

УДК 553.982.2

## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СНИЖЕНИЯ ВЯЗКОСТИ ТЯЖЕЛОЙ НЕФТИ: МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ, ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ

О. А. МИНГАТИНА<sup>1, 2</sup>, А. В. НАСЫБУЛЛИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Высшая школа нефти, г. Альметьевск, Российская Федерация*

<sup>2</sup>*Центр моделирования Институт «ТатНИПИнефть»  
ПАО «Татнефть» имени В. Д. Шашина, г. Альметьевск, Российская Федерация*

**Аннотация.** Рассмотрены современные методы снижения вязкости тяжелой и сверхвязкой нефти, направленные на повышение эффективности ее добычи. Особое внимание уделено микробиологическому воздействию (MEOR), ультразвуковой и магнитной обработке, а также применению сверхкритического диоксида углерода в качестве физико-химического агента. Проведен сравнительный анализ указанных технологий по критериям технической эффективности, экономической целесообразности, эксплуатационной сложности и экологической безопасности.

Работа демонстрирует перспективность гибридных решений, сочетающих физико-химические и биотехнологические методы. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании технологических схем разработки трудноизвлекаемых нефтяных залежей. Обсуждается возможность адаптации таких методов к различным геолого-физическим условиям и составам нефти. Представленные выводы могут служить основой для проектирования интегрированных схем разработки и реализации пилотных проектов в трудноизвлекаемых залежах высоковязкой нефти.

**Ключевые слова:** сверхвязкая нефть, MEOR, биосурфактанты, ультразвук, магнитная обработка, сверхкритический CO<sub>2</sub>, снижение вязкости, нефтеотдача.

**Для цитирования.** Мингатина, О. А. Инновационные технологии снижения вязкости тяжелой нефти: микробиологические, физические и химические подходы / О. А. Мингатина, А. В. Насыбуллин // Нефтегазовый инжиниринг. – 2025. – № 2 (3). – С. 17–28.

## INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR REDUCING THE VISCOSITY OF HEAVY OIL: MICROBIOLOGICAL, PHYSICAL AND CHEMICAL APPROACHES

O. A. MINGATINA<sup>1, 2</sup>, A. V. NASYBULLIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Higher School of Petroleum, Almeteyevsk, the Russian Federation*

<sup>2</sup>*Modeling Center TatNIPIneft Institute  
of PJSC Tatneft named after V. D. Shashin, Almeteyevsk, the Russian Federation*

**Annotation.** Modern methods of reducing the viscosity of heavy and extra-viscous oil, aimed at improving the efficiency of its production, are considered. Special attention is paid to microbiological effects (MEOR), ultrasonic and magnetic treatment, as well as the use of supercritical carbon dioxide as a physico-chemical agent. A comparative analysis of these technologies was carried out according to the criteria of technical efficiency, economic feasibility, operational complexity and environmental safety.

This work demonstrates the promise of hybrid solutions combining physico-chemical and biotechnological methods. The results obtained can be used in the design of technological schemes for the development of hard-to-recover oil deposits. The possibility of adapting such methods to various geological and physical conditions and oil compositions is discussed. The presented conclusions can serve as a basis for designing integrated schemes for the development and implementation of pilot projects in hard-to-recover high-viscosity oil deposits.

**Keywords:** ultra-viscous oil, MEOR, biosurfactants, ultrasound, magnetic treatment, supercritical CO<sub>2</sub>, viscosity reduction, oil recovery.

**For citation.** Mingatina O. A., Nasybullin A. V. Innovative technologies for reducing the viscosity of heavy oil: microbiological, physical and chemical approaches. *Oil and gas engineering*, 2025, no. 2 (3), pp. 17–28 (in Russian).

**Введение.** Современная нефтяная промышленность сталкивается с постепенным истощением традиционных месторождений легкой нефти и необходимостью вовлечения в разработку трудноизвлекаемых запасов, в частности, тяжелых и сверхвязких нефтей. Данный вид сырья рассматривается как перспективный источник восполнения энергетического дефицита и расширения ресурсной базы топливно-энергетического комплекса. Однако такие ресурсы обладают высокой плотностью, вязкостью и содержанием смолисто-асфальтеновых соединений, что существенно затрудняет процессы добычи.

Разработка месторождений сверхвязкой нефти становится стратегически важным направлением в условиях истощения запасов легких углеводородов. Высокая плотность, вязкость и содержание смолисто-асфальтеновых компонентов в сверхвязкой нефти значительно осложняют процессы ее извлечения, транспорта и переработки.

Проблема повышения эффективности извлечения тяжелой и сверхвязкой нефти активно рассматривается в работах отечественных и зарубежных исследователей. В ряде источников отмечается, что традиционные термические методы (паротепловое воздействие, нагрев) обладают ограниченной эффективностью и требуют высокой энергоемкости [19, 20].

В связи с этим возрастает интерес к инновационным подходам, в том числе микробиологическим (MEOR), использующим продукцию метаболизма микроорганизмов для снижения межфазного натяжения и вязкости нефти [1–4, 21–24]. Ультразвуковая и магнитная обработка оказывают разрушительное влияние на асфальтеновые кластеры и улучшают фильтрационно-реологические свойства [5–13, 26]. Особое внимание уделяется применению сверхкритического CO<sub>2</sub>, который способен растворяться в нефтяной фазе, снижая вязкость и улучшая текучесть нефти [14–18, 25]. Данные технологии демонстрируют перспективы для широкого применения в условиях высоковязких нефтей.

Многие авторы подчеркивают важность комплексного подхода и интеграции физических и химических методов воздействия, что особенно актуально для трудноизвлекаемых запасов в условиях высокой вязкости и низкой проницаемости [20, 22].

**Цель работы.** Разработка и анализ современных технологий снижения вязкости сверхвязкой нефти с оценкой их эффективности, экологичности и применимости в различных условиях.

Для выполнения поставленной цели в статье решаются следующие задачи:

1. Проанализированы современные подходы к снижению вязкости сверхвязкой нефти.
2. Рассмотрены механизмы действия микробиологических, физических и физико-химических методов.
3. Проведено сравнение технологий по критериям эффективности, экологичности и энергетических затрат.
4. Определены условия применимости и целесообразность интеграции различных методов.

В работе дано обобщение, сравнение и оценка эффективности современных методов снижения вязкости с акцентом на их научную обоснованность и промышленную применимость, что позволяет выявить закономерности влияния различных физических факторов на структуру и реологические свойства тяжелых нефтей. Выводы

статьи могут быть использованы при проектировании систем повышения эффективности добычи разработки залежей тяжелой нефти.

К числу наиболее перспективных направлений относятся микробиологические методы повышения нефтеотдачи (МЕОР), магнитная и ультразвуковая обработка, а также метод с использованием сверхкритического  $\text{CO}_2$ , каждый из которых обладает своими преимуществами и технологическими особенностями.

#### Методы снижения вязкости

**МЕОР.** Одним из наиболее перспективных и экологически ориентированных методов снижения вязкости сверхвязкой нефти является микробиологическое повышение нефтеотдачи пластов (МЕОР – Microbial Enhanced Oil Recovery). Суть данного подхода заключается в использовании нефтяного пласта в качестве естественного биореактора, в который вводятся специально подобранные штаммы микроорганизмов, способные продуцировать поверхностно-активные вещества (биосурфактанты) [1]. Для обеспечения жизнедеятельности микробов одновременно подаются субстраты и питательные растворы, способствующие их активному росту, размножению и метаболической активности. В процессе жизнедеятельности микроорганизмов образуются биохимически активные соединения, в том числе биосурфактанты, которые способствуют разрушению асфальтеново-смолистых агрегатов, снижению вязкости нефти и улучшению фильтрационно-емкостных свойств пласта. Как следствие, повышается подвижность углеводородов в поровом пространстве и значительно увеличивается нефтеотдача пласта [2].

На рис. 1 представлена последовательность микробиологического воздействия (МЕОР) в пористой среде коллектора. Введение питательных веществ и микроорганизмов способствует активизации биохимических процессов, в результате которых микроорганизмы продуцируют поверхностно-активные вещества (биосурфактанты). Эти соединения снижают межфазное натяжение между нефтью и поровой водой, способствуя мобилизации и вытеснению нефти из пористой среды. Такой механизм позволяет повысить нефтеотдачу залежей сверхвязкой нефти без применения энергоёмких и экологически опасных методов.

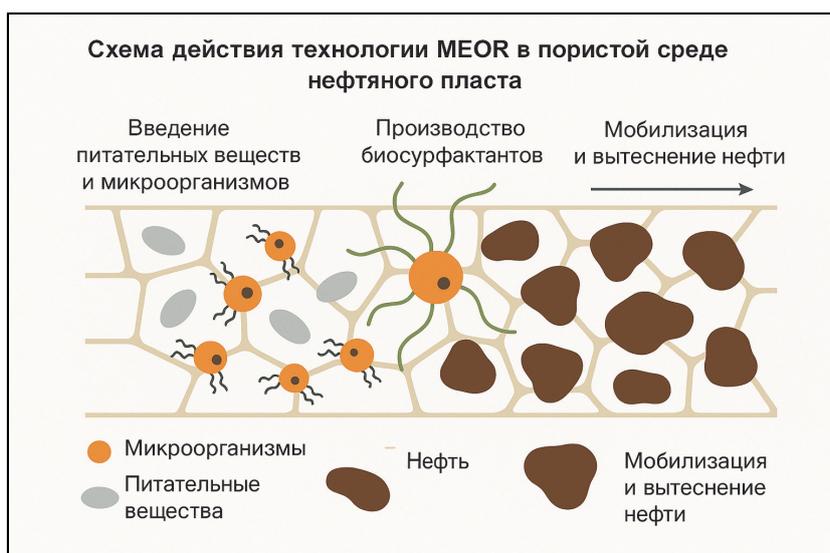


Рис. 1. Схема действия технологии МЕОР в пористой среде нефтяного пласта

Fig. 1. Mechanism of MEOR technology in a porous oil reservoir

По данным исследований, эффективность нефтевытеснения при использовании биосурфактантов в 3,5–8 раз превышает эффективность синтетических поверхностно-активных веществ, при этом затраты на производство значительно ниже, а риск вторичного загрязнения отсутствует [3]. Эти факторы делают технологию MEOR особенно привлекательной для промышленного применения в экологически чувствительных регионах и на зрелых месторождениях.

Тем не менее технология MEOR имеет и свои ограничения. Основным сдерживающим фактором является нестабильность микробиологических культур: экстремальные термобарические и химические условия в нефтяных пластах могут вызывать гибель микроорганизмов или блокировать их способность к продуцированию биосурфактантов [4]. Это требует разработки устойчивых штаммов, адаптированных к специфике конкретного месторождения, включая адаптацию к условиям, а также регуляции метаболической активности микроорганизмов. В табл. 1 приведены примеры успешного применения MEOR в разных странах.

Таблица 1. Примеры успешного применения технологии MEOR в разных странах

Table 1. Examples of successful MEOR applications in different countries

Страна	Месторождение	Используемые микроорганизмы	Результаты применения
Индия	Бассейн реки Ганг	<i>Bacillus subtilis</i>	Увеличение добычи на > 25 %, снижение вязкости
США (Техас)	Месторождения тяжелой нефти	Анаэробные бактерии	Рост нефтеотдачи до 30 %, снижение энергозатрат
Китай	Даганг	Местные штаммы, продуценты биосурфактантов	Повышение суточной добычи на 12–18 %
Россия	Татарстан	Отечественные аэробные и анаэробные штаммы	Снижение обводненности, рост нефтеотдачи

**Ультразвуковая технология снижения вязкости нефти.** Одним из инновационных физических методов интенсификации добычи тяжелой и сверхвязкой нефти является применение ультразвукового воздействия.

Ультразвуковая обработка представляет собой современный физический метод снижения вязкости тяжелой нефти, основанный на эффекте кавитации и локального теплового воздействия. Принцип действия технологии заключается в разрушении высокомолекулярных структур – смол и асфальтенов – под воздействием ультразвуковых волн, что приводит к улучшению реологических свойств и повышению текучести сырья.

Ультразвуковое воздействие сочетает в себе как термические, так и нетепловые эффекты:

- *Термический эффект* заключается в неравномерном нагреве нефти на молекулярном уровне. В результате микроволнового воздействия температура отдельных молекул асфальтенов может превышать температуру их пиролиза, что приводит к локальному перегреву и термическому крекингу глиальных асфальтенов. Это способствует разрушению высокомолекулярных агрегатов и улучшает текучесть нефти.

- *Нетепловой эффект* связан с кавитацией – образованием и схлопыванием микропузырьков в жидкости. Эти процессы сопровождаются генерацией высокоскоростных микроструй и ударных волн, которые способствуют деструкции макромолекул асфальтенов и разрыву межмолекулярных связей.

В результате вязкость нефти снижается даже при относительно низкой температуре окружающей среды. В табл. 2 приведены результаты применения технологии для снижения вязкости нефти в разных странах.

Таблица 2. Эффективность ультразвуковой обработки

Table 2. Effectiveness of Ultrasonic Stimulation

Страна	Объект	Результат применения
Канада	Месторождения Альберты	Снижение вязкости на 30–50 % после обработки ультразвуком
Китай	Синьцзян	Повышение текучести и рост нефтеотдачи на 15–20 %
Россия	Месторождения Татарстана	Лабораторные испытания с последующим масштабированием

**Пример лабораторных исследований.** Чжаоин Ли и соавторы [5] провели серию лабораторных экспериментов по снижению вязкости обезвоженной нефти, добытой в мелководной зоне месторождения Шэнли (Китай). В ходе исследований варьировались интенсивность, частота и продолжительность ультразвукового воздействия. На основе ортогонального планирования были определены оптимальные параметры, при которых достигалось снижение вязкости до 70,6 %, что демонстрирует высокий потенциал данного метода.

Дополнительно, в работах Liu и других авторов [6] сообщается об уменьшении вязкости нефти с высоким содержанием асфальтенов на 60 % при ультразвуковом воздействии мощностью 50 Вт. Zhang и другие [7] продемонстрировали улучшение текучести нефти в призабойной зоне скважин, а в исследованиях Huang и других ученых [8] комбинированное применение ультразвука и микробиологических агентов позволило повысить нефтеотдачу на 25–30 %.

Поглощенная ультразвуковая энергия в процессе обработки трансформируется в тепло, вызывая локальный перегрев и термический крекинг молекул асфальтенов. Это приводит к необратимому изменению химического состава тяжелой нефти и значительному улучшению ее текучести. Метод характеризуется высокой скоростью воздействия, отсутствием химического загрязнения и хорошей экологической приемлемостью.

На графике (рис. 2) представлено сравнение вязкости нефти до и после ультразвуковой обработки по разным странам и исследованиям. Он наглядно показывает эффективность метода, особенно заметно снижение в исследовании Чжаомина Ли (до 29,4 % от начальной вязкости).

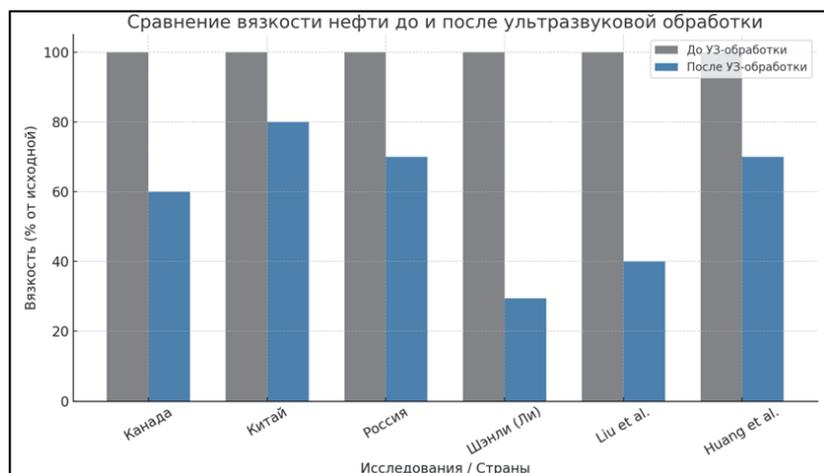


Рис. 2. Сравнение вязкости нефти до и после ультразвуковой обработки

Fig. 2. Comparison of Crude Oil Viscosity Before and After Ultrasonic Treatment

Однако технология имеет и ряд ограничений. Потенциальная биологическая опасность ультразвукового излучения требует применения специальных мер защиты. Кроме того, высокая энергоёмкость и стоимость оборудования снижают ее экономическую эффективность при масштабной эксплуатации. В настоящее время ультразвуковое снижение вязкости целесообразно применять в условиях ограниченного объема добычи, например, в рамках пилотных проектов или локальных применений в составе комбинированных методов повышения нефтеотдачи.

**Технология снижения вязкости магнитной обработкой.** Магнитная обработка является развивающимся направлением в области повышения подвижности тяжелых и сверхвязких нефтей. Принцип действия основан на влиянии магнитного поля на молекулярную структуру нефти, в частности, на парафиновые и асфальтеново-смолистые соединения. В результате воздействия магнитного поля происходит разрушение ассоциатов и изменение агрегационного состояния молекул, что приводит к снижению вязкости и улучшению текучести нефти.

Особое внимание к данному методу обусловлено его безреагентным характером и отсутствием вторичного загрязнения. Воздействие магнитного поля позволяет нарушать процессы кристаллизации и коагуляции восков, а также снижать силу межмолекулярных взаимодействий в системе «смолы – асфальтены», что приводит к диспергированию высокомолекулярных компонентов и уменьшению структурной вязкости [9, 10].

Практический пример успешного применения технологии был продемонстрирован при разработке месторождений Ляохэ (Китай), где нефтеносные пласты характеризуются высокой вязкостью нефти и повышенной температурой застывания. В результате применения магнитной обработки удалось снизить температуру застывания на 6–22 °С, а степень снижения вязкости достигла 30–60 % [13]. Эти результаты подтверждают целесообразность включения магнитной обработки в комплекс методов разработки трудноизвлекаемых запасов.

Несмотря на целый ряд преимуществ, таких как экологичность, оперативность и высокая технологическая гибкость, технология магнитной обработки обладает определенными ограничениями. Наибольшую эффективность она демонстрирует при обработке тяжелой нефти со средним содержанием смолисто-асфальтеновых компонентов. Однако при высоком содержании асфальтенов и смол, характерном для сверхтяжелой нефти, эффект снижения вязкости оказывается менее выраженным [11, 12].

Кроме того, исследования показывают, что эффект от магнитного воздействия носит временный характер. По данным экспериментальных наблюдений, максимальное снижение вязкости достигается в течение первых четырех часов после обработки, после чего свойства нефти постепенно возвращаются к исходным значениям. Это обусловлено обратимостью молекулярных изменений и недостаточной стабильностью намагниченного состояния углеводородной системы [14].

На рис. 3 показана динамика изменения вязкости нефти во времени после магнитной обработки. График наглядно демонстрирует, что максимальный эффект достигается в первые 2–3 часа, после чего вязкость начинает постепенно возвращаться к исходному уровню. Это подтверждает временный характер действия технологии и подчеркивает необходимость ее сочетания с другими методами или повторной активацией.

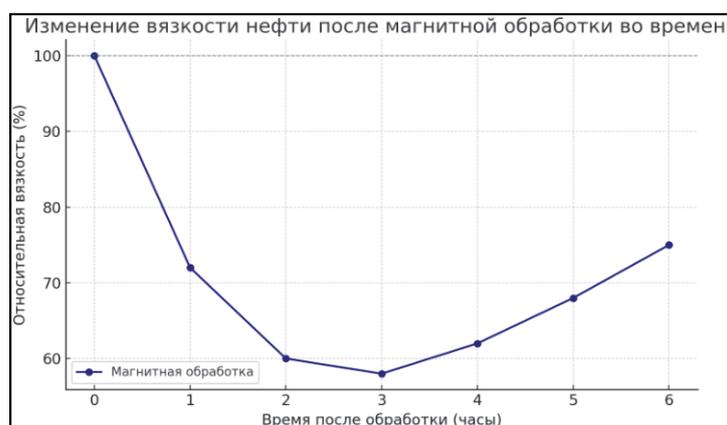


Рис. 3. График изменения вязкости нефти после магнитной обработки

Fig. 3. Graphical analysis of Crude Oil Viscosity Dynamics Following Magnetic Field Exposure

Указанные особенности ограничивают применение технологии в задачах долговременной стабилизации реологических свойств нефти и требуют дальнейших исследований по повышению устойчивости эффекта.

**Снижение вязкости нефти с использованием сверхкритического диоксида углерода (CO<sub>2</sub>).** Одним из перспективных направлений в области разработки трудноизвлекаемых запасов нефти является применение сверхкритического диоксида углерода (scCO<sub>2</sub>). Эта технология получила активное развитие в последние годы и успешно используется в ряде проектов по добыче и транспортировке тяжелой нефти [15, 18].

Сверхкритическое состояние CO<sub>2</sub> достигается при температуре выше 31,1 °C и давлении выше 7,38 МПа. В этом состоянии вещество приобретает уникальные свойства, совмещая газообразную подвижность и проникающую способность с плотностью, близкой к жидкой фазе. Такая комбинация делает scCO<sub>2</sub> эффективным агентом для воздействия на вязкие нефтяные системы [16, 19].

Механизм действия данной технологии представлен на рис. 4. Метод основан на способности сверхкритического CO<sub>2</sub> проникать в структуру сырой нефти и снижать межмолекулярные взаимодействия между компонентами тяжелой нефти, в первую очередь, – асфальтенами и смолами. При растворении CO<sub>2</sub> в нефти происходит частичный разрыв молекулярных связей, изменение агрегатного состояния и дестабилизация ассоциатов асфальтенов, что приводит к значительному снижению вязкости и плотности нефти [17, 18].

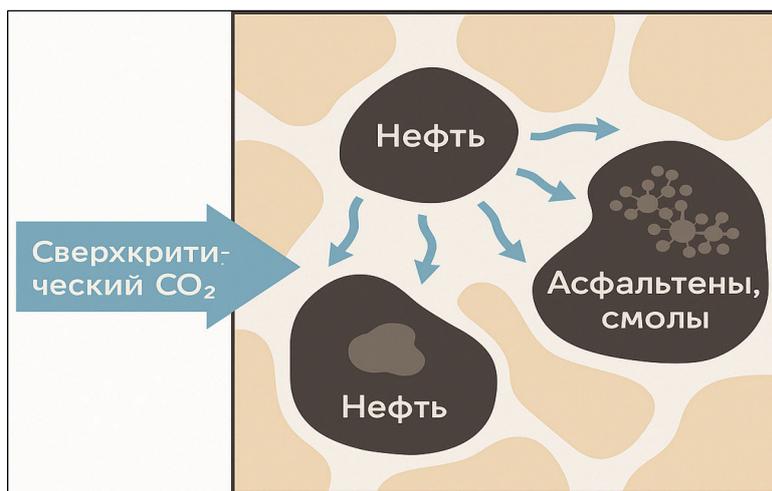


Рис. 4. Механизм взаимодействия сверхкритического  $\text{CO}_2$  с нефтью

Fig. 4. Mechanistic analysis of the interaction between supercritical carbon dioxide and crude oil

Экспериментальные данные и промышленные испытания показывают, что применение  $\text{scCO}_2$  может снизить вязкость тяжелой нефти на 35–60 %, улучшая ее текучесть и повышая эффективность извлечения [19]. Кроме того, технология может быть совмещена с другими методами, включая тепловые или микробиологические, что открывает перспективы комплексной интенсификации добычи.

Преимущества технологии:

- высокая эффективность снижения вязкости;
- возможность повторного закачивания  $\text{CO}_2$ ;
- экологичность при замкнутом цикле циркуляции газа;
- потенциал для хранения  $\text{CO}_2$  в пластах как способ снижения выбросов парниковых газов (CCUS) [15].

Тем не менее при промышленном применении необходимо учитывать технические ограничения, связанные с поддержанием сверхкритических параметров, а также оценивать экономическую целесообразность в зависимости от геологических условий месторождений [16].

**Результаты и их обсуждение.** В ходе работы был проведен сравнительный анализ различных технологий снижения вязкости тяжелой нефти, включая микробиологический метод (MEOR), ультразвуковую и магнитную активацию, а также применение сверхкритического  $\text{CO}_2$ .

Результаты экспериментов свидетельствуют о разной степени эффективности рассмотренных подходов. Наиболее высокую степень снижения вязкости (до 80 %) показала термическая обработка, однако ее высокая энергоемкость и экологическая нагрузка делают метод менее предпочтительным в современных условиях.

Микробиологический метод демонстрирует устойчивую эффективность в диапазоне 30–60 % снижения вязкости, при этом характеризуется низкой стоимостью и экологичностью. Рисунок 1 иллюстрирует принцип действия метода MEOR в пористой среде нефтяного пласта.

Ультразвуковая технология позволяет достичь быстрого результата (до 70 % снижения вязкости), что подтверждено результатами лабораторных испытаний (рис. 2). Однако ограничения по масштабированию и высокая стоимость оборудования сдерживают ее промышленное внедрение.

Магнитная обработка демонстрирует нестабильные, но обнадеживающие результаты при минимальных энергозатратах. Применение сверхкритического CO<sub>2</sub> позволяет достигать значительного эффекта (до 65 %), особенно в сочетании с другими методами.

Сравнительная эффективность методов представлена в табл. 3. Каждая технология характеризуется уникальным механизмом воздействия на структуру нефти, а также различными показателями применимости, что определяет целесообразность ее использования в конкретных геолого-промысловых условиях.

Таблица 3. Сравнительная эффективность методов

Table 3. Comparative Evaluation of Enhanced Oil Recovery Techniques

Метод	Принцип	Эффективность снижения вязкости	Экологичность	Экономика	Ограничения
1. MEOR	Биоповерхностно-активные вещества	30–60 %	Высокая	Низкая–средняя	Чувствительность к условиям пласта
2. Ультразвук	Кавитация, крекинг	До 70 %	Средняя	Низкая	Локальное применение, высокая энергия
3. Магнитная обработка	Деструкция асфальтенов	20–35 %	Высокая	Средняя	Кратковременный эффект
4. Сверхкритический CO <sub>2</sub>	Растворение в нефти	До 50 %	Средняя	Высокая	Давление/температура, стоимость CO <sub>2</sub>

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Проведенный анализ и обобщение существующих технологий снижения вязкости сверхвязкой нефти показали, что ни одна из методик не обеспечивает универсального решения задачи добычи тяжелой нефти.

2. Микробиологический метод (MEOR) является экологически безопасной и экономически эффективной технологией, однако его применение ограничено условиями жизнедеятельности микроорганизмов в пластовой среде.

3. Ультразвуковая технология демонстрирует высокую эффективность при локальном воздействии, но требует дальнейших исследований по расширению зоны проникновения.

4. Магнитная и сверхкритическая CO<sub>2</sub>-обработка обладают значительным потенциалом, однако находятся на этапе экспериментальной апробации и требуют оптимизации параметров применения.

5. Наиболее перспективным направлением является комбинированное применение нескольких методов, что позволяет повысить технологическую гибкость, снизить энергозатраты и увеличить общую нефтеотдачу пластов.

**Заключение.** Снижение вязкости сверхвязкой нефти остается приоритетной задачей для современной нефтедобывающей отрасли. Несмотря на успехи в разработке отдельных технологий, каждое решение имеет определенные ограничения, связанные с экономикой, экологией или технической реализуемостью.

На основании вышеизложенного дальнейшее развитие данной области должно быть направлено на создание гибридных, энергоэффективных и экологически безопасных технологических комплексов, обеспечивающих стабильную добычу трудно-извлекаемых ресурсов.

Проведенный анализ подчеркивает стратегическую важность междисциплинарного подхода и необходимость перехода к интеграционным решениям, объединяющим достижения микробиологии, физики, химии и инженерии для повышения эффективности освоения ресурсов тяжелой и сверхвязкой нефти.

### Литература

1. Theory and practice in microbial enhanced oil recovery / K. S. Lee, T. H. Kwon, T. Park, M. S. Jeong. – Houston : Gulf Professional Publishing, 2020. – 195 p.
2. Alkan H. Front-end engineering practice of in-situ MEOR applications / H. Alkan, S. Mukherjee, W. Jelinek // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 216. – P. 110407.
3. Comparison of bio- and synthetic surfactants for EOR / L. Torres, A. Moctezuma, J. R. Avendaño [et al.] // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2011. – Vol. 76, iss. 1–2. – P. 6–11.
4. Das, A. Microbial enhanced oil recovery: process perspectives, challenges, and advanced technologies for its efficient applications and feasibility / A. Das, N. Das, P. Pandey // *Archives of Microbiology*. – 2025. – Т. 20, N 5. – P. 1–43.
5. Iwogbemi, A. O. Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR): Innovations in Sustainable Oil Extraction / A. O. Iwogbemi // *International Journal of Petroleum and Gas Engineering Research*. – 2025. – N 8 (1). – P. 1–12.
6. Liu, Y. Ultrasonic treatment of high-asphaltene-content heavy crude oil / Y. Liu, Q. Zhang, L. Wang // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 157. – P. 353–361. – DOI 10.1016/j.petrol.2017.06.036
7. Zhang, X. Enhancing heavy oil recovery using ultrasound in near-wellbore zones / X. Zhang, S. Li, J. Chen // *Fuel*. – 2018. – Vol. 215. – P. 722–730. – DOI 10.1016/j.fuel.2017.11.081
8. Huang, T. Combined ultrasonic and microbial enhanced oil recovery technique: Laboratory study / T. Huang, D. Zhao, L. Zhang // *Energy & Fuels*. – 2019. – Vol. 33, N 5. – P. 4023–4030. – DOI 10.1021/acs.energyfuels.8b04388
9. Киселев, С. А. Исследование влияния магнитного поля на реологические свойства высоко-вязкой нефти / С. А. Киселев, И. В. Титова // *Нефтегазовое дело*. – 2016. – № 4. – С. 45–51.
10. Дергачев, А. А. Повышение нефтеотдачи пластов с использованием магнитной обработки / А. А. Дергачев, В. А. Савин // *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. – 2019. – № 2. – С. 81–88.
11. Трушко, Е. Н. Воздействие электромагнитного поля на физико-химические свойства нефти / Е. Н. Трушко, Н. И. Яшина // *Нефтяное хозяйство*. – 2014. – № 2. – С. 72–74.
12. Фоменко, А. А. Эффективность воздействия магнитного поля на тяжелую нефть и нефтепродукты / А. А. Фоменко // *Химия и технология топлив и масел*. – 2020. – № 1. – С. 33–39.
13. Sun, H. Experimental study on the magnetic field treatment for heavy oil viscosity reduction / H. Sun, W. Li, Y. Zhang // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018. – Т. 167. – С. 470–476.
14. Агеев, А. А. Использование сверхкритического CO<sub>2</sub> в технологиях интенсификации нефтедобычи / А. А. Агеев // *Нефтегазовое дело*. – 2020. – № 6. – С. 45–52.
15. Голубев, И. И. Применение сверхкритических флюидов для переработки тяжелой нефти / И. И. Голубев, В. П. Соловьев – М. : Недра, 2019. – 312 с.
16. Павлова, Т. С. Влияние CO<sub>2</sub> на физико-химические свойства асфальтенов тяжелой нефти / Т. С. Павлова // *Химическая технология топлива и масел* / 2021. – № 3. – С. 18–24.

17. Wang L. Experimental Study on the Viscosity Reduction Mechanism of Supercritical CO<sub>2</sub> on Heavy Crude Oil / L. Wang, H. Liu, Y. Feng // *Fuel*. – 2020. – Т. 262. – Р. 116537.
18. Калинина, И. В. Технологии повышения нефтеотдачи при разработке тяжелых нефтей / И. В. Калинина, Д. С. Костромин – М. : Недра, 2021. – 264 с.
19. Зайцева, Н. А. Физико-химические методы улучшения реологических свойств высоковязкой нефти / Н. А. Зайцева, А. И. Климов // *Химическая технология*. – 2022. – № 6. – С. 43–49.
20. Алимов, А. А. Поверхностно-активные вещества в нефтедобыче: проблемы и перспективы / А. А. Алимов, И. Е. Романов // *Вестник РГУ нефти и газа*. – 2021. – № 3. – С. 25–30.
21. Якубов, С. В. Биотехнологии в разработке месторождений тяжелых нефтей / С. В. Якубов, С. Н. Козлов. – М. : Недра, 2020. – 198 с.
22. Лисов, В. С. Повышение эффективности добычи сверхвязкой нефти методом MEOR / В. С. Лисов // *Химия и технология топлива и масел*. – 2019. – № 4. – С. 35–42.
23. Гладкий, П. И. Использование микробов-продуцентов биосурфактантов для снижения вязкости / П. И. Гладкий // *Биотехнология*. – 2020. – № 6. – С. 18–24.
24. Мусаев, М. Т. Применение CO<sub>2</sub> в добыче тяжелой нефти / М. Т. Мусаев, А. Р. Алиев // *Вестник нефтяной науки*. – 2020. – № 1. – С. 14–21.
25. Ермаков, П. И. Кавитационное разрушение асфальтенов в тяжелой нефти / П. И. Ермаков, В. М. Серов // *Нефтепереработка и нефтехимия*. – 2020. – № 6. – С. 44–50.

### References

1. Lee K. S., Kwon T. H., Park T., Jeong M. S. *Theory and practice in microbial enhanced oil recovery*. Houston, Gulf Professional Publishing Publ., 2020. 195 p.
2. Alkan H., Mukherjee S., Jelinek W. Front-end engineering practice of in-situ MEOR applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 216, P. 110407.
3. Torres L., Moctezuma A., Avendaño J. R., Muñoz A., Gracida J. Comparison of bio- and synthetic surfactants for EOR. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2011, vol. 76, iss. 1–2, pp. 6–11.
4. Das A., Das N., Pandey P. Microbial enhanced oil recovery: process perspectives, challenges, and advanced technologies for its efficient applications and feasibility. *Archives of Microbiology*, 2025, vol. 20, no. 5, pp. 1–43.
5. Iwogbemi A. O. Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR): Innovations in Sustainable Oil Extraction. *International Journal of Petroleum and Gas Engineering Research*, 2025, no. 8 (1), pp. 1–12.
6. Liu Y., Zhang Q., Wang L. Ultrasonic treatment of high-asphaltene-content heavy crude oil. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 157, pp. 353–361. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.06.036>
7. Zhang X., Li S., Chen J. Enhancing heavy oil recovery using ultrasound in near-wellbore zones. *Fuel*, 2018, vol. 215, pp. 722–730. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.081>
8. Huang T., Zhao D., Zhang L. Combined ultrasonic and microbial enhanced oil recovery technique: Laboratory study. *Energy & Fuels*, 2019, vol. 33 (5), pp. 4023–4030. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b04388>
9. Kiselev S. A., Titova I. V. Study of magnetic field influence on rheological properties of heavy oil. *Oil and Gas Business*, 2016, no. 4, pp. 45–51 (in Russian).
10. Dergachyov A. A., Savin V. A. Enhanced oil recovery using magnetic treatment. *Vestnik PNIPU. Geologija. Neftegazovoe i gornoe delo*, 2019, no. 2, pp. 81–88 (in Russian).
11. Trushko E. N., Yashina N. I. The impact of electromagnetic fields on the physical and chemical properties of oil. *Neftyanoe khozyaistvo*, 2014, no. 2, pp. 72–74 (in Russian).

12. Fomenko A. A. Effectiveness of magnetic field on heavy oil and petroleum products. *Himija i tehnologija topliv i masel*, 2020, no. 1, pp. 33–39 (in Russian).
13. Sun H., Li W., Zhang Y. Experimental study on magnetic field treatment for heavy oil viscosity reduction. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 167, pp. 470–476.
14. Ageev A. A. Use of supercritical CO<sub>2</sub> in oil production enhancement technologies. *Neftegazovoe delo*, 2020, no. 6, pp. 45–52 (in Russian).
15. Golubev I. I., Solovyov V. P. *Application of supercritical fluids for heavy oil refining*. Moscow, Nedra Publ., 2019. 312 p. (in Russian).
16. Pavlova T. S. The influence of CO<sub>2</sub> on the physicochemical properties of heavy oil asphaltenes. *Khimicheskaya tekhnologiya topliva i masel*, 2021, no. 3, pp. 18–24 (in Russian).
17. Wang L., Liu H., Feng Y. Experimental Study on the Viscosity Reduction Mechanism of Supercritical CO<sub>2</sub> on Heavy Crude Oil. *Fuel*, 2020, vol. 262, P. 116537.
18. Kalinina I. V., Kostromin D. S. *Enhanced oil recovery technologies for heavy oil production*. Moscow, Nedra Publ., 2021. 264 p. (in Russian).
19. Zaitseva N. A., Klimov A. I. Physicochemical methods for improving the rheological properties of high-viscosity oil. *Khimicheskaya tekhnologiya*, 2022, no. 6, pp. 43–49 (in Russian).
20. Alimov A. A., Romanov I. E. Surfactants in oil production: problems and prospects. *Bulletin of Gubkin Russian State University of Oil and Gas*, 2021, no. 3, pp. 25–30 (in Russian).
21. Yakubov S. V., Kozlov S. N. *Biotechnologies in the development of heavy oil fields*. Moscow, Nedra Publ., 2020. 198 p. (in Russian).
22. Lisov V. S. Efficiency improvement of ultra-viscous oil production using MEOR. *Khimiya i tekhnologiya topliva i masel*, 2019, no. 4, pp. 35–42 (in Russian).
23. Gladkiy P. I. Application of biosurfactant-producing microbes for viscosity reduction. *Biotechnology*, 2020, no. 6, pp. 18–24 (in Russian).
24. Musaev M. T., Aliev A. R. CO<sub>2</sub> application in heavy oil production. *Vestnik nefjtanoj nauki*, 2020, no. 1, pp. 14–21 (in Russian).
25. Ermakov P. I., Serov V. M. Cavitation breakdown of asphaltenes in heavy oil. *Neftepererabotka i neftehimija*, 2020, no. 6, pp. 44–50 (in Russian).

#### Информация об авторах

*Мингатина Олеся Алексеевна* – аспирант, кафедра разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений. Высшая школа нефти, Центр моделирования Институт ТатНИ-ПИНЕФТЬ ПАО «Татнефть» им. В. Д. Шашина (ул. Советская, 186А, 423462, Альметьевск, Российская Федерация). E-mail: lesya\_2525@mail.ru

*Насыбуллин Арслан Валерьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений. Высшая школа нефти (Советская, 210, 423462, Альметьевск, Российская Федерация). E-mail: arsva@bk.ru

#### Information about the authors

*Mingatina Olesya Alekseevna* – PhD Candidate, Chair of Oil and Gas Fields Development and Operation, Higher School of Petroleum (HSP), Modeling Center, Technological Development Center – PJSC TATNEFT (186A, Sovet Str., Almetьевsk, 423462, Russian Federation). E-mail: lesya\_2525@mail.ru

*Nasibullin Arslan Valeryevich* – DSc, Professor, Hold a Chair of Oil and Gas Fields Development and Operation. Higher School of Petroleum (186A, Sovet Str., 423462, Almetьевsk, Russian Federation). E-mail: arsva@bk.ru

*Поступила в редакцию 15.10.2025*