

Обзорная статья / Review article

УДК 665.644:66.094.3

DOI: <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2026-3-46-64>

EDN: ZNWBHC



Обзор технологий деметаллизации тяжелого нефтяного сырья

В. В. Атрошенко*, И. И. Мухаматдинов

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Российская Федерация

**atroshchenkov@mail.ru*

Аннотация. В статье представлен систематический обзор современных технологий деметаллизации тяжелого нефтяного сырья. Высокое содержание ванадия, никеля и кальция в форме стабильных металлопорфириновых комплексов — критическая проблема для нефтепереработки, приводящая к быстрой необратимой дезактивации катализаторов гидроочистки и крекинга вследствие блокировки пор и отравления активных центров. Проведен критический анализ как установленного промышленного метода гидродеметаллизации с указанием присущих ему недостатков (высокая энергоемкость, расход водорода и дезактивация катализаторов), так и широкого спектра инновационных альтернативных подходов. К таким подходам относятся передовые сорбционные и хелатирующие методы с использованием функционализированных материалов на основе диоксида кремния и полимеров (например, терполимера АРЕАА-НЕА-МА), электрохимические, микроволновые, сверхкритические и перспективные биоинженерные способы. Сравнительный анализ подчеркивает их эффективность, где степень удаления достигает 96 % для V, 91 % для Ni и 98 % для Ca. Рассмотрены технологии извлечения ценных металлов из перерабатываемых остатков, таких как отработанные катализаторы и зола. Сделан вывод, что будущее отрасли связано с разработкой интегрированных гибридных систем, сочетающих преимущества различных методов в рамках экономики замкнутого цикла для достижения оптимальных технико-экономических и экологических показателей при облагораживании тяжелых нефтей.

Ключевые слова: тяжелое нефтяное сырье, деметаллизация, ванадий, никель, гидродеметаллизация, сорбенты, катализатор, дезактивация, извлечение металлов

Благодарности: Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета (ПРИОРИТЕТ-2030)

Для цитирования: Атрошенко В. В., Мухаматдинов И. И. Обзор технологий деметаллизации тяжелого нефтяного сырья. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ.* 2026;30(3):46–64. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2026-3-46-64> EDN: ZNWBHC

Review of technologies for demetallization of heavy oil raw materials

Valery V. Atroshchenko*, Irek I. Mukhamatdinov

Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russian Federation

**atroshchenkov@mail.ru*

Abstract. This article provides a systematic review of modern technologies for the demetallization of heavy oil raw materials. High concentrations of vanadium, nickel, and calcium in the form of stable metalloporphyrin complexes poses a critical challenge for the refining industry. This challenge causes rapid and irreversible deactivation of hydrotreating and cracking catalysts by pore blockage and poisoning active sites. The authors of this work conduct a critical analysis the established industrial method of hydrodemetallization and pointed out its inherent drawbacks (high energy intensity, hydrogen consumption, and catalyst decay). The researchers also analyze a wide spectrum of innovative alternative approaches. These approaches include advanced sorption and chelation techniques using functionalized silica and polymeric materials, such as the APEAA–HEA–MA terpolymer, as well as electrochemical, microwave-assisted, supercritical-fluid, and emerging bioengineering methods. A comparative analysis highlights the high efficiency of these methods, with removal rates reaching 96% for V, 91% for Ni I, and 98% for Ca. Furthermore, the article discusses technologies for recovering valuable metals from processing residues, such as spent catalysts and ash. The authors conclude that the future of the industry is linked to developing integrated hybrid systems, which combine the strengths of various methods within a circular economy framework to achieve optimal technical, economic, and environmental performance in heavy oil upgrading.

Keywords: heavy oil raw materials, demetallization, vanadium, nickel, hydrodemetallization, sorbents, catalyst, decontamination, and metal extraction

Acknowledgements: This article was supported by the Kazan (Volga region) Federal University Strategic Academic Leadership Program (Priority-2030).

For citation: Atroshchenko V. V., Mukhamatdinov I. I. Review of technologies for demetallization of heavy oil raw materials. *Oil and Gas Studies*. 2026;30(3):46–64 (In Russ.). <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2026-3-46-64>

Введение

Высокое содержание металлов (ванадия, никеля, кальция) в форме стабильных металлопорфириновых комплексов в тяжелом нефтяном сырье (ТНС) является одной из наиболее острых проблем современной нефтепереработки. Накопление этих металлов на катализаторах гидроочистки и крекинга приводит к их быстрой необратимой дезактивации, блокировке пор, снижению эффективности процессов и росту эксплуатационных затрат. Параллельно металлы представляют собой ценный ресурс, извлечение которого может превратить экологическую проблему в экономическую выгоду.

В литературе широко освещены как традиционные промышленные методы деметаллизации, так и множество альтернативных подходов. Критикуются высокие энергозатраты, расход водорода и низкая стабильность катализаторов гидродеметаллизации (ГДМ). Активно исследуются сорбционные методы с функционализированными материалами (SiO_2 , полимеры), хелатирование, электрохимические, микроволновые, сверхкритические и биотехнологические подходы. Отдельное направление — технологии извлечения металлов из остатков (зола, кокса) гидро- и пирометаллургическими методами.

Необходимость разработки и выбора экономически эффективных и экологически безопасных методов деметаллизации, позволяющих не только защитить катализаторы, но и извлекать ценные металлы, адаптирован-

ные к разнообразному тяжелому сырью, является основной проблемой, поднимаемой в статье.

Цель работы состоит в систематическом анализе современных и перспективных технологий деметаллизации ТНС, оценке их эффективности, преимуществ, недостатков и потенциала для промышленного внедрения.

Объект и методы исследования

Объект исследования — тяжелое нефтяное сырье (тяжелые и сверхтяжелые нефти, вакуумные и атмосферные остатки, битумы), а также моделирующие системы (металлопорфирины в органических растворителях).

Методы исследования — систематический обзор научной литературы и патентов за 2000–2024 гг. с использованием баз данных Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, РИНЦ, Google Patents, Espacenet.

Для проведения систематического обзора технологий деметаллизации тяжелого нефтяного сырья был осуществлен целенаправленный поиск научных публикаций и патентов. Поисковая стратегия была разработана для максимального охвата релевантных исследований и выявления ключевых тенденций в этой области.

Основной поиск охватывает период 2000–2024 гг. Это позволило проанализировать современное состояние технологии и проследить эволюцию методов за последние два десятилетия, когда интерес к глубокой переработке тяжелых остатков значительно возрос. Для фундаментальных или исторически важных методов (например, основанных на процессах гидродеметаллизации) в отдельных случаях привлекались классические работы без строгих временных ограничений.

Поиск проводился с использованием комбинаций ключевых слов на английском и русском языках. Были сформированы следующие группы запросов:

1. Тема исходного сырья (Heavy oil / Тяжелое сырье): «тяжелая нефть», «мазут», «гудрон», «вакуумный остаток», «битум», heavy oil, heavy crude, residual oil, atmospheric residue, vacuum residue, oil sands, bitumen.
2. Тема процесса (Demetallization / Деметаллизация): «деметаллизация», «удаление металлов», «удаление ванадия», «удаление никеля», demetallization, demetallisation, metal removal, vanadium removal, nickel removal.
3. Конкретные технологии: «гидродеметаллизация», «деасфальтизация», «глубокая переработка нефтяных остатков», hydrodemetallization (HDM), solvent deasphalting (SDA), propane deasphalting, catalytic demetallization, adsorptive desulfurization and demetallization, membrane separation, microwave demetallization.

Обзор литературы

Удаление металлопорфиринов из нефти — сложная задача из-за их прочной связи с асфальтенами. Одним из традиционных методов является

экстракция полярными растворителями, такими как ацетонитрил или метанол, часто с добавлением кислот для протонирования азота порфирина. Однако для тяжелых нефтей эффективность этого подхода не превышает 45 %. Более перспективным выглядит хелатирование с использованием каликсаренов или сульфоновых кислот, которые образуют устойчивые комплексы с металлами. Например, применение наноразмерных каликсаренов позволяет удалить до 96 % ванадия за 90 минут, а микроволновое облучение сокращает время процесса до 3 минут за счет деформации порфиринового каркаса [1].

Сверхкритическая экстракция водой, проводимая при 22,1 МПа и 763 °С, демонстрирует эффективность до 80 %, но требует значительных энергозатрат. ГДМ остается наиболее универсальным методом: каталитическое гидрирование с Co-Mo/Al₂O₃-катализаторами удаляет 60–90 % металлов при температурах 683–739 °С. Однако осаждение ванадия и никеля на поверхности катализатора постепенно снижает его активность, а высокое потребление водорода увеличивает стоимость процесса [1].

Хотя было разработано большое количество методов для удаления металлов и серы из сырой нефти, лишь немногие из них были применены в промышленности из-за различных ограничений и недостатков. Например, процессы экстракции растворителем удаляют крупные металлосодержащие фракции, снижая выход конечного продукта, тогда как дистилляция концентрирует металлы в тяжелых фракциях. Ультрафильтрация является дорогостоящим методом из-за быстрого засорения мембраны. ГДМ и гидрообессеривание (гидродесульфуризация (ГДС)) для удаления металлов и серы — единственные промышленные процессы, которые были коммерциализированы в нефтепереработке [2].

Процессы ГДМ и ГДС эффективно удаляют значительную долю металлов и серы, но имеют ряд недостатков, включая высокий расход водорода, который составляет 300–2 000 кубических футов/баррель для легкой нефти и 2 000–10 000 кубических футов/баррель для тяжелой остаточной нефти, повышенные температуры в диапазоне от 300 до 425 °С и высокого давления в диапазоне от 30 до 130 атм. Кроме того, важна быстрая дезактивация катализатора. Эта проблема, стоящая перед процессами ГДМ и ГДС, широко освещается в литературе. Э. Ньюсон подтвердил это в своей прогнозной модели, заявив, что время жизни катализаторов составляет от 41,7 до 291,7 дней, и обосновал эти данные временем жизни катализаторов, используемых на коммерческих заводах Gulf Oil Corporation. Время жизни катализатора составило от 187,5 до 208,3 дней [3].

В статье [4] представлен инновационный подход к решению проблемы дезактивации катализатора с использованием кора-оболочечных материалов на основе диоксида кремния (SiO₂), функционализированных поли(4-винилпиридином) (P4VP@SiO₂), которые демонстрируют высокую эффективность в рамках стандартного процесса электрообессоливания.

Этот метод не требует модификации существующей инфраструктуры, что делает его экономически выгодным и легко внедряемым.

В статье [5] исследовано влияние структуры пор катализаторов на основе $\text{CoMo}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ на эффективность процессов деме­таллизации и десульфуризации.

Катализаторы синтезировались на трех типах носителей из Al_2O_3 , различающихся размером пор: образец 1 (средний диаметр 17 нм, близкий к промышленным аналогам), образец 2 (14 нм) и образец 3 (43 нм). Для создания пористой структуры использовали полистирольные микро­сферы, что позволило контролировать распределение пор. Характеризация проводилась методами низкотемпературной адсорбции азота, рентгенов­ской фотоэлектронной спектроскопии и просвечивающей электронной микроскопии (ВР ПЭМ), что подтвердило схожую морфологию активной фазы CoMoS во всех образцах. Это исключило влияние химического состава на результаты, сосредоточив внимание только на текстурных свойствах.

Испытания проводились в условиях гидроочистки: давление 3,0–5,0 МПа, температура 360–380 °С, объемная скорость подачи сырья (ОСПС) 5–10 ч⁻¹. Наибольшая эффективность деме­таллизации достигнута на образце 1: остаточное содержание никеля и ванадия составило 6 ppm при 360 °С, давлении 5,0 МПа и ОСПС 10 ч⁻¹. В то же время образец 3 с крупными порами (43 нм) показал худшие результаты (13 ppm металлов), что связано с проникновением асфальтенов, блокировавших активные цен­тры. Аналогичная тенденция наблюдалась при десульфуризации: остаточ­ное содержание серы в гидрогенате для образца 1 составило 3 610 ppm, тогда как для образца 3 — 4 150 ppm.

Устойчивость катализаторов к дезактивации также зависела от струк­туры пор. Образец 1 продемонстрировал наименьшую потерю удельной поверхности (1,9 %) и объема пор (30,4 %) после испытаний, в то время как образец 3 потерял 24 % поверхности и 26 % объема пор из-за накопления кокса и серы. Это объясняется тем, что крупные поры облегчают доступ крупным молекулам, но одновременно способствуют их адсорбции и заку­порке активных участков. Средний размер пор (17 нм) оказался оптималь­ным, обеспечивая баланс между доступностью активных центров и защи­той от засорения.

Статья [6] посвящена математическому моделированию влияния структуры пор катализаторов гидроочистки на скорость их дезактивации из-за накопления металлов (Ni, V) в процессе деме­таллизации тяжелых нефтяных остатков. Авторы исследуют три типа структур пор: макропоры, микропоры и случайные поры (комбинация макро- и микропор).

Основу исследования составляют дифференциальные уравнения, описывающие диффузию реагентов в порах и кинетику реакции второго порядка. Моделирование включает расчет эффективной диффузии, толщи­ны металлических отложений и профилей концентрации вдоль пор.

Результаты показывают, что структура пор критически влияет на дезактивацию. Макропоры обеспечивают более длительный срок службы (до 462 дней) благодаря лучшей доступности активных центров для крупных молекул. Микропоры, несмотря на высокую начальную активность, быстро теряют эффективность (около 150 дней) из-за закупорки устьев пор. Случайные поры демонстрируют промежуточные характеристики, но их поведение ближе к микропорам, что объясняется преобладанием мелких пор в общем объеме. Профили электронно-микронного анализа (ЭМЗА) подтверждают, что металлы накапливаются преимущественно у входа в поры, блокируя доступ к внутренним участкам.

Статья [7] посвящена разработке методов регенерации отработанного катализатора риформинг-крекинга, деактивированного тяжелыми металлами (Ni, Fe, V), присутствующими в тяжелой нефти. Актуальность исследования обусловлена растущим объемом использования низкокачественной нефти, что приводит к накоплению отработанных катализаторов (до 370 000 т в год к 1998 г.) и необходимости их утилизации или повторного использования. Авторы исследуют три метода регенерации: карбохлорирование, метод металлоорганических соединений и промывку слабыми кислотами, сравнивая их эффективность и влияние на каталитическую активность.

Катализатор E-cat, полученный с промышленной установки, содержал значительные концентрации Ni (до 4 319 ppm) и V (до 4 905 ppm). Карбохлорирование, включающее предварительную кальцинацию, сульфидирование и хлорирование в присутствии CO, позволило удалить до 70 % Ni, Fe и V. Однако жесткие условия хлорирования (400–600 °C) привели к разрушению цеолитной структуры катализатора, что подтверждалось снижением размера элементарной ячейки и уменьшением микропористости. Это негативно отразилось на каталитической активности: несмотря на удаление металлов, выход бензина и конверсия снизились, а образование водорода и кокса увеличилось.

Метод металлоорганических соединений, основанный на реакции металлов с CO с образованием летучих карбониллов, оказался неэффективным. Даже при высоком давлении CO (9 атм) удаление Ni не превысило 10 %, что связано с устойчивостью металлов в форме NiAl_2O_4 или Ni_2SiO_4 . Профили ЭМЗА показали, что Ni и V мигрировали к поверхности катализатора, но не десорбировались в виде карбониллов, что подтвердило низкую реакционную способность металлов в данных условиях.

Наиболее перспективным методом признана промывка слабыми кислотами (щавелевой, лимонной) после предварительной кальцинации при 800 °C. Кальцинация окисляла V до высших валентных состояний (V^{5+}), повышая его растворимость в воде. Промывка 20 %-ным раствором щавелевой кислоты удалила 26 % V и 10 % Ni, что оказалось меньше, чем при карбохлорировании, но критически улучшило каталитическую активность. Выход бензина увеличился на 5 %, а образование водорода снизилось бла-

годаря стабилизации Ni в форме алюминатов, не проявляющих дегидрогенизационной активности. Профили ЭМЗА продемонстрировали равномерное удаление V по всему объему частиц катализатора, в то время как Ni оставался преимущественно в виде стабильных спинелей.

Авторы подчеркивают, что ключевым фактором успеха метода промывки является сохранение структурной целостности катализатора. Несмотря на умеренное удаление металлов, восстановление кислотных центров цеолита и снижение дегидрогенизационной активности Ni обеспечили повышение конверсии и селективности по целевым продуктам. В отличие от этого, карбохлорирование, хотя и эффективное для деметаллизации, непригодно для промышленного применения из-за деградации катализатора.

Исследование, представленное в статье [8], посвящено изучению некаталитической гидродесульфуризации (НКГДС) и гидродеметаллизации (НКГДМ) тяжелых нефтей и атмосферных остатков в условиях, имитирующих промышленные процессы гидроочистки. Авторы использовали две лабораторные установки с реакторами неподвижного слоя, заполненными инертным материалом (карбидом кремния), работающими в адиабатическом и изотермическом режимах.

Были протестированы четыре типа сырья: тяжелые нефти плотностью 13°API и 21°API, а также их атмосферные остатки (AR-13°API и AR-21°API). Наибольшая эффективность НКГДС (до 25 % удаления серы) наблюдалась для наиболее тяжелого сырья (AR-13°API) при температуре 420 °C и малой объемной скорости подачи (ОСПС = 0,2 ч⁻¹). Это связано с парафинической природой остатка, облегчающей термический крекинг крупных молекул и высвобождение серы. Удаление металлов (Ni, V) оказалось менее значимым (<6%), что объясняется их локализацией в асфальтенах, требующих более длительного времени реакции.

Анализ температурных профилей вдоль реакторов выявил переход от эндотермических реакций (расщепление молекул) в первой зоне к экзотермическим (конденсация продуктов) во второй. Это подтверждает сложный характер термических процессов, где параллельно протекают крекинг и уплотнение структур.

Результаты подчеркивают, что даже в отсутствие катализаторов термические процессы играют важную роль, особенно при работе с тяжелыми нефтями. Однако для глубокой очистки от серы и металлов требуется комбинация термических и каталитических методов, учитывающая специфику сырья и целевые показатели качества продукции.

В нескольких исследованиях изучалось удаление металлов и серы из сырой нефти. К. Гулд и др. [9, 10] изучали окислительную деметаллизацию асфальтенов месторождения Колд-Лейк в толуоле в качестве растворителя. В первой реакции был доступ воздуха к поверхности смеси (асфальтенов и толуол) при температуре 100 °C за 4 ч. Другую реакцию осуществляли путем смешивания асфальтотена и толуола с различными окислителями, та-

кими как гипохлорит натрия NaClO (в присутствии/отсутствии воздуха), пероксиуксусная и трифторопероксиуксусная кислота. Ключевыми результатами процесса являются удаление 78 и 37 % ванадия и никеля соответственно. С помощью NaClO 72 и 59 % ванадия и никеля соответственно были удалены из арабских тяжелых асфальтенов, а удаление с помощью воздуха не было достигнуто (в присутствии/отсутствии NaOH). Было обнаружено, что чем выше концентрация окислителя, тем более эффективно удаляются металлы.

Н. Наметкин и остальные [11] запатентовали методы с использованием различных деме­таллизирующих реагентов, таких как хлорирующие соединения (Cl_2 , SOCl_2), неорганические соли (FeCl_2 , SnCl_2 , ZnCl_2 , TiCl_4 , RuCl_3 , CrCl_3 , COCl_2) и их водные растворы. Температура реакции в этих исследованиях варьировалась от 40 до 300 °С, и металлы успешно превращались в нерастворимые соединения и удалялись с помощью фильтрации, при этом концентрация Ni и V снижалась до 70 мас. %. Основным недостатком этого процесса является добавление в нефть хлора и металлов, что потенциально может снизить ценность и качество дальнейших потоков нефти и ее продуктов.

Дж. Чаоуки и др. [12] разработали процесс деме­таллизации-десульфуризации для избирательного извлечения 36 металлов, включая ванадий и никель, из ядра порфиринового кольца без его удаления или разрушения. В качестве деме­таллизирующего-десульфурирующего агента (ДМ-ДСА) они использовали бис(2-этилгексил) фосфорную кислоту. Основной механизм заключался в том, что ДМ-ДСА действовал как донор протонов и избирательно удалял металлы из ядра порфиринового кольца, тем самым позволяя не влиять на выход нефти. Дополнительное преимущество заключается в снижении уровня тиофеновых соединений за счет другого механизма экстракции при тех же условиях реакции. Этот донор протонов способен образовывать ионную жидкость в условиях реакции, которая извлекает тиофеновые соединения за счет водородных связей и электростатических сил. Максимальная измеренная эффективность удаления составила 90 и 79 % для ванадия и никеля соответственно и 53 % для серы, когда бис (2-этилгексил) фосфорная кислота смешивалась, вступала в реакцию и впоследствии отделялась от сырой нефти Басры.

Бис(2-этилгексил) фосфорная кислота — распространенное соединение, которое в прошлом использовалось для изучения образования ионных жидкостей. И анионы, и катионы реагента могут взаимодействовать, образуя ионную жидкость, или катион может взаимодействовать с анионом из сырой нефти, образуя другую ионную жидкость. Ионная жидкость образуется при перемешивании ДМ-ДСА с сырой нефтью при температуре от 50 до 70 °С во время основной реакции между ДМ-ДСА и нефтью. Некоторые факторы, особенно длина алкильной цепи и центрального атома катиона,

сильно влияют на температуру плавления и физическое состояние ионной жидкости в целом при комнатной температуре [13].

Исследование [14] посвящено разработке метода извлечения стратегически важных металлов — ванадия и никеля — из тяжелых нефтей в процессе их обессоливания. Б. Исса и В. Ю. Бажин, авторы из Санкт-Петербургского горного университета, акцентируют внимание на необходимости поиска альтернативных источников этих металлов в условиях истощения традиционных месторождений, особенно для зависящих от импорта стран, таких как государства Ближнего Востока.

В основе метода лежит комбинация гидрометаллургических и электрометаллургических подходов. На первом этапе из нефти выделяли углеводородно-металлический концентрат с использованием нафтенной кислоты и центробежного разделения. Далее для селективной сорбции ванадия и никеля применяли сирийские сорбенты: смолу (без активации) и природную глину, активированную NaOH, в сочетании с измельченным стеклом (SiO_2).

Химические методы (гидролиз и прокаливание) позволили получить оксид ванадия V_2O_5 с чистотой 99,3 % и оксид никеля NiO (79 % чистоты). Электрохимическое осаждение никеля на медном катоде сопровождалось побочным выделением водорода, что привело к образованию пористой структуры осадка с содержанием никеля до 19,5 %. Выход металлов из нефти составил 15,6 % для ванадия и 11,5 % для никеля.

Авторы подчеркивают ключевую роль нековалентных взаимодействий между катионами ванадия и ароматическими π -электронами смолы, а также влияние активации глины на селективность сорбции. Полученные результаты демонстрируют потенциал тяжелых нефтей как вторичного ресурса для извлечения металлов, что особенно актуально в условиях дефицита рудного сырья. Метод сочетает экологическую безопасность, низкую стоимость и возможность интеграции в существующие процессы переработки углеводородов.

В статье [15] исследуется новый метод с использованием сверхкритической воды (SCW) при температуре 400–500 °C и давлении 25–45 МПа. Методика основана на обработке модельных металлопорфиринов в SCW-среде с толуолом, что приводит к гидрированию и разрушению порфиринового кольца с последующим высвобождением металла. Результаты показывают, что процесс эффективен (удаление до 80 % V и 76 % Ni), зависит в первую очередь от температуры, описывается кинетикой первого порядка и, вероятно, протекает по свободнорадикальному механизму, где SCW выступает как донор водорода, что открывает путь к более экологичному и экономичному процессу удаления металлов из тяжелого сырья.

Исследование ученых микроволновой демееталлизации [16] основано на высоком взаимодействии металлов с электромагнитными волнами. На стадии реакции образуются соли металлов демеетализирующего и десуль-

фуризирующего агента, которые растворимы в воде и, следовательно, могут быть удалены путем промывки водой. Кроме того, соединения серы связываются с образовавшейся ионной жидкостью с помощью ДМ-ДСА и существующими в сырой нефти анионами посредством водородных и электростатических связей. Сформированная сложная структура обладает высокой поляризацией и может быть переведена в водную фазу и извлечена из сырой нефти. Авторы также отмечают, что используемый ими деме­таллизирующий агент имеет высокую смешиваемость с сырой нефтью, и, следовательно, не требует эмульгирования, что является одним из основных преимуществ этого процесса по сравнению с аналогичными химическими методами комплексообразования для удаления металлов и серы из сырой нефти.

В другом исследовании [17] рассматривают деме­таллизации нефти при помощи микроволнового облучения совместно с гидроде­металлизацией. Авторы статьи описывают гидрокаталитический процесс, проводимый с применением обратной микроэмульсии и с использованием микроволнового облучения и катализаторов, $\text{CoMo}/\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{NiMo}/\text{Al}_2\text{O}_3$. Микроволновое облучение было использовано для повышения температуры обратных микроэмульсий, приготовленных с различными поверхностно-активными веществами. Присутствие катализаторов способствовало существенному повышению температуры, что ускоряло время протекания каталитической гидроочистки.

В исследовании [18] был системно проанализирован вклад микроволнового электрического поля в молекулярные взаимодействия. В частности, авторы исследовали изменение скорости удаления Ni и V из сырой нефти путем изменения различных параметров микроволнового излучения и с использованием три-меркаптотриазин натрия (ТМТ) в качестве деме­таллизирующего агента. При микроволновом облучении установлено, что Ni и V способны удаляться из порфиринового кольца без нарушения структуры кольца в процессе микроволновой обработки.

Исследование иракских ученых [19] посвящено способам очистки сырой нефти от металлов, которые в большинстве нефтепродуктов содержатся в виде примесей. Для этого ученые использовали лазерный метод, а затем сравнили его с ультразвуковым методом очистки. Результаты исследования показали, что эффективность удаления металлов значительно повышается при использовании лазерного облучения.

Статья [20] также посвящена исследованию методов удаления никеля и ванадия из сырой нефти Павлодарского нефтехимического завода, содержащей 23,09 г/т никеля и 58,59 г/т ванадия. Авторы сравнивают два подхода: экстракцию растворителями и электрохимический метод, стремясь выбрать наиболее эффективную и экономически целесообразную технологию для внедрения на производстве без изменения основной технологической линии.

Сравнение методов показало, что экстракция растворителями, особенно циклогексаном, значительно превосходит электрохимический подход

по эффективности. Авторы отмечают, что электрохимическое удаление металлов экономически нецелесообразно без предварительного деасфальтирования, так как требует больших энергозатрат и не обеспечивает достаточной степени очистки.

В статье [21] предложен инновационный метод удаления Ni^{2+} из нефти с использованием наночастиц оксида алюминия, модифицированных додецилсульфатом натрия (НДС). Авторы подчеркивают, что традиционные методы демиталлизации, такие как коксование и гидроочистка, часто требуют высоких затрат и обладают ограниченной эффективностью, тогда как нанотехнологии открывают новые возможности за счет увеличения удельной поверхности и адсорбционной емкости материалов.

Значимость исследования заключается в потенциальном применении Al_2O_3 +НДС для очистки нефти от металлов без модификации существующих технологических процессов. Однако для промышленного внедрения требуются дополнительные исследования, включая оценку устойчивости адсорбента в длительных циклах, оптимизацию синтеза для масштабирования и изучение влияния других металлов, таких как ванадий.

В статье [22] представлена технология извлечения ванадия из высоковязких нефтей Казахстана, основанная на комбинации физических методов. Ключевой способ включает резонансно-волновое воздействие на нефть (ультразвуковая обработка частотой 20–35 кГц и/или низкочастотная кавитация) с последующим центрифугированием для разделения фаз. Полученные шламы подвергаются магнитной сепарации, в результате чего выделяется парамагнитная фракция, содержащая соединения ванадия, и ферромагнитная фракция с соединениями железа и никеля. Далее парамагнитная фракция прокаливается при 350–500 °С, и ванадий извлекается из зольных остатков, а из ферромагнитной фракции — железо и никель. Таким образом, технология позволяет комплексно и эффективно извлекать ценные металлы из тяжелого углеводородного сырья, что особенно актуально для месторождений с высоким содержанием ванадия, таких как Северные Бузачи и Каражанбас.

В статье [23] исследуется возможность извлечения ценных металлов (V, Ni, Ti, Fe) из тяжелой нефти Ярегского месторождения, рассматриваемой как комплексное минеральное сырье. Методология включает комбинирование физических и химических воздействий: экстракцию гетеросоединений с использованием низкомолекулярных органических растворителей (наиболее эффективны керосин и этанол) и ультразвуковую обработку для интенсификации процесса. Установлено, что ультразвук существенно снижает вязкость системы, особенно в первые 5 минут, что способствует разрушению структуры нефти и повышает коэффициент диффузии. На основе результатов предложена принципиальная схема кавитационно-экстракционного извлечения металлов, где целевые компоненты концентрируются в нерастворимой асфальтеновой фракции. Работа носит при-

кладной характер и направлена на разработку технологии совмещенной переработки тяжелой нефти с извлечением ценных примесей.

В исследовании [24] изучена деме­таллизация тяжелой нефти Belayim Desert (Египет) с использованием природного (природный цеолит (ПЦ), клиноптилолит) и синтетического (синтетический цеолит (СЦ), фожазит) цеолитов. Методика включала адсорбционное удаление ионов Cr, Ni, V и Zn при варьировании времени контакта (3–26 ч), дозы сорбента (0,5–4 г) и объема нефти (50–200 мл), с последующими анализами: атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП), рентгеноструктурный анализ (РСА) и сканирующая электронная микроскопия с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (СЭМ-ЭДС). Основные результаты показали, что ПЦ эффективнее удаляет Ni и V (до 75,6% и 73,9% за 6 ч при 0,5 г), тогда как СЦ более эффективен для Zn и Cr, но требует больших доз (2 г) и времени (12–26 ч); селективность ПЦ составила $Cr > V > Ni > Zn$, а СЦ — $Cr > Zn > V > Ni$, что подтверждает практическую применимость цеолитов для предварительной очистки нефти.

В работе [25] исследована возможность использования глубоких эв­тектических растворителей (DES) для удаления металлов из тяжелой нефти. В качестве модельных систем применяли комплексы меди, железа и никеля с фталоцианином, растворенные в толуоле, а также реальный образец нигерийской нефти. Ключевым механизмом экстракции оказалось протонирование макроциклического лиганда в кислых DES (например, на основе метансульфоновой или щавелевой кислот), что приводит к переходу металлокомплекса в ионную форму и его переносу в DES-фазу. Процесс экзотермичен и более эффективен при пониженных температурах. Для реальной нефти эффективность удаления металлов (Fe, Ni, V, Cu) составила более 95 %. Важным преимуществом метода является возможность регенерации и повторного использования DES путем простой фильтрации или центрифугирования, а также низкая предполагаемая стоимость процесса (менее 1 цента на литр нефти). Работа демонстрирует потенциал кислых DES как энергоэффективных и рециклируемых сред для деме­таллизации нефти.

Биологический метод с использованием микробной обработки для процесса деме­таллизации был предложен в статье [26]. В ходе этого исследования был получен изолят, относящийся к виду *Aspergillus*, обладающий способностью к потреблению октаэтилпорфирина оксида ванадия (VOOEP) в качестве единственного источника углерода. Результаты анализа показали возможность деградации VOOEP и высвобождения ванадия в водную фазу. Этот микроорганизм может снижать содержание ванадия в сырой нефти. Спектрофотометрические эксперименты и анализ методом ВЭЖХ подтвердили способность данного вида микробной обработки к де­металлизации сырой нефти.

Помимо этого, данный биологический метод с применением микробной обработки может использоваться не только для деме­таллизации нефти,

но и ее облагораживания. Так, в статье ученых из Китая [27] в качестве перспективной технологии для облагораживания сверхтяжелой нефти предлагают рассмотреть, используя микробные биотехнологии, грибковые внеклеточные ферменты, полученные из битума.

Для того чтобы убедиться в нетрудозатратности полученных исследуемых штаммов грибов, авторы измерили их способность к росту в ходе процесса выращивания. В настоящем исследовании два вида грибов, выделенные из битума, показали устойчивый рост. О способности этих двух грибов использовать сверхтяжелую нефть как единственный источник УВ свидетельствовал их большой диаметр.

Статья [28] посвящена исследованию способности бактерии *Bacillus cereus* DS1, выделенной из нефтезагрязненной почвы, удалять тяжелые металлы из нефти через разрушение металлопорфириновых комплексов. Эксперименты проводились с использованием никель-протопорфирина (NiPPDS) и ванадил-октаэтилпорфирина (VOOEP) в качестве модельных соединений, имитирующих металлоорганические комплексы в нефти. Бактерию культивировали в среде с этими субстратами при 30 °С. Результаты показали, что *Bacillus cereus* DS1 эффективно разрушает NiPPDS.

Статья [29] посвящена разработке нового экологически безопасного терполимера АРЕАА-НЕА-МА, предназначенного для эффективного удаления кальция из сырой нефти. Авторы предложили решение на основе синтеза терполимера, состоящего из аллилполиэтоксикарбоксилата (АРЕАА), гидроксиэтилакрилата (НЕА) и малеинового ангидрида (МА), полученного методом свободнорадикальной полимеризации в водном растворе. Структура и свойства полимера были детально изучены с использованием ИК-Фурье спектроскопии, ЯМР, СЭМ, ПЭМ и гель-проникающей хроматографии (ГПХ). Из результатов следует, что полимер обладает амфифильными свойствами, сочетая гидрофильные и олеофильные группы, что обеспечивает его способность связывать кальций за счет карбоксильных, amino- и эфирных функциональных групп. Оптимальные условия декальцификации были достигнуты при молярном соотношении мономеров 1:2:5, времени полимеризации 2 часа, дозировке 100 ppm и температуре 100 °С, что позволило удалить до 97,88 % кальция из нефти.

Авторы подчеркивают, что разработанный терполимер АРЕАА-НЕА-МА сочетает высокую эффективность, экологическую безопасность и экономическую целесообразность, что делает его перспективным решением для предварительной обработки сырой нефти в промышленных условиях. Работа вносит вклад в развитие зеленой химии, предлагая альтернативу токсичным и малоэффективным реагентам, используемым в нефтепереработке.

Результаты

Результаты эффективности различных методов обобщены в таблице ниже (табл. 1).

Таблица 1. Сравнительная эффективность методов деметаллизации тяжелого нефтяного сырья

Table 1. Comparative efficiency of demetallization methods for heavy oil feedstocks

Подход	Условия/Примечания	Эффективность удаления
Гидродеметаллизация (ГДМ)	Высокие Т (360–425 °С), Р (до 13 МПа), расход H ₂ . Быстрая дезактивация катализатора	V, Ni: 60–90 %
Сорбенты (P4VP@SiO ₂)	Процесс электрообессоливания, Т = 120 °С. Селективность зависит от функциональной группы полимера.	Ni: до 68,2 %, Ca: до 73,2 %
Терполимер АРЕАА-НЕА-МА	Мягкие условия (100 °С), дозировка 100 ppm. Зеленый реагент	Ca: до 97,88 %
Хелатирование (Бис(2-этилгексил)фосфорная к-та)	Образование ионных жидкостей in situ, Т = 50–70 °С.	V: до 90 %, Ni: до 79 %, S: до 53 %
Электрохимический метод	Атмосферное давление, комнатная температура. Низкая эффективность для цельной нефти из-за матрицы	Модельные V-порфирины: до 84 %; цельная нефть: V/Ni ~7–8 %
Сверхкритическая вода (СКВ)	Т = 400–500 °С, Р = 25–45 МПа. Высокие энергозатраты	V: до 80 %, Ni: до 76 %
Микроволновое облучение + реагенты	Сокращение времени реакции, синергия с химическими агентами	V, Ni: высокие показатели (конкретные значения варьируются)
Биовыщелачивание (грибы/бактерии)	Мягкие условия, длительное время (дни). Перспективно, но не масштабировано	V: до 90 %

Анализируя результаты эффективности различных методов, можно сделать следующие выводы:

1. Оптимизация катализаторов ГДМ: катализаторы со средним размером пор (~17 нм) демонстрируют лучшую эффективность и устойчивость к дезактивации по сравнению с микропористыми или макропористыми аналогами.
2. Математическое моделирование подтверждает, что структура пор (преобладание макропор) критически влияет на срок службы катализатора.
3. Наиболее щадящим методом является промывка слабыми кислотами (щавелевая, лимонная) после кальцинации, которая сохраняет структуру и частично восстанавливает активность.

4. Наибольшую эффективность показывают комбинированные методы (например, предварительная сорбционная очистка с последующей оптимизированной ГДМ).

Обсуждение

Анализ технологий деме­таллизации тяжелых неф­тей показал, что существующие промышленные методы, в первую очередь ГДМ, обладают серьезными недостатками: высокие энергозатраты, быстрая дезактивация катализаторов и значительный расход водорода. Перспективы развития связаны с созданием гибридных систем, сочетающих сорбционные, гидрометаллургические и биотехнологические подходы.

Обзор свидетельствует о переходе от доминирования единого высокоэнергетического процесса, такого как ГДМ, к разработке множества селективных, часто «более мягких» альтернатив. Успех метода сильно зависит от типа сырья и целевого металла. Например, для удаления кальция высокоэффективны специальные полимеры, а для глубокой очистки от ванадия и никеля в промышленных масштабах пока незаменима ГДМ, но в оптимизированном виде.

Полученный анализ также подтверждает, что не существует универсального решения, а будущее за гибридными системами, комбинирующими сильные стороны разных подходов.

Обзор опирается на данные лабораторных и пилотных исследований. Экономические показатели, вопросы масштабирования и долгосрочной стабильности многих альтернативных методов требуют дополнительной проработки.

Наиболее готовы к внедрению:

- оптимизированные катализаторы ГДМ с градиентной пористой структурой;
- сорбционные/хелатирующие добавки на стадии подготовки сырья (обессоливание).

Направления будущих исследований связаны с разработкой высоко­селективных и регенерируемых сорбентов/реагентов; углубленным математическим моделированием и искусственным интеллектом для прогнозирования дезактивации и оптимизации процессов; созданием экономически эффективных схем каскадной или гибридной обработки сырья; интеграцией биотехнологических этапов в технологические цепочки.

Выводы

1. Традиционная гидроде­металлизация остается ключевым промышленным методом, но ее недостатки (высокие затраты, дезактивация) стимулируют активный поиск альтернатив.

2. Наибольший практический интерес представляют сорбционные и хелатирующие методы с использованием функционализированных

материалов, позволяющие удалять до 68–98 % металлов в относительно мягких условиях, интегрируясь в существующие технологические схемы (например, электрообессоливание).

3. Технологии извлечения металлов (V, Ni) из тяжелых остатков и отработанных катализаторов трансформируют экологическую проблему в источник ценных продуктов, обеспечивая извлечение до 95 % ванадия.

4. Критическим фактором эффективности каталитических методов является оптимизация пористой структуры катализаторов, а для prolongation их срока службы перспективна регенерация методами мягкого кислотного выщелачивания.

5. Перспективным направлением является не выбор единственного «лучшего» метода, а разработка гибридных технологических схем, комбинирующих предварительную демеетализацию сорбционными методами с последующей оптимизированной ГДМ и обязательной переработкой образующихся отходов с извлечением металлов. Это позволит достичь максимальной экономической и экологической эффективности переработки тяжелого нефтяного сырья.

Вклад авторов

Атрощенко В. В.: сбор данных/ресурсов; анализ данных; написание, подготовка первоначального варианта; утверждение окончательной версии.

Мухаматдинов И. И.: концептуализация; методология, написание, редактирование и доработка; утверждение окончательной версии.

Authors' contributions

Valery V. Atroshchenko: data/resources collection and analysis; writing; original draft; final approval.

Irek I. Mukhamatdinov: conceptualization; methodology; writing; editing and revising; final approval.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests. The authors declare no conflicts of interest.

Список источников / References

1. Kurniawan Y. S. The Origin, Physicochemical Properties, and Removal Technology of Metallic Porphyrins from Crude Oils. *Indonesian Journal of Chemistry*. 2021; 21(4):1023–1038. <https://doi.org/10.22146/ijc.62521>
2. Ancheyta J., Speight J. G. (Eds.). *Hydroprocessing of Heavy Oils and Residua*. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2007. 424 p. <https://doi.org/10.1201/9781420007435>
3. Newson E. Catalyst Deactivation Due to Pore-Plugging by Reaction Products. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*. 1975;14(1):27–33. <https://doi.org/10.1021/i260053a005>

4. Geng T., Xu J., Ren M., Li X., Cao F. Selectivity and capacity of the core-shell demetalizers for removal of nickel and calcium ions from heavy oil through conventional electric desalination process. *Fuel*. 2021;(289):119935. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119935>
5. Sheldaisov-Meshcheryakov A. A., Solmanov P. S., Maximov N. M. Influence of the Pore Structure of a Catalyst for Demetallization of Petroleum Feedstock on the Process. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2019;92(10):1392–1398. <https://doi.org/10.1134/S1070427219100065>
6. Oyekunle L. O., Ikpekri O. B. Modeling of Hydrodesulfurization Catalysts. I. Influence of Catalyst Pore Structures on the Rate of Demetallization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2004;43(21):6647–6653. <https://doi.org/10.1021/ie049702d>
7. Cho S. I., Jung K. S., Woo S. I. Regeneration of spent RFCC catalyst irreversibly deactivated by Ni, Fe, and V contained in heavy oil // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2001;33(3):249–261. [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(01\)00182-3](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(01)00182-3)
8. Ramírez S., Ancheyta J., Centeno G., Marroquín G. Non-catalytic hydrodesulfurization and hydrodemetallization of residua. *Fuel*. 2011;90(12):3571–3576. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.03.039>
9. Gould K. A. Oxidative demetallization of petroleum asphaltenes and residua. *Fuel*. 1980;59(10):733–736. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(80\)90029-0](https://doi.org/10.1016/0016-2361(80)90029-0)
10. National Center for Biotechnology Information. PubChem Patent Summary for US-4148717-A, *Demetallization of petroleum feedstocks with zinc chloride and titanium tetrachloride catalysts*. 2025. URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/patent/US-4148717-A>
11. Nametkin N. S., Gubin S. P., Tjurin V. D., Fedorov V. V., Larionov L. I., Kozin V. A., Zhadanovsky N. B., Barashkov R. Y. *Method of purifying crude petroleum and primary refining products*. Pat. US3996130A USA. filed Feb. 26, 1976, and issued Dec. 7, 1976.
12. Attia M., Farag S., Jaffer S. A., Chaouki J. Metal and sulfur removal from petroleum oil using a novel demetallization-desulfurization agent and process. *Journal of Cleaner Production*. 2020;(275):124177. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124177>
13. Pirkwieser P., López-López J., Kandioller W., Keppler B., Moreno C., Jirsa F. Novel 3-Hydroxy-2-Naphthoate-Based Task-Specific Ionic Liquids for an Efficient Extraction of Heavy Metals. *Frontiers in Chemistry*. 2018;(6):172. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00172>
14. Issa B., Bazhin V. Y. Assessment of possibility of obtaining alloying components in the process of desalting of heavy hydrocarbon raw materials. Part 2. *CIS Iron and Steel Review*. 2021;(21):9–15. <https://doi.org/10.17580/cisirs.2021.01.02>
15. Mandal P. C., Goto M., Sasaki M. Removal of Nickel and Vanadium from Heavy Oils Using Supercritical Water. *Journal of the Japan Petroleum Institute*. 2014;57(1):18–28. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/579/1/012033>
16. Amin S., Jaffer S. A., Chaouki J. Process development and techno-economic analysis of microwave-assisted demetallization and desulfurization of crude petroleum oil. *Energy Reports*. 2024;(25):551–563. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.07.024>

17. Madriz L., Carrero H., Domínguez J. R., Vargas R., Fernández L. Catalytic hydrotreatment in reverse microemulsions under microwave irradiation. *Fuel*. 2013;(112):338–346. [hppt://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.04.082](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.04.082)
18. Shang H., Zhang C., Zhang Q., Li J., Fan X. Theoretical study of the interactions between demetallization agent and Ni/V porphyrins and the removal under microwave irradiation. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. 2024;(196): 109622. [hppt://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109622](https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109622)
19. Ahmed Hbeeb B., Akbar A. A. Evaluation of demetallization efficiency from crude oil by comparing laser-assisted with ultrasonic-assisted demetallization using lips-technology. AIP Conference Proceedings. 2023;2809(1):040002. [hppt://doi.org/10.1063/5.0161466](https://doi.org/10.1063/5.0161466)
20. Aliya K., Akhmetov N. K., Yeshmuratov A., Zulkharnay R., Sugurbekov E., Demeuova G., Baisariyev M., Sugurbekova G. Removal of nickel and vanadium from crude oil by using solvent extraction and electrochemical process. *Physical Sciences and Technology*. 2017;4(1):74–80. [hppt://doi.org/10.26577/phst-2017-1-127](https://doi.org/10.26577/phst-2017-1-127)
21. Konne J. L., Ud I., Ag C. Demetallization of Nickel from Crude Oil using Aluminum Oxide (Al₂O₃) Nanoparticles Synthesized with Sodium Dodecyl Sulfate (SDS). *Journal of Material Sciences & Engineering*. 2017;6(6):1–7. [hppt://doi.org/10.4172/2169-0022.1000417](https://doi.org/10.4172/2169-0022.1000417)
22. Нуkenов Д. К. К вопросу о методах извлечения ванадия из высоковязких нефтей (на примере месторождений Республики Казахстан). *Нефть. Газ. Новации*. 2016;(4):81–82.
- Nukenov D. K. On the Methods of Extracting Vanadium from High-Viscosity Oils (Based on the Deposits of the Republic of Kazakhstan). *Neft. Gaz. Novatsii*. 2016;(4):81–82. (In Russ.).
23. Aleksandrova T., Aleksandrov A. Nikolaeva N. ‘An Investigation of the Possibility of Extraction of Metals from Heavy Oil’. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2017;38(2):92–95. [hppt://doi.org/10.1080/08827508.2016.1262860](https://doi.org/10.1080/08827508.2016.1262860)
24. Othman I. M., Ghattas Z. F., Halim S. N. et al. Study on demetallization of heavy crude oil using different zeolitic materials. *Scientific Reports*. 2025;(15):20121. [hppt://doi.org/10.1038/s41598-025-04348-y](https://doi.org/10.1038/s41598-025-04348-y)
25. Mirinn E., Abbott A. P., Kilpatrick A. F. R. Deep Eutectic Solvents as Recyclable Media for Metal Removal from Crude Oil. *ChemRxiv*. 2025. [hppt://doi.org/10.26434/chemxiv-2025-lbqmm](https://doi.org/10.26434/chemxiv-2025-lbqmm)
26. Salehizadeh H., Kermanshahi R. Microbial Demetallization of Crude Oil Using *Aspergillus* sp.: Vanadium Oxide Octaethyl Porphyrin (VOOEP) as a Model of Metallic Petroporphyrins. *Iranian Journal of Biotechnology*. 2007; 5(4):226–231.
27. Zhang J., Feng W., Ren L. Fungal Extracellular Enzymes from *Aspergillus* spp. as Promising Candidates for Extra-Heavy Oil Degradation and Enhanced Oil Recovery. *Microorganisms*. 2024;12(11):2248. [hppt://doi.org/10.3390/microorganisms12112248](https://doi.org/10.3390/microorganisms12112248)
28. Qatie E. H., Al hasani N. M., Hachim A. F., Alsudani A. G., Maied S. K. Ability of a Local *Bacillus cereus* DS1 Isolate of Dematallization of Heavy Metals. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*. 2017;7(21):58–63.
29. Ma S., Xu P., Cai Z., Qin H., Fu X., Zhang Z. et al. Development of a Novel Terpolymer as a Green and Efficient Decalcifying Agent for Crude Petroleum. *ACS Omega*. 2018;3(10):13170–13178. [hppt://doi.org/10.1021/acsomega.8b02198](https://doi.org/10.1021/acsomega.8b02198)

Информация об авторах / Information about the authors

Атрошенко Валерий Валерьевич, аспирант 2 года обучения, лаборант, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, atroshchenkovv@mail.ru

Valery V. Atroshchenko, Second Year Postgraduate Student, Laboratory Assistant, Kazan (Volga Region) Federal University, atroshchenkovv@mail.ru

Мухаматдинов Ирек Изаилович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, iimuhamatdinov@gmail.com

Irek I. Mukhamatdinov, Candidate of Engineering Sciences, Leading Researcher, Associate Professor, Kazan (Volga Region) Federal University, iimuhamatdinov@gmail.com

Поступила в редакцию / Received 18.12.2025

Поступила после рецензирования / Revised 24.12.2025

Принята к публикации / Accepted 02.02.2026