

Научная статья

УДК 579.66

<https://doi.org/10.24143/1812-9498-2024-4-15-22>

EDN RQLHYV

Биотехнология в нефтяной промышленности, извлечение нефти путем производства микробиологического газа

***А. Х.-Х. Нугманов[✉], О. А. Петровичев, Н. А. Агапонова,
С. Ю. Болгов, Н. Н. Обуховская, Д. В. Путилин***

*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, albert909@yandex.ru[✉]*

Аннотация. Значительное количество сырой нефти задерживается в пластах и часто не извлекается обычными методами нефтеотдачи пластов. Нефтяная промышленность сталкивается с проблемами удаления серы, металлов, азота, а также нежелательных органических соединений из сырой нефти. Традиционные методы вторичного извлечения, такие как закачка воды и газа, продуктивность скважины, в то время как химические и физические процессы очистки, такие как гидродесульфуризация и высокотемпературная обработка под высоким давлением, удаляют большинство неорганических примесей. Растущий спрос на нефть в мире в сочетании с очень строгими законами об охране окружающей среды оказывает экономическое и техническое давление на нефтеперерабатывающую промышленность с целью дальнейшего повышения нефтеотдачи пластов, а также снижения концентрации серы, металлов и азота до низких уровней. В поисках экономичных и экологически чистых решений все большее внимание уделяется биотехнологиям, таким как использование микробиологического метода повышения нефтеотдачи пластов (MEOR). MEOR – это альтернативный метод восстановления, в котором используются микроорганизмы и продукты их метаболизма. Кроме того, рассматриваются новые области переработки сырой нефти и связанные с ними промышленные процессы, такие как биодесульфуризация, биодеталлирование, биоденитрогенизация и биотрансформация. В статье предоставлена общая информация о MEOR, в частности способ извлечения нефти путем производства микробиологического газа, и выделены проблемы, которые необходимо преодолеть, чтобы достичь коммерческого успеха. С практической точки зрения приведена оценка состава местных микроорганизмов и пути их метаболизма для предотвращения нежелательного роста, деградации и образования газов, возможности эффективной транспортировки стимулятора/ингибитора роста, а также возможности снижения его стоимости. Отмечено, что производство микробного газа должно быть достаточным для достижения желаемого эффекта, а рост бактерий не должен приводить к полной закупорке резервуара.

Ключевые слова: нефтяная промышленность, извлечение нефти, биотехнология, микробиологически повышенная нефтеотдача (MEOR)

Для цитирования: Нугманов А. Х.-Х., Петровичев О. А., Агапонова Н. А., Болгов С. Ю., Обуховская Н. Н., Путилин Д. В. Биотехнология в нефтяной промышленности, извлечение нефти путем производства микробиологического газа // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2024. № 4. С. 15–22. <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2024-4-15-22>. EDN RQLHYV.

Original article

Biotechnology in the petroleum industry, the extraction of oil through the production of microbiological gas

***A. Kh.-Kh. Nugmanov[✉], O. A. Petrovichev, N. A. Agaponova,
S. Yu. Bolgov, N. N. Obukhovskaya, D. V. Putilin***

*Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, albert909@yandex.ru[✉]*

Abstract. A significant amount of crude oil is trapped in reservoirs and is often not recovered by conventional oil recovery methods. The oil industry is faced with the problems of removing sulfur, metals, nitrogen, as well as undesirable organic compounds from crude oil. Traditional secondary extraction methods such as water and gas injection help to increase well productivity, while chemical and physical purification processes such as hydrodesulfurization and

high-temperature high-pressure treatment remove most inorganic impurities. The growing demand for oil in the world, combined with very strict environmental protection laws, has put economic and technical pressure on the refining industry to further increase oil recovery, as well as reduce the concentration of sulfur, metals and nitrogen to low levels. In the search for cost-effective and environmentally friendly solutions, increasing attention is being paid to biotechnology, such as the use of the microbiological method of enhanced oil recovery (MEOR). MEOR is an alternative recovery method that uses microorganisms and their metabolic products. In addition, new areas of crude oil refining and related industrial processes such as biodesulfurization, biodetallization, bidenitogenization and biotransformation are being considered. The article provides general information about MEOR, in particular, the method of extracting oil by producing microbiological gas, and highlights the problems that must be overcome in order to achieve commercial success. From a practical point of view, an assessment is given of the composition of local microorganisms and their metabolic pathways to prevent unwanted growth, degradation and formation of gases, the possibility of effective transportation of a growth stimulant/inhibitor, as well as the possibility of reducing its cost. It is noted that the production of microbial gas should be sufficient to achieve the desired effect, and the growth of bacteria should not lead to a complete blockage of the reservoir.

Keywords: petroleum industry, oil extraction, biotechnology, microbiological enhanced oil recovery (MEOR)

For citation: Nugmanov A. Kh.-Kh., Petrovichev O. A., Agaponova N. A., Bolgov S. Yu., Obukhovskaya N. N., Putilin D. V. Biotechnology in the petroleum industry, the extraction of oil through the production of microbiological gas. *Oil and gas technologies and environmental safety*. 2024;4:15-22. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2024-4-15-22>. EDN RQLHYV.

Введение

В настоящее время экономики большинства стран зависят от продуктов, получаемых из сырой нефти, нехватка нефтяных ресурсов может поставить под угрозу развитие стран и повысить стоимость жизни. С увеличением потребления нефти развивающимися странами увеличился спрос и цена на нефть на мировом рынке. Прогноз глобального использования энергии Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) и странами, не входящими в ОЭСР, на период с 2006 по 2030 гг. показывает увеличение потребления нефти на 15,5 и 73 % соответственно при существующих энергетических ресурсах [1]. В условиях неуклонного роста спроса на нефть перспективными альтернативами являются разведка новых источников энергии или использование методов повышения нефтеотдачи пластов (MEOR) в низкоэффективных и истощенных нефтяных скважинах [1, 2].

В настоящее время в нефтяной промышленности для извлечения остаточной нефти используются различные методы повышения нефтеотдачи. Используемый метод его повышения зависит от характеристик сырой нефти в нефтяном пласте. Методы повышения нефтеотдачи делятся на три большие группы: термические (закачка пара, сжигание и закачка горячей воды); химические (закачка полимеров, поверхностно-активных веществ и щелочей); газовые (закачка CO₂, N₂ и дымовых газов) [3, 4]. Применение термических методов, в частности огневого воздействия, может привести к образованию полярных соединений, таких как карбены и карбониды, которые несовместимы с асфальтенами и могут закупоривать поры и каналы, по которым нефть должна перемещаться во время добычи [5]. Повы-

шение нефтеотдачи химическим методом, вследствие использования химических веществ, влияет на нефтеносные породы, изменяя ее характеристики. При закачке газа используются различные типы смешивающихся или несмешивающихся газов для вытеснения нефти к точке добычи. Основными недостатками термических и химических методов являются высокие энергозатраты и стоимость химических веществ. В случае закачки газовых сред необходимо учитывать наличие газов под высоким давлением [6, 7].

Перспективным конкурентноспособным способом нефтедобычи служит ее микробиологическое повышение (МПН). Данный подход, рекомендованный А. Бекманом в 1926 г., предопределяет применение для роста нефтедобычи и обуславливает закачивание питательной среды с микроорганизмами в нефтяную скважину. При благоприятном состоянии внешней среды популяция микроорганизмов интенсивно увеличивается, а продукты их жизнедеятельности приводят к мобилизации остаточного нефтяного сырья [2, 8]. При наличии благоприятных микроорганизмов на месте можно вводить питательные вещества, и эти микробы способны вырабатывать широкий спектр метаболитов, а их увеличение и степень влияния обусловлены следующими обстоятельствами:

- пропускательной способностью, пористостью, температурой T , давлением P , долей растворенных твердых субстанций, пластовой кислотностью и соленостью;
- питательными для бактерий средами;
- видами микроорганизмов.

Метаболиты и применение микробов в нефтяных пластах представлены на рис. 1.

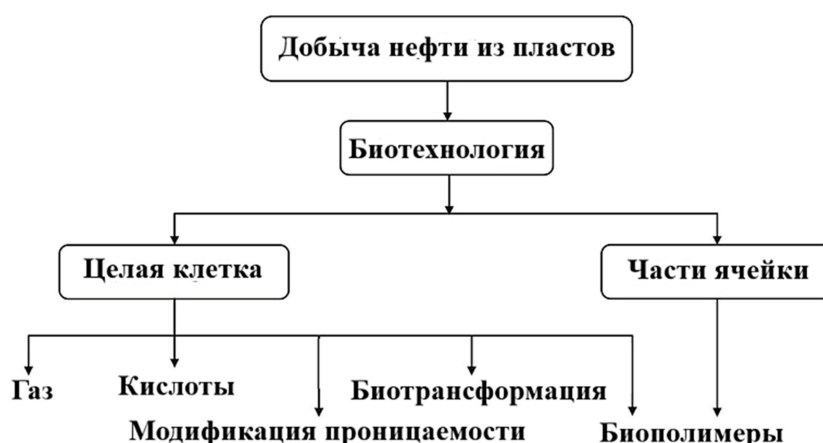


Рис. 1. Потенциальные применения биотехнологии при добыче нефти из пластов

Fig. 1. Potential applications of biotechnology in oil production from reservoirs

Биотехнологические методы могут быть применены для МЕОР из нефтеносных песков и в нефтеперерабатывающей промышленности, где микроор-

ганизмы могут использоваться для переработки сырой нефти (рис. 2).

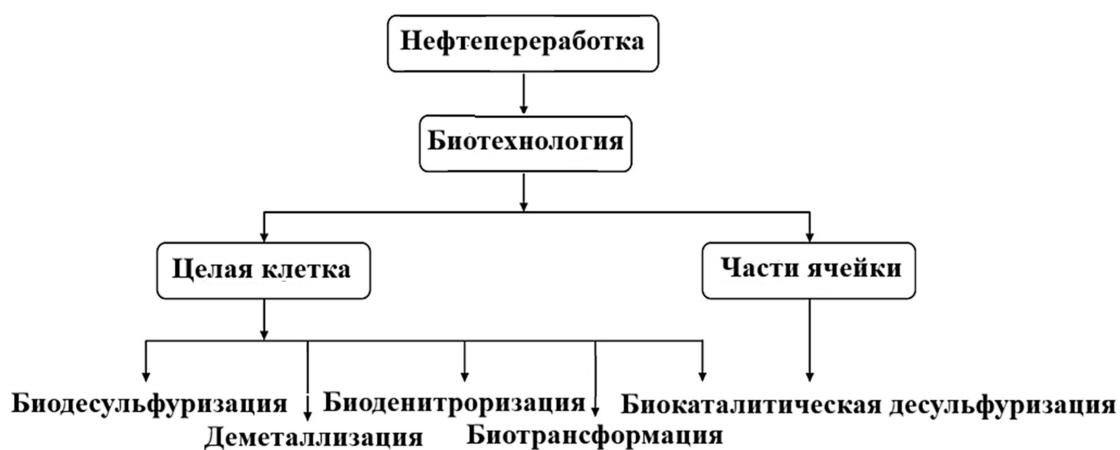


Рис. 2. Потенциальные применения биотехнологии на нефтеперерабатывающих заводах

Fig. 2. Potential applications of biotechnology in oil refineries

МЕОР из нефтеносных песков все еще находится на стадии исследования из-за своей новизны и уникальных экологических проблем (нехватки воды, высокой концентрации углеводородов) [2, 8].

Цель статьи – дать представление и критически обсудить потенциал применения биотехнологии в нефтяной промышленности с особым акцентом на добычу нефти из пластов и последующую биоочистку.

Биотехнология в нефтяной промышленности

Первичным извлечением называют первичное нефтяное сырье, извлекаемое при естественном

давлении P , которое побуждает его вытекать из пласта на его поверхность, что обуславливает минимальные затраты. При данном способе добывается 20 % исходного нефтяного сырья в мировой практике. Вторичное извлечение реализуется при снижении давления в пласте. Давление обычно повышается путем закачки воды или газа. Эти методы более дорогостоящие, чем первичное извлечение, и на их долю приходится дополнительное извлечение 45–50 % сырья. По оценкам некоторых исследователей [2, 9–11], примерно 58 % от общего объема нефти не извлекается при использовании современных технологий и обладает большим по-

тенциалом для улучшения или разработки новых методов добычи нефти. Третичные методы или MEOR включают термические и химические процессы с применением растворителей, поверхностно-активных веществ, микроэмульсий, синтетических полимеров на основе крахмала / циклодекстрина и полимеров, полученных микробиологическим путем, таких как ксантановая камедь, для получения дополнительных 7–15 % сырья [8, 9]. Благодаря имеющимся или разрабатываемым в настоящее время методам, MEOR является экологически чи-

стым и устойчивым. Основные методы получения MEOR из пластов были предложены еще 60 лет назад – патент «Бактериологический процесс для обработки флюидоносных грунтовых пластов» (патент США 2413278) [2].

Цельноклеточные приложения в MEOR характеризуются микробиальной стабильностью в условиях, преобладающих в пластах, при кислородном дефиците, высоком давлении P , повышенных температурах T и солености (рис. 3).



Рис. 3. Экстремально галофильные аэробные археобактерии

Fig. 3. Extremely halophilic aerobic archaeobacterial

Таким образом, комбинация термо-, баро- и галофильных микроорганизмов особенно подходит для проведения MEOR. Например, две гало- и термоустойчивые ферментирующие бактерии из нефтесодержащего шлама выделили в условиях повышенной концентрации соли (около 8 % масс./об.) и температуре 50 °С, при этом образуются поверхностно-активные соединения гликолипиды [2, 12].

Стратегии, используемые при MEOR, зависят от преобладающих условий в нефтеносном пласте, включая температуру, давление, pH, пористость, соленость, геологический состав пласта, наличие питательных веществ и разнообразие местных микроорганизмов. Эта точка зрения была подтверждена Г. Эвансом и Дж. Ферлонгом в 2003 г. применительно к рынку биотехнологий в целом [13]. Они отметили тот факт, что сложность исполнения ряда проектов существенно задерживает реализацию известных технических решений, что обуславливает трудность их реальной адаптации. Это может значительно тормозить использование биотехнологий по причине ограниченности сроков и бюджета для разработки проекта. Отсюда следует, что общий подход, т. е. сбор данных (идентификация бактерий, геологический состав участка и состояние питания и т. д.), разработка наилучшей питательной среды и/или микроорганизмов, оптимальный дизайн биореактора, лабораторные, пилотные и полевые испытания могут оказаться неэффективными. Вместо этого модульный подход с использованием готовых

компонентов, основанный на предыдущей работе и ограничивающий тестирование подтверждающими исследованиями (необходимость быстрых и точных скрининговых тестов), может помочь сократить время на решения поставленных задач. Однако для определения наиболее успешных стратегий MEOR требуются более концептуальные и эмпирические технико-экономические обоснования, подкрепленные количественными данными [2, 14, 15].

Метод получения микробного газа для MEOR был первоначально разработан в 1946 г. Основная идея заключалась в том, чтобы закачивать или стимулировать местные бактерии для выработки CO₂ и/или метана, чтобы повысить давление в пласте, снизить вязкость нефти и, в случае известняка или углеродистого песчаника, выщелочить кальцит и сидерит, высвободив таким образом адсорбированную нефть [2].

В 90-х годах прошлого века исследователи вводили анаэробную бактерию *Clostridium acetobutylicum* в пласт и изучали одномерную модель резервуара из зерен известняка с периодом выдержки около 45 ч и обнаружили общее увеличение эффективности MEOR на 12 % по сравнению с контролем. Это увеличение было связано со снижением вязкости нефти и увеличением pH. Было замечено, что удвоение периода простоя не привело к дополнительной добыче нефти по сравнению с 45 часами, в то время как, что интересно, вязкость нефти увеличилась на 31 %, а pH снизился (более кислый, чем в контроле).

Десять лет спустя было установлено, что снижение вязкости сырой нефти произошло в основном за счет растворенного CO_2 . Для дальнейшего уточнения относительного вклада органических кислот и биосурфактантов, вырабатываемых в МЕОР, необходимо провести дополнительные эксперименты [16, 17].

На сегодняшний день подтверждено, что CO_2 действительно приводит к растворению компонентов песчаника в полевых условиях, однако еще предстоит определить, способны ли бактерии вырабатывать достаточное количество CO_2 в естественной анаэробной среде для достижения аналогичных эффектов [2]. Для выявления этих эффектов также может потребоваться минимальное давление смешивания, кроме того, опыт эксплуатации показал, что увеличение концентрации в водной фазе приводит к падению pH и проблемам образования отложений CaCO_3 в эксплуатационной скважине, где снижается давление и кислотность раствора [18]. При этом зоны относительно низкого давления в пласте позволяют сжато CO_2 расширяться, охлаждая окружающую среду. Это может, в зависимости от температуры и давления, привести к выпадению в осадок парафиноасфальтовой фракции с пагубным воздействием на нефтеотдачу. Еще одним вопросом, вызывающим озабоченность, является сложность, связанная с использованием CO_2 для МЕОР. В потоке CO_2 может сосуществовать до пяти фаз (в зависимости от давления, температуры и состава газа), что усложняет понимание, моделирование и прогнозирование ожидаемой нефтеотдачи пластов [2, 19, 20].

Следует также отметить, что в неглубоких резервуарах с водяным охлаждением требуется больше CO_2 из-за увеличения плотности, однако различия в плотности между CO_2 , нефтью и водой уменьшаются, что улучшает очистку. Это может иметь существенное влияние на микробиологиче-

ское заполнение газом. Например, можно ожидать, что скорость метаболизма местной популяции микроорганизмов и производство газа (включая CO_2) снизятся (из-за неоптимальных условий роста), тогда как требуемое производство CO_2 должно увеличиться, чтобы повысить нефтеотдачу.

Заключение

В контексте добычи нефти путем микробиологического производства газа могут быть реализованы две стратегии цельноклеточного МЕОР:

1) стимулирование использования собственной или добавленной биомассы для использования тяжелой углеводородной фракции в пласте в качестве источника углерода с целью получения газа (и биосурфактантов) с дополнительными преимуществами снижения вязкости сырой нефти и тенденции к отложению как парафина, так и асфальтенов;

2) обеспечение селективных и дешевых питательных веществ в местной или добавленной биомассе в качестве источника углерода, что позволяет избежать снижения теплотворной способности сырой нефти.

С практической точки зрения необходимо решить следующие задачи:

1) определение состава местных микроорганизмов и пути их метаболизма, с целью предотвращения нежелательного роста, деградации и образования газов;

2) эффективность транспортировки стимулятора ингибитора роста;

3) снижение стоимости стимулятора ингибитора роста;

4) достаточное производство микробного газа для достижения желаемого эффекта;

5) рост бактерий не должен приводить к полной закупорке резервуара.

Список источников

1. Маркова В. М., Чурашев В. Н. Эволюция прогнозов развития мировой и российской энергетики: способ ответа на экономические вызовы // Мир экономики и управления. 2020. Т. 20, № 3. С. 108–138.

2. Bachmann R. T., Johnson A. C., Edyvean R. G. J. Biotechnology in the petroleum industry: an overview // International Biodeterioration & Biodegradation. 2014. Vol. 86. P. 225–237.

3. Подымов Е. Д., Слесарева В. В., Рафикова К. Р. Обзор представлений о классификации методов увеличения нефтеизвлечения // Сб. науч. тр. ТатНИПИнефть. № LXXVIII. М.: Всерос. науч.-исслед. ин-т организации, управления и экономики нефтегаз. пром-ти, 2010. С. 150–160.

4. Школьная А. В. Влияние методов повышения нефтеотдачи на физико-химический состав пластовых флюидов в процессе разработки нефтяных месторождений: выпуск. квалификац. работа бакалавра. Томск, 2023. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/76267> (дата обращения: 01.09.2024).

5. Демлер Ю. А. Влияние низкочастотного ультразвукового воздействия на реологические параметры флюида нефтегазоконденсатного месторождения: выпуск. квалификац. работа бакалавра. Красноярск: СФУ, 2021. URL: <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/144140> (дата обращения: 01.09.2024).

6. Гатауллин Р. Н. Состояние разработки месторождений тяжелой нефти и природных битумов // Вестн. технолог. ун-та. 2018. Т. 21, № 10. С. 71–82.

7. Антониади Д. Г. и др. Анализ существующих методов борьбы с асфальтосмолопарафиновыми отложениями (АСПО) при добыче нефти // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2011. № 9. С. 32–37.

8. Богданов М. А., Хайруллина Л. Б. Повышение уровня экологической безопасности при использовании биотехнологий для снижения вязкости нефти // Перспективные технологии и материалы: материалы Международ. науч.-практ. конф. Севастополь: СГУ, 2021. С. 257–261.

9. Малхасян К. А., Попов Д. В., Булатов В. Р. Повышение нефтеотдачи пластов при использовании полимеров // Проблемы геологии и освоения недр: тр. XXV Международ. симпозиума им. акад. М. А. Усова студентов и молодых учёных, посвящ. 120-летию гор.-геолог. образования в Сибири, 125-летию со дня основания Томск. политехн. ун-та. Томск: Изд-во ТПУ, 2021. Т. 2. С. 90–92.

10. Назаров В., Краснов О., Медведева Л. Арктический нефтегазоносный шельф России на этапе смены мирового энергетического базиса // Энергет. политика. 2021. URL: <https://energypolicy.ru/arkticheskij-neftegazonosnyj-shelf-rossii-na-etape-smeny-mirovogo-energeticheskogo-bazisa/regiony/2021/09/15/> (дата обращения: 01.09.2024).

11. Галушко М. В., Данышина А. П. Сланцевая нефть в структуре современного топливно-энергетического комплекса: положение, проблемы, перспективы развития // Общество, образование, наука в современных парадигмах развития: сб. тр. по материалам III Нац. науч.-практ. конф. Керч: КГМТУ, 2022. С. 128–134.

12. Рящина А. Д., Леонтьева С. В. Анализ современных методов обезвреживания нефтешламов // Евраз. союз ученых. 2020. № 11-7 (80). С. 59–66.

13. Evans G. M., Furlong J. C. Environmental biotechnology: theory and application. John Wiley & Sons, 2003. 300 p.

14. Дебабов В. Г. Биотехнология – шанс для России // Инновации. 2014. № 3 (185). С. 3–5.

15. Кайырманова Г. К. и др. Приемы консервации перспективных в нефтяной промышленности бактерий

для сохранения биологических свойств // Вестн. нефтегаз. отрасли Казахстана. 2024. Т. 6. № 1. С. 110–119.

16. Обухова П. В. Методы борьбы с бактериальной коррозией для условий нефтегазодобычи в условиях Ванкорского нефтяного месторождения: магистер. дис. Красноярск: СФУ, 2017. URL: <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/65716> (дата обращения: 01.09.2024).

17. Якупов И. Р. и др. Оценка возможности использования процессов внутрипластовой конверсии при освоении тяжелых высоковязких нефтей // Вестн. технолог. ун-та. 2015. Т. 18, № 19. С. 35–39.

18. Соколова Д. Ш. и др. Микробное разнообразие в месторождениях тяжелой нефти как основа для создания биотехнологий увеличения нефтеизвлечения // Биотехнология: состояние и перспективы развития: материалы Международ. форума. Т. 18. М.: ООО «Экспобιοхим-технологии», 2020. С. 365–367.

19. Кульминская А. А. О потенциале микробных систем и ферментов для возобновляемой промышленной биотехнологии // Сб. тр. Курчатова. геном. форума. Т. 17. М.: ФГБУ «Нац. исслед. центр «Курчатовский институт», 2023. С. 90–91.

20. Евдокимов Н. С., Смышляева А. А. Внедрение биотехнологических методов переработки попутного нефтяного газа // Безопасность городской среды: материалы VIII Международ. науч.-практ. конф. Омск: ОГТУ, 2021. С. 3–8.

References

1. Markova V. M., Churashev V. N. Jevoljucija prognozov razvitija mirovoj i rossijskoj jenergetiki: sposob otveta na jekonomicheskie vyzovy [The evolution of forecasts for the development of global and Russian energy: a way to respond to economic challenges]. *Mir jekonomiki i upravlenija*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 108-138.

2. Bachmann R. T., Johnson A. C., Edyvean R. G. J. Biotechnology in the petroleum industry: an overview. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2014, vol. 86, pp. 225-237.

3. Podymov E. D., Slesareva V. V., Rafikova K. R. Obzor predstavlenij o klassifikacii metodov uvelichenija nefteizvlechenija [An overview of the concepts of classification of methods for increasing oil recovery]. *Sbornik nauchnyh trudov TatNI-Plneft'. N. LXXVIII*. Moscow, Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut organizacii, upravlenija i jekonomiki neftegazovoj promyshlennosti, 2010. Pp. 150-160.

4. Shkol'naja A. V. *Vlijanie metodov povyshenija nefteotdachi na fiziko-himicheskij sostav plastovyh fljuidov v processe razrabotki nefjanyh mestorozhdenij: vypusknaja kvalifikacionnaja rabota bakalavra* [The influence of enhanced oil recovery methods on the physico-chemical composition of reservoir fluids in the process of oil field development: Bachelor's graduation thesis]. Tomsk, 2023. Available at: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/76267> (accessed: 01.09.2024).

5. Demler Ju. A. *Vlijanie nizkochastotnogo ul'trazvukovogo vozdeystvija na reologicheskie parametry fljuida neftegazokondensatnogo mestorozhdenija: vypusknaja kvalifikacionnaja rabota bakalavra* [The effect of low-frequency ultrasonic exposure on the rheological parameters of the fluid of an oil and gas condensate field: bachelor's graduation the-

sis]. Krasnojarsk, SFU, 2021. Available at: <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/144140> (accessed: 01.09.2024).

6. Gataullin R. N. Sostojanie razrabotki mestorozhdenij tjazheloj nefi i prirodnyh bitumov [The state of development of heavy oil and natural bitumen deposits]. *Vestnik tehničeskogo universiteta*, 2018, vol. 21, no. 10, pp. 71-82.

7. Antoniadi D. G. i dr. Analiz sushhestvujushhijh metodov bor'by s asfaltosmoloparafinovymi otlozhenijami (ASPO) pri dobyche nefi [Analysis of existing methods of combating asphalt-resin-paraffin deposits (ASF) in oil production]. *Stroitel'stvo nefjanyh i gazovyh skvazhin na sushe i na more*, 2011, no. 9, pp. 32-37.

8. Bogdanov M. A., Hajrullina L. B. Povyshenie urovnja jekologicheskoj bezopasnosti pri ispol'zovanii biotehnologij dlja snizhenija vjazkosti nefi [Increasing the level of environmental safety when using biotechnologies to reduce the viscosity of oil]. *Perspektivnye tehnologii i materialy: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii. Sevastopol'*, SGU, 2021. Pp. 257-261.

9. Malhasjan K. A., Popov D. V., Bulatov V. R. Povyshenie nefteotdachi plastov pri ispol'zovanii polimerov [Enhanced oil recovery when using polymers]. *Problemy geologii i osvoenija neдр: trudy XXV Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M. A. Usova studentov i molodyh uchjonyh, posvjashhennogo 120-letiju gornogeologičeskogo obrazovanija v Sibiri, 125-letiju so dnja osnovanija Tomskogo politehničeskogo universiteta*. Tomsk, Izd-vo TPU, 2021, vol. 2. Pp. 90-92.

10. Nazarov V., Krasnov O., Medvedeva L. Arkticheskij neftegazonosnyj shelf Rossii na jetape smeny mirovogo jenergetičeskogo bazisa [Russia's Arctic oil and gas shelf at the stage of changing the global energy base]. *Jenergetič-*

eskaja politika, 2021. Available at: <https://energypolicy.ru/arkticheskij-neftegazonosnyj-shelf-rossii-na-etape-smeny-mirovogo-energeticheskogo-bazisa/regiony/2021/09/15/> (accessed: 01.09.2024).

11. Galushko M. V., Dan'shina A. P. Slancevaja neft' v strukture sovremennogo toplivno-jenergeticheskogo kompleksa: polozhenie, problemy, perspektivy razvitiya [Shale oil in the structure of the modern fuel and energy complex: situation, problems, development prospects]. *Obshhestvo, obrazovanie, nauka v sovremennykh paradigmatykh razvitiya: sbornik trudov po materialam III Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Kerch, KGMTU, 2022. Pp. 128-134.

12. Rjashhina A. D., Leont'eva S. V. Analiz sovremennykh metodov obezvrezhivaniya nefteshlamov [Analysis of modern methods of oil sludge disposal]. *Evrazijskij sojuz uchenyh*, 2020, no. 11-7 (80), pp. 59-66.

13. Evans G. M., Furlong J. C. *Environmental biotechnology: theory and application*. John Wiley & Sons, 2003. 300 p.

14. Debabov V. G. Biotehnologija – shans dlja Rossii [Biotechnology is a chance for Russia]. *Innovacii*, 2014, no. 3 (185), pp. 3-5.

15. Kajyrmanova G. K. i dr. Priemy konservacii perspektivnyh v neftjanoy promyshlennosti bakterij dlja sohraneniya biologicheskikh svojstv [Conservation techniques for promising bacteria in the oil industry to preserve biological properties]. *Vestnik neftegazovoj otrasli Kazahstana*, 2024, vol. 6, no. 1, pp. 110-119.

16. Obuhova P. V. *Metody bor'by s bakterial'noj korroziej dlja uslovij neftegazodobychi v uslovijah Vankorskogo neftjanogo mestorozhdenija: magisterskaja dissertacija* [Methods

of combating bacterial corrosion for oil and gas production conditions in the conditions of the Vankor oil field: master's thesis]. Krasnojarsk, SFU, 2017. Available at: <https://elibr.sfu-kras.ru/handle/2311/65716> (accessed: 01.09.2024).

17. Jakupov I. R. i dr. Ocenka vozmozhnosti ispol'zovaniya processov vnutriplastovoj konversii pri osvoenii tjazhelyh vysokovjazkih neftej [Assessment of the possibility of using intra-reservoir conversion processes in the development of heavy high-viscosity oils]. *Vestnik tehnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 19, pp. 35-39.

18. Sokolova D. Sh. i dr. Mikrobnoe raznoobrazie v mestorozhdenijah tjazheloj nefti kak osnova dlja sozdaniya biotehnologij uvelichenija nefteizvlechenija [Microbial diversity in heavy oil deposits as a basis for the creation of biotechnologies to increase oil recovery]. *Biotehnologija: sostojanie i perspektivy razvitiya: materialy Mezhdunarodnogo foruma*, vol. 18. Moscow, OOO «Jekspo-biohim-tehnologii», 2020. Pp. 365-367.

19. Kul'minskaja A. A. O potenciale mikrobnih sistem i fermentov dlja vozobnovljaemoj promyshlennoj biotehnologii [On the potential of microbial systems and enzymes for renewable industrial biotechnology]. *Sbornik trudov Kurchatovskogo genomnogo foruma, vol. 17*. Moscow, FGBU «Nacional'nyj issledovatel'skij centr «Kurchatovskij institut», 2023. Pp. 90-91.

20. Evdokimov N. S., Smyshljaeva A. A. Vnedrenie biotehnologicheskikh metodov pererabotki poputnogo neftjanogo gaza [Introduction of biotechnological methods for processing associated petroleum gas]. *Bezopasnost' gorodskoj sredy: materialy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Omsk, OGTU, 2021. Pp. 3-8.

Статья поступила в редакцию 18.09.2024; одобрена после рецензирования 14.10.2024; принята к публикации 31.10.2024
The article was submitted 18.09.2024; approved after reviewing 14.10.2024; accepted for publication 31.10.2024

Информация об авторах / Information about the authors

Альберт Хамед-Харисович Нугманов – доктор технических наук, профессор; профессор кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; albert909@yandex.ru

Олег Александрович Петровичев – кандидат технических наук; доцент кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; ott@astu.org

Надежда Андреевна Агапорова – магистрант кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; agaponova_na@mail.ru

Сергей Юрьевич Болгов – магистрант кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; fila9488@mail.ru

Albert Kh.-Kh. Nugmanov – Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; albert909@yandex.ru

Oleg A. Petrovichev – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; ott@astu.org

Nadezhda A. Agaponova – Master's Course Student of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; agaponova_na@mail.ru

Sergei Yu. Bolgov – Master's Course Student of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; fila9488@mail.ru

Наталья Николаевна Обуховская – магистрант кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; Obuhovskaya.nat@mail.ru

Natalya N. Obukhovskaya – Master’s Course Student of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; Obuhovskaya.nat@mail.ru

Денис Владимирович Путилин – магистрант кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; denisputilin37@gmail.com

Denis V. Putilin – Master’s Course Student of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; denisputilin37@gmail.com

