i> | Пластик | 25 | 460 | 0,90 |
| Нерегулярные насадки иных форм | | | | | |
| 5 | <i>LanPack (LP), 60 mm</i> | Пластик | 60 | 222 | 0,89 |

Методом исследования выступил комплекс расчетно-аналитических методов с использованием расчетных методик [10, 15, 16]. Суть расчетов сводилась к определению общегабаритных размеров насадочных слоев для реализации необходимой степени извлечения алканов C₁÷C₆ из ЦВСГ риформинга с использованием характеристик отобранных насадок.

Ограничительными показателями по рекомендациям [10, 17] выбраны: диаметр абсорбера (D_к) — не более 4 м (для минимизации пристеночного эффекта; высота насадочного слоя (H) — не более 40 м; соотношение H/D_к = 1,5÷10. Эти эмпирические ограничения обеспечивают оптимальные гидродинамические условия, а также устойчивость насадочной колонны против ветровых нагрузок.

Результаты и обсуждение

В ходе работы выполнены прогнозные расчеты процесса абсорбции [15, 16] для обеспечения целевых показателей по составу ЦВСГ со сниже-

нием содержания УВ C_1-C_6 от 17,6 до 2,0 % об. Термобарические параметры абсорбции приняты с учетом рабочих параметров установки после продуктовых сепараторов (см. рис. 1).

Результаты технологических расчетов по определению габаритов насадочных слоев и их объемов приведены на комбинированном графике на рисунке 2. Нумерация насадочных слоев (1–17) на графике соответствует нумерации (№ п/п) моделей насадок из таблицы 1.

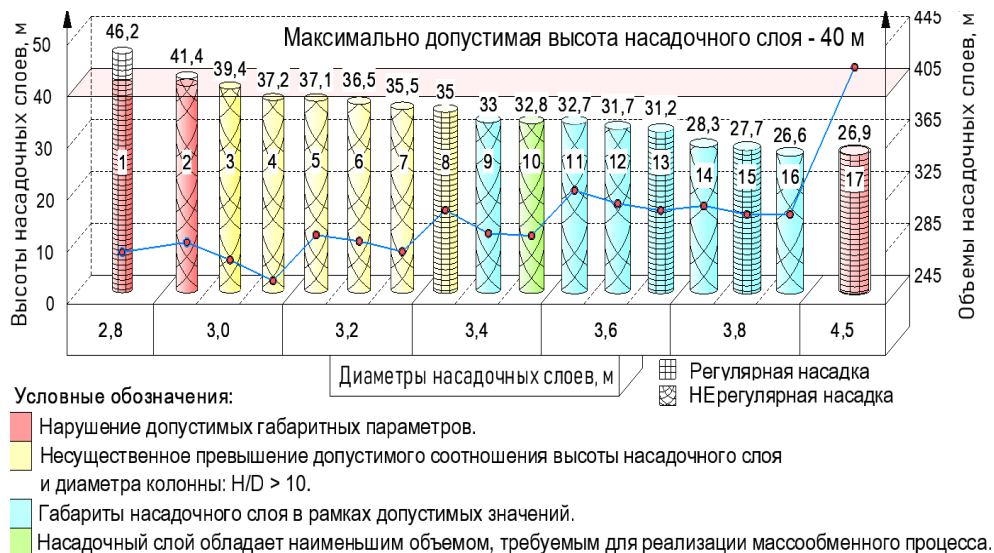


Рис. 2. Результаты технологических расчетов габаритов и объемов насадочных слоев

Fig. 2. Results of process calculations of packing bed dimensions and volumes

Расчетные задачи сводились к определению типа/разновидности насадок, обеспечивающих реализацию целевых показателей по составу ЦВСГ при наименьших значениях объема насадочного слоя ($V_{н.с}$) как отправной точки для оптимизации последующего выбора насадки с учетом вышеуказанных габаритных ограничений.

На основе первичного анализа данных отмечено следующее:

1. По общей высоте слоя насадки и диаметра в действующих условиях массообмена неприемлемыми оказались образцы насадок, пронумерованные как *PP125Y* (№ 1); *NP 38 mm* (№ 2); *CP* (№ 17). В первых двух случаях требуемая высота превышает граничные значения (более 40 м), для третьей насадки получили превышение диаметра (более 4 м).

2. С учетом рекомендаций по соотношению H/D_k не удовлетворяют требованиям (отношение более 10) модели насадочных слоев *CR 25mm* (№3); *IS 50mm* (№4); *LP 60 mm* (№5); *PHNB 50 mm* (№6); *IS 38mm* (№7); *MP 250Y* (№8). Однако следует отметить низкие расчетные объемы насадочных слоев ряда насадок этой группы, особенно для разновидности *IS 50mm* (№4), что указывает на возможные перспективы их использования.

3. Оставшаяся категория (слои № 9÷16) является приемлемой для применения с учетом всех ограничительных параметров: расчетная высота

слоев — на уровне $H = 33,0 \div 26,6$ м; требуемый диаметр $D_k = 3,4 \div 3,8$ м; соотношение $H/D_k = 9,7 \div 7$. Основные результаты расчетов для этой группы насадок сведены в таблице 2.

С точки зрения минимально требуемого объема (количества насадки) в качестве наиболее предпочтительного варианта можно выделить модель нерегулярной кольцевой насадки *Ralu ring (RR)* с типоразмером 15 mm (№ 10) с расчетным объемом насадочного слоя для решения целевых задач $V_{н.с} = 297,65$ м³.

В рамках исследования был проведен анализ ключевых параметров, отобранных к расчетам КУ. На рисунке 3 диаграммами проиллюстрирован разброс значений свободного объема $V_{св}$ (м³/м³) и удельной поверхности f_a (м²/м³) для всех рассматриваемых моделей насадок (№ 1–17).

Анализируя разброс (дисперсии) свободного объема ($V_{св}$ м³/м³) всех насадок (рис. 3а), можем заключить, что для большинства отобранных к расчету насадок значения параметра лежат в диапазоне $V_{св} = 0,9 \div 0,99$ м³/м³. Исключением из общей тенденции являются насадки: *LP 60 mm* (№ 5), $V_{св} = 0,89$ м³/м³; *IS 25 mm* (№ 11), $V_{св} = 0,85$ м³/м³; *CP* (№ 17), $V_{св} = 0,76$ м³/м³.

Диаграмма (рис. 3б) с характеристиками удельной площади поверхности насадок f_a м²/м³ составлена с учетом применимости моделей насадок. Ее анализ позволяет оценить влияние удельной поверхности на применимость модели контактного устройства под моделируемый процесс абсорбционной очистки.

Анализ диаграмм позволяет заключить, что ключевую роль в применимости контактных устройств оказывает удельная поверхность насадки, поскольку порозность большинства насадок находилась на соизмеримо высоком уровне (для большинства — на уровне $V_{св} = 0,9 \div 0,99$ м³/м³), в то время как значение f_a насадок варьирует в весьма широких пределах ($f_a = 125 \div 596$ м²/м³).

При анализе диаграммы по удельной поверхности насадок отмечено следующее:








1. Низкие диапазоны удельной поверхности ($f_a = 125 \div 165$ м²/м³, красная область диаграммы) не способствуют развитию высокой площади контакта фаз, что приводит к существенному увеличению высоты насадочного слоя ($H > 40$ м) и колонны в целом.

При этом толщина слоя стремится к минимуму. В действующих условиях насадки с такими характеристиками не могут конкурировать с более эффективными моделями.

2. Несбалансированные по соотношению H/D_k насадочные слои образованы насадками с умеренно развитой удельной поверхностью ($f_a = 185 \div 250$ м²/м³, желтая область диаграммы).

3. Сбалансированные по габаритам насадочные слои отличаются высокой удельной поверхностью ($f_a = 288 \div 596$ м²/м³, синяя и зеленая область диаграммы).

Таблица 2. Характеристика насадок, отобранных по результатам технологического расчета
Table 2. Characteristics of packings selected based on process calculations

| Модель |  |  |  |  |  |  |  | |
|-------------------------------------|---|---|---|---|--|---|---|-------|
| | CR, 16 mm | RR, 15 mm | NR, 76 mm | IS, 25 mm | РННВ 25 и 38 mm | MMP BX | MCPР 350Y | |
| Тип | Нерегулярные | | | | | | Регулярные | |
| | Кольцевые | | | Седла | Шаровые | | Пакетные | |
| № по табл. 1 | 9 | 10 | 16 | 11 | 14 | 12 | 15 | 13 |
| Типоразмер, мм | 16 | 15 | 76 | 25 | 25 | 38 | Высота элемента насадки, $l = 450$ мм | |
| $f_a, \text{м}^2/\text{м}^3$ | 313 | 320 | 596 | 288 | 460 | 325 | 500 | 350 |
| $V_{\text{св}}, \%$ | 97 | 94 | 98,6 | 85 | 90 | 91 | 95 | 95 |
| $d_{\text{э}}, \text{мм}$ | 12,4 | 11,8 | 6,6 | 11,8 | 7,8 | 11,2 | 7,6 | 10,9 |
| Расчетные габариты насадочных слоев | | | | | | | | |
| $H, \text{м}$ | 33 | 32,8 | 26,6 | 32,7 | 28,3 | 31,7 | 27,7 | 31,2 |
| $D, \text{м}$ | 3,4 | 3,4 | 3,8 | 3,6 | 3,8 | 3,6 | 3,8 | 3,6 |
| $V, \text{м}^3$ | 299,5 | 297,7 | 301,5 | 332,7 | 320,8 | 322,5 | 314,1 | 317,2 |
| Совокупный показатель применимости | | | | | | | | |
| $k = f_a \cdot V_{\text{св}} / V$ | 1,01 | 1,01 | 1,95 | 0,73 | 1,00 | 0,92 | 1,51 | 1,04 |

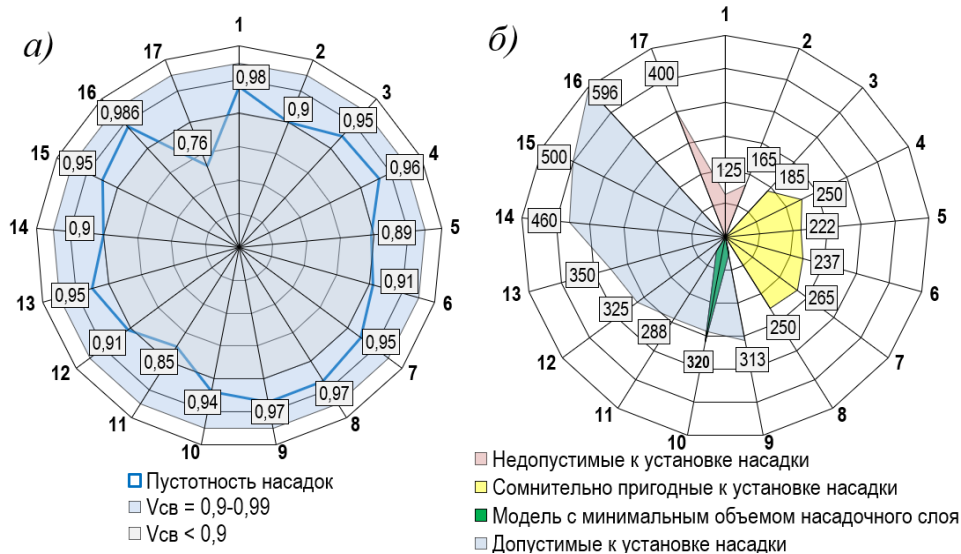


Рис. 3. Анализ основных характеристик отобранных к расчету насадок:
 а — разброс (дисперсия) пустотности исследуемых насадок; б — удельная поверхность исследуемых насадок

Fig. 3. Analysis of key characteristics of the packings selected for calculations:
 а — variation (dispersion) of packing void fraction; б — specific surface area of the packings

Анализируя рисунки 2, 3, укажем на обратную зависимость между f_a и высотой слоя Н. Так, например, для слоев №14–16 с диаметром 3,8 м с ростом f_a с 460 до 596 м²/м³ высота насадочного слоя снижается с 28,3 до 26,6 м. Полученные выводы справедливы при сопоставимом уровне свободного объема, что и было выдержано для исследованных КУ (для большинства моделей $V_{св} = 0,9 \div 0,99$ м³/м³). Исключением является модель СР (№ 17), которая, несмотря на достаточно развитую удельную поверхность ($f_a = 400$ м²/м³), оказалась непригодной из-за низкой пустотности ($V_{св} = 0,76$ м³/м³), нетипичной для пакетных регулярных насадок.

Таким образом, проведенный анализ демонстрирует возможность прогнозирования применимости насадочных устройств для конкретных условий массообмена на основе их структурных характеристик.

При определении размерных характеристик абсорбционных колонн ориентируются на фиктивную скорость газа в сечении колонны (ω), связанную с предельной скоростью ($\omega_{пр}$) в режиме захлебывания насадки. Эти показатели определяются с учетом типа и разновидности насадок [10] с использованием эмпирических формул. В этой связи в работе выполнен параметрический анализ для установления зависимостей между структурными характеристиками насадок и значениями фиктивных скоростей с выработкой унифицированного подхода для определения этого параметра.

Анализ был проведен для серии гипотетических регулярных насадок при варьировании значений удельной поверхности и доли свободного объема в пределах $f_a = 100 \div 600$ м²/м³ и $V_{св} = 85 \div 97$ %, что согласуется с интервалами показателей анализируемых насадок. Результаты расчетов в виде графических зависимостей значений удельной поверхности в выбранном диапазоне изменения свободного объема и зависимостей диаметра насадочного слоя от фиктивной скорости газа представлены на рисунке 4.

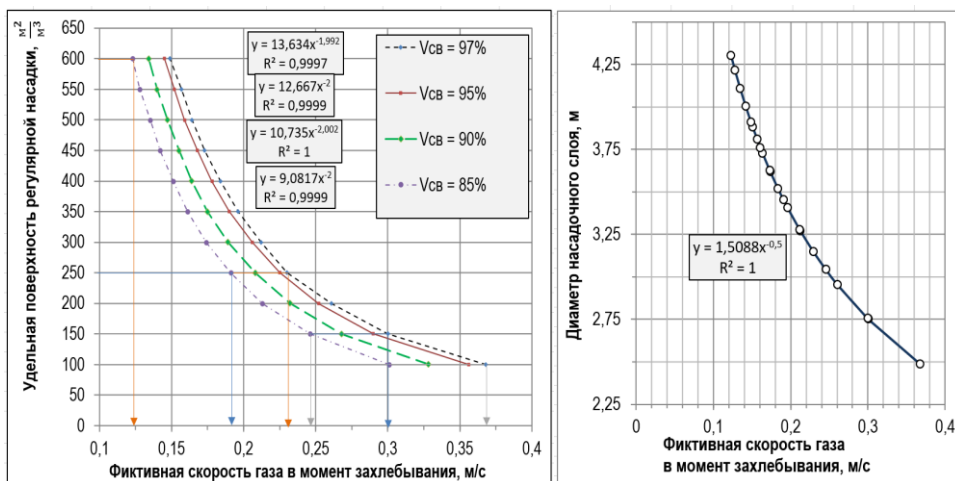


Рис. 4. Влияние ключевых характеристик насадок на гидродинамические показатели процесса

Fig. 4. Influence of key packing characteristics on hydrodynamic process parameters

По итогам анализа графических зависимостей были установлены следующие закономерности:

1. С ростом пустотности насадки ($V_{св}$) при одних и тех же значениях f_a отмечен рост фиктивной скорости газа (ω); при этом, чем меньше f_a , тем больше наблюдаемый рост значений ω .

2. Удельная поверхность обратно квадрату фиктивной скорости. Взаимосвязь выражается общим уравнением вида: $f_a = A / \omega^2$, где численное значение показателя A при снижении доли свободного объема в интервале 97–85 % последовательно уменьшается, составляя для соответствующих значений $V_{св}$ значений порядка $A = 13,6; 12,7; 10,7; 9,1$.

3. Взаимосвязь диаметра слоя насадки и фиктивной скорости в действующих условиях массообмена выражается уравнением вида $D_k = 1,5 \omega^{-0,5}$, то есть при известных характеристиках насадки можно достаточно просто определить значения ω и далее — требуемый диаметр.

4. Анализ зависимостей позволяет взаимно увязать значения удельной поверхности, скорости и диаметра насадочного слоя с учетом введенной градации по интервалам значений f_a (таблица 3): с увеличением степени развитости удельной поверхности насадок снижается фиктивная скорость газа с необходимостью увеличения при этом диаметра насадочного слоя.

Таблица 3. Взаимосвязь размерных характеристик и скоростного режима
Table 3. Correlation between dimensional characteristics and flow velocity regime

| Степень развитости удельной поверхности f_a | $f_a, \text{ м}^2/\text{м}^3$ | $\omega, \text{ м/с}$ | $D_k, \text{ м}$ |
|---|-------------------------------|-----------------------|------------------|
| Низкая (малая) | 100 ÷ 150 | 0,37 ÷ 0,25 | 2,5 ÷ 3,0 |
| Средняя (умеренно развитая) | 150 ÷ 250 | 0,30 ÷ 0,19 | 2,75 ÷ 3,45 |
| Высокая (развитая) | 250 ÷ 600 | 0,23 ÷ 0,12 | 3,15 ÷ 4,30 |

Следовательно, рост удельной поверхности насадки, обеспечивая интенсификацию массообмена и сокращение высоты слоя, приводит к увеличению диаметра насадочной колонны, что формирует ключевой технологический компромисс. Это приводит к необходимости оптимизации размерных характеристик насадочных слоев при проектировании насадочных колонн.

Чтобы произвести первичную оценку применимости насадок при выборе типа насадок для решения целевых задач, предложен критерий применимости (k), учитывающий выделенные для анализа показатели — значения f_a ($\text{м}^2/\text{м}^3$), доля свободного объема — $V_{св}$; расчетный объем насадочного слоя — V (м^3), с учетом которого для отобранной группы сбалансированных по размерным характеристикам насадок (см. таблицу 2) можно составить сравнительный ряд применимости:

Nutter Ring (76 мм) > MMP > MCPP ≈ Ralu Ring (15 мм) ≈ Conjugate ring (16 мм) ≈ PННВ (25мм) > PННВ (38 мм) > Intalox PP (25 мм)

Таким образом, можно отметить, что полученные диаграммы позволяют спрогнозировать применимость насадочных контактных устройств в действующих условиях массообмена, с учетом их основных характеристик.

В условиях массообмена применительно к решаемым в данной работе задачам минимизации содержания углеводородов в составе циркуляционного ВСГ можно рекомендовать из изученных нерегулярных насадок разновидность нерегулярной металлической насадки *Nutter Ring (NR* типоразмер 16 мм), а из регулярных — разновидность *Metal Mesh Packing BX (MMP*, высота пакета 450 мм, значения $d_3 = 0,096$ мм), характеристики которых представлены в таблицах 1, 2. Значения введенного критерия применимости составляют для них порядка $k = 1,95$ и $k = 1,51$ соответственно, что примерно в 1,5–2 раза выше остальных насадок этой отобранной группы.

Выводы

1. В работе рассмотрены возможности использования абсорбционной очистки водородсодержащего газа от углеводородов для минимизации коксоотложений на поверхности катализаторов для увеличения межрегенерационного периода в процессах каталитического риформинга бензиновой фракции.

2. Выполнено расчетное обоснование для процесса абсорбционного концентрирования ВСГ до достижения целевых показателей по степени концентрирования (98 % об.) с проведением сравнительного анализа для ряда контактных насадочных устройств и определением общегабаритных размеров насадочных слоев; предложены методические подходы сравнительного анализа и выбора насадок с прогнозированием их применимости для конкретных условий массообмена на основе их структурных характеристик.

3. Установлена взаимосвязь между основными характеристиками насадок (удельная поверхность, свободный объем), гидравлическими параметрами и размерными характеристиками слоя насадки с определением наиболее эффективных в условиях изучаемого процесса типов контактных устройств с учетом предложенной их градации по степени развитости удельной поверхности; определены разновидности насадок для решения целевых задач со сбалансированными размерными характеристиками.

4. Отмечено существование обратной взаимосвязи между удельной поверхностью насадок и диаметром насадочного слоя с необходимостью технологического компромисса и сбалансированности размерных характеристик.

5. С учетом предложенного критерия применимости насадок отобраны наиболее эффективные для достижения целевых результатов разновидности нерегулярных (*Nutter ring*, с типоразмеров 76 мм) и регулярных (*Metal Mesh Packing BX*) насадок, совокупный показатель применимости для которых в 1,5–2 раза выше этого показателя для других насадок.

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 the idea and aim of the study; theoretical analysis and data synthesis; conceptualization; writing; scientific editing.

Vadim S. Sergeev: collection and analysis of study materials; formulation of the 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 conflicts of interest.

Список источников

1. Маслянский Г. Н., Шапиро Р. Н. *Каталитический реформинг 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. Смоликов М. Д., Кирьянов Д. И., Шкуренко В. А., Бикметова Л. И., Белопухов Е. А., Яблокова С. С. [и др.]. Интегрированные процессы реформинга и изомеризации бензиновых фракций для производства экологически чистых автобензинов. *Катализ в промышленности*. 2022;22(1):40–56. <https://doi.org/10.18412/1816-0387-2022-1-40-56>
5. Васюкова А. Н., Задачаина О. П., Насонова Н. В., Перепелкина Л. И. *Типовые расчеты по физической и коллоидной химии*. Благовещенск: ДальГАУ; 2012. 141 с.
6. Афонина И. И., Сариллов М. Ю. Модернизация установки каталитического реформинга с целью повышения качества водородосодержащего газа. *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. 2017;1(4(32)):59–65.
7. Сергеев В. С., Таранова Л. В. Повышение межремонтного пробега установки каталитического реформинга со стационарным слоем катализатора. *Новые технологии — нефтегазовому региону: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2-х томах, Тюмень, 20–23 мая 2025 года*. Тюмень: Тюменский индустриальный университет; 2025. С. 268–271.
8. Филиппов В. В. *Гидродинамика насадочной колонны*. Самара: СамГТУ; 2022. 23 с.

9. Дмитриев Е. А., Комляшев Р. Б., Моргунова Е. П., Трушин А. М., Вешняков А. В., Сальникова Л. С. *Аппаратура процессов разделения гомогенных и гетерогенных систем*. Москва: РХТУ им. Д. И. Менделеева; 2016. 104 с.
10. Ветошкин А. Г. *Защита атмосферы от газовых выбросов*. Пенза: ПГУ; 2004. 271 с.
11. Титова Л. М., Лоцманова О. В., Телечкина Э. Р. Нерегулярные насадки колонных аппаратов: научно-аналитический обзор. *Южно-Сибирский научный вестник*. 2020;2(30):80–88.
12. SP-terploobmen: каталог завода-изготовителя. URL: <https://sp-terploobmen.ru/> (дата обращения: 20.12.2024).
13. Новикова И. В., Пушнов А. С. О взаимовлиянии основных геометрических характеристик регулярных насадок. *Химическая техника*. 2015;(4):21.
14. ИНЖЕХИМ: Инженерно-внедренческий центр: каталог завода-изготовителя. URL: <https://ingehim.ru/about/productsat/> (дата обращения: 20.12.2024).
15. Рамм В. М. *Абсорбция газов*. Москва: Химия; 1976. 654, с.
16. Плановский А. Н., Рамм В. М., Каган С. З. *Процессы и аппараты химической технологии*. Москва: Химия; 1967. 847 с.
17. Поникаров И. И., Перельгин О. А., Доронин В. Н., Гайнуллин М. В. *Машины и аппараты химических производств*. Москва: Машиностроение; 1989. 368 с.

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. Smolikov M. D., Kiryanov D. I., Shkurenok V. A., Bikmetova L. I., Belopukhov E. A., Yablokova S. S., [et al.]. The integrated reforming and isomerization of gasoline fractions for the production of eco-friendly motor gasolines. *Kataliz v promyshlennosti*. 2022;22(1):40-56. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0387-2022-1-40-56>
5. Vasyukova A. N., Zadachina O. P., Nasonova N. V., Perepelkina L. I. *Typical Calculations in Physical and Colloid Chemistry*. Blagoveshchensk: DalGAU; 2012. (In Russ.).
6. Afonina I. I., Sarilov M. Iu. Modernization of the Catalytic Reforming Unit to Improve the Quality of Hydrogen-containing Gas. *Scientific Notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University*. 2017;1(4(32)):59–65. (In Russ.).
7. Sergeev V. S., Taranova L.V. Increasing the Run Length of a Fixed-bed Catalytic Reforming unit. *New Technologies for the Oil and Gas Region. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of Students, Graduate Students, and Young Scientists*. Tyumen: TYUIU; 2025. P. 268–271. (In Russ.).
8. Filippov V. V. *Hydrodynamics of a packed column*. Samara: SamGTU; 2022. (In Russ.).

9. Dmitriev E. A., Komlyashev R. B., Morgunova E. P., Trushin A. M., Veshnyakov A. V., Salnikova L. S. *Equipment for Separation Processes of Homogeneous and Heterogeneous Systems*. Moscow: RHTU im. D. I. Mendeleeva; 2016. (In Russ.).
10. Vetoshkin A. G. *Protection of the Atmosphere from Gas Emissions*. Penza, PnzGU; 2004. (In Russ.).
11. Titova L. M., Lotsmanova O. V., Telechkina E. R. Random Column Packing. *South Siberian Scientific Bulletin*. 2020;2(30):80–88. (In Russ.).
12. Manufacturer's Catalog «SP-teploobmen». Available at: <https://sp-teploobmen.ru/>. (Accessed 20 december 2024) (In Russ.).
13. Novikova I. V., Pushnov A. S. About the Interrelation of the Main Geometric Characteristics of Structured Packings. *Chemical Technology*. 2015;(4):21. (In Russ.).
14. «INZHEKHIM» Engineering and Implementation Center. Available at: <https://ingehim.ru/about/productsat/> (Accessed 20 december 2024) (In Russ.).
15. Ramm V. M. *Gas Absorption*. Moscow: Chemistry; 1976. (In Russ.).
16. Planovskij A. N., Ramm V. M., Kagan S. Z. *Processes and Apparatus of Chemical Technology*. Moscow: Chemistry; 1967. (In Russ.).
17. Ponikarov I. I., Perelygin O. A., Doronin V. N., Gajnullin M. V. *Machinery and Apparatus of Chemical Industries*. Moscow: Machine building industry; 1989. (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, taranova1v@tyuiu.ru

Lyubov V. Taranova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Oil and Gas Processing, Industrial University of Tyumen, taranova1v@tyuiu.ru

Сергеев Вадим Сергеевич, магистрант, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, vadim.sergeev.02@list.ru

Vadim S. Sergeev, Student, Industrial University of Tyumen, dim.sergeev.02@list.ru

Поступила в редакцию / Received 29.10.2025

Поступила после рецензирования / Revised 12.11.2025

Принята к публикации / Accepted 12.12.2025