

УДК 622.276.6: 622.245.54

ВЛИЯНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРОНИЦАЕМОСТЬ ПОРИСТЫХ СРЕД (ОБЗОР)

Гатауллин Рустем Наилевич¹,
rustem.acadrome@mail.ru

Галимзянова Алия Ринатовна¹,
galimzyanova_aliy@mail.ru

Марфин Евгений Александрович¹,
marfin_ea@mail.ru

¹ Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ Казанский научный центр РАН,
Россия, 420111, г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31.

Актуальность работы обусловлена необходимостью решения проблем, возникающих при разработке нефтяных месторождений: снижение темпов добычи; ухудшение фильтрационных свойств пласта; увеличение обводненности добываемой нефти. Воздействие на пласт упругими колебаниями в широком частотном диапазоне рассматривается как перспективная технология стимулирования и увеличения добычи нефти. Однако широкомасштабное внедрение таких методов сдерживается недостаточным пониманием физики протекающих при этом процессов.

Цель: выявление механизмов улучшения проницаемости пористых сред и продуктивных пластов при акустическом воздействии на них на основе теоретических и экспериментальных исследований, промышленных испытаний; обозначение приоритетов будущих научных и практических разработок в области применения акустических технологий для интенсификации добычи нефти.

Методы. Анализ результатов лабораторных исследований и обобщение опыта применения в промышленной практике методов акустического и ультразвукового воздействия на продуктивные пласты с целью интенсификации добычи нефти.

Объекты: продуктивные пласты нефтяных месторождений; загрязненная призабойная зона скважин; образцы пористых сред терригенных и карбонатных коллекторов.

Результаты. Представлен обзор результатов теоретических, лабораторных и промышленных исследований методов повышения эффективности добычи нефти на счет волнового воздействия на среду упругими колебаниями. Проанализированы явления, возникающие при таком воздействии в продуктивных пластах. Отмечается, что большинство исследований в этой области относится к ультразвуковому воздействию и в основном в лабораторных условиях. Рассмотрены явления, приводящие к увеличению проницаемости пористых сред при таком воздействии. В частности, распространение упругих колебаний способствует предотвращению выпадения органических и неорганических осадков, восстановлению и увеличению проницаемости насыщенных пористых сред, удалению пробок и различных отложений в карбонатных и терригенных коллекторах. Сформулированы направления перспективных исследований, даны рекомендации по совершенствованию добычи нефти за счет акустического воздействия. Проведенный анализ и обобщение результатов исследований подтверждают, что воздействие упругими колебаниями в широком диапазоне частот активизирует различные химические и физические процессы, влияет на фильтрационно-емкостные свойства продуктивных пластов, способствует интенсификации добычи нефти.

Ключевые слова:

Проницаемость, пористая среда, упругие волны, ультразвук, нефть, керны, добыча нефти.

Введение

Падение добычи нефти представляет собой серьезную проблему, поскольку мировой спрос на углеводороды непрерывно растет. Следовательно, важно разработать и внедрить новые методы, которые позволят интенсифицировать фильтрацию углеводородов через пористые среды и тем самым увеличить добычу. Снижение добычи обусловлено главным образом уменьшением естественного пластового давления или повреждением пласта в призабойной зоне скважины. Под повреждением пласта понимают состояние, вызванное проникновением бурового раствора в пласт, отложением асфальтено-смолистых веществ и парафина в породе или другими факторами [1–4]. Такое повреждение продуктивного пласта значительно снижает производительность скважины, и его негативное влияние на добычу неизбежно. Для устранения повреждений пласта в призабойной зоне скважи-

ны часто используются такие методы, как гидроразрыв пласта под высоким давлением или нагнетание в залежи кислот и растворителей [5–8]. Такие традиционные методы, как правило, дорогостоящие, требуют широкого спектра наземного оборудования, приостановки действия скважины и связаны с негативным воздействием на окружающую среду. Поэтому поиск новых эффективных методов всегда был очень важен. Применение акустических методов в широком частотном диапазоне от инфра- до ультразвуковых колебаний является перспективным направлением совершенствования добычи углеводородов [9–11]. Ультразвуковая техника нашла широкое применение в нефтегазовой промышленности, например, для обследования трубопроводов, измерения скорости жидкости и повышения нефтеотдачи пластов. В отношении механизма, лежащего в основе повышения нефтеотдачи с помощью упругих волн, были представлены различные гипотезы:

- изменение смачиваемости. Высокочастотные волны вызывают вибрацию скелета пород и насыщаемых ее жидкостей. Однако, поскольку скорость и ускорение вибрации породы и жидкости различны, возникает относительное движение на границе раздела жидкой и твердой фаз. При определенной интенсивности такого движения возникает так называемая «тенденция к смятию», в результате чего силы натяжения между жидкостью и породой уменьшаются, и жидкость отрывается от поверхности породы [12, 13];
- изменение вязкости. Воздействие упругой волны на горную породу вызывает периодическое изменение напряжения сдвига и акустического давления. Для насыщаемых ее жидкостей, например, таких как тяжелые углеводороды, их вязкость уменьшается с увеличением напряжения сдвига. Более того, нагрев породы за счет поглощения энергии ультразвуковой волны также приводит к снижению вязкости. В условиях ультразвуковой кавитации высвобождается большое количество тепловой энергии в процессе схлопывания пузырьков [14–16]. Однако существуют определенные условия, при которых после ультразвуковой обработки вязкость нефти повышается [17];
- уменьшение толщины поверхностного слоя в результате теплового эффекта ультразвукового воздействия, а также деаглоляции крупных молекул углеводородов. Это может быть вызвано рядом причин, таких как кавитация пузырьков, трение и эффект механического воздействия ультразвука. Механическая вибрация от волн высокой частоты вызывает относительное движение различных молекул из-за разницы в их ускорении, что приводит к разрушению тяжелых молекул [18];
- повышение пористости и проницаемости в результате деформации пор, удаления мелких пробок, растворения парафина и асфальтено-смолистых веществ и т. д. [19, 20];
- эмульгирование и деэмульгирование, вызванное интенсивными звуковыми колебаниями. Тепловой эффект ультразвука может снизить вязкость эмульсии и вызвать разрушение самих эмульсий, особенно в коллекторах с тяжелой нефтью [21–24].

Ультразвуковые технологии широко используются в нефтяной промышленности. Ультразвуковые волны уменьшают повреждения пласта, вызванные набуханием глины. [5]. При добыче тяжелой нефти ультразвуковые волны могут вызвать реакцию аквагермолиза для снижения ее вязкости, что в конечном итоге приведет к увеличению добычи нефти [25]. Некоторые исследователи указывают, что ультразвуковые волны подходят для удаления закупоривающих материалов, вызванных буровым раствором или парафином вблизи ствола скважины, и демонстрируют преимущество по стоимости с традиционными методами, включая гидроразрыв пласта и закачку кислот [26]. В последнее время на промысле ультразвуковые волны активно применяются в комбинации с традиционными методами повышения нефтеотдачи пластов для

дальнейшего улучшения нефтеотдачи. Например, некоторые экспериментальные исследования доказали, что ультразвуковые волны позволяют снизить неустойчивость фронта вытеснения от эффекта образования вязких пальцев и повысить эффективность зачистки во время операции по заводнению, закачке CO₂ за счет снижения межфазного натяжения [27, 28].

В связи с растущим интересом к акустическим технологиям и продолжающимися исследовательскими работами предыдущие обзоры по тематике проницаемости пористых сред представляются ограниченными по своему содержанию. В данной работе представлены последние достижения и предлагаемые решения по повышению нефтеотдачи, достигнутые с помощью методов воздействия упругими волнами, с целью помочь исследователям оценить масштабы разработок в этой области. В работе проведен обзор лабораторных исследований влияния ультразвука на извлечение нефти, повреждение пласта, проницаемость насыщенных сред и фильтрационных особенностей течения флюидов. Также представлены промышленные исследования таких процессов с целью интенсификации нефтедобычи за счет увеличения проницаемости среды и рассмотрены наиболее совместимые с ультразвуком технологии.

Лабораторные исследования

Природные и синтетические пористые среды

Проницаемость пород нефтяных коллекторов обычно варьируется от 0,1 до 1000 мД и более при типичных значениях пористости от 5 до 30 %, но чаще всего – от 10 до 20 % [29]. Разработка нефтяных месторождений с низкопроницаемыми коллекторами особенно актуальна, поскольку в них содержится большое количество нефти, но извлечь ее довольно сложно. Необходимо приложить больше усилий для выявления механизма ультразвукового повышения нефтеотдачи в низкопроницаемых коллекторах, поскольку и свойства флюидов, и характеристики пласта отличаются от традиционных коллекторов.

Классификация кернов, особенно с низкой проницаемостью, сама по себе сложная задача, но если оптимизировать и сгруппировать их по параметрам и характеристикам, то можно сократить время и затраты на экспериментальные исследования. Ранее при исследовании обычно классифицировали образцы керна по проницаемости [30]. Однако такой эмпирический метод группировки имеет серьезные ограничения из-за разнообразия свойств [31]. Помимо проницаемости, пористость и смачиваемость также являются важными факторами, влияющими на извлечение нефти из низкопроницаемых коллекторов [32]. С появлением передовых вычислительных технологий перспективным инструментом для решения проблемы группировки может стать метод компьютерного обучения. В работах [33, 34] предлагается алгоритм кластеризации, который может одновременно учитывать различные свойства коллектора и оптимизировать количество кластеров, а также компоненты внутри каждого кластера.

В исследовании [13] был использован алгоритм кластеризации, учитывающий пористость, проницаемость и угол смачиваемости, а также позволяющий классифицировать образцы керна на определенные категории. Результаты исследования подтвердили положительный эффект применения ультразвуковых волн, особенно в нефтеносных и слабообводненных кернах. При этом отмечается, что ультразвуковая волна не может существенно повлиять на компоненты легкой нефти, как на компоненты тяжелой нефти, но все же такие изменения способствуют снижению вязкости нефти и изменению поверхностного натяжения системы «нефть–вода». В работе [35] также подтверждается, что ультразвуковое воздействие способно эффективно снижать вязкость тяжелой нефти за счет реакции аквафермолиза, но такой эффект менее значим для легкой нефти. Было доказано, что ультразвуковое воздействие также изменяет относительную проницаемость нефти в низкопроницаемых коллекторах. Проведенными экспериментальными исследова-

ниями показано, что ультразвуковая волна изменяет микроструктуру коллекторов и улучшает связи между порами, в том числе за счет образования микротрещин [27, 36, 37]. Отмечается, что необходимо проведение дополнительных исследований для оптимизации частоты ультразвукового воздействия.

В работе [38] исследовалось влияние ультразвукового воздействия на структуру пор. Авторы работы исследовали образцы карбоната и песчаника с различной текстурой породы, чтобы определить влияние ультразвуковых волн на течения жидкости и микроскопическую структуру пор с помощью теста на абсолютную проницаемость, изображений сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) и петрографии. Эксперименты показали, что ультразвуковые волны могут влиять на структуру пор посредством инициирования микротрещин и/или отрыва частиц породы. В качестве примера на рис. 1 показаны значения проницаемости трех образцов индианского и трех образцов оолитового известняка до и после ультразвукового воздействия на них.

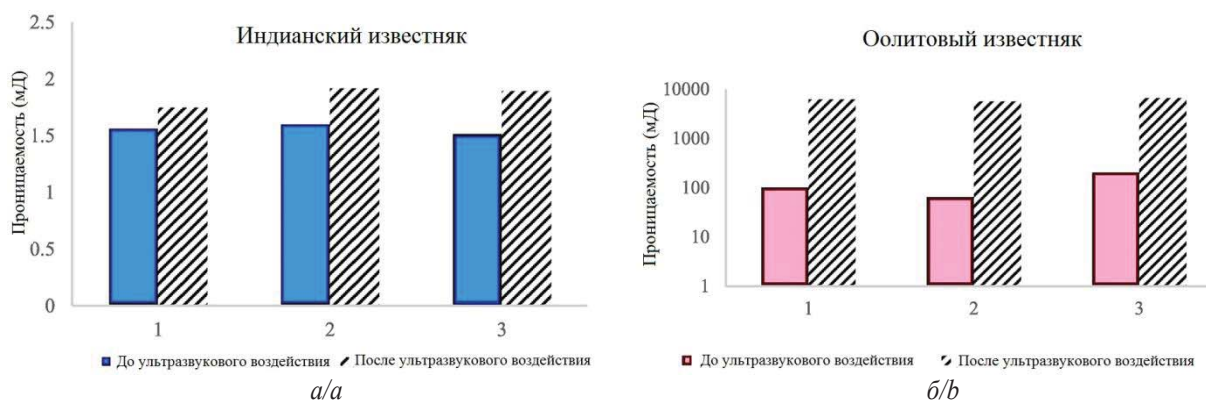


Рис. 1. Изменение абсолютной проницаемости образцов индианского (а) и оолитового (б) известняка в результате ультразвуковой обработки [38]

Fig. 1. Absolute permeability alteration of Indiana (a) and Oolitic (b) limestone as a result of ultrasonic treatment [38]

Для низкопроницаемого образца индианского известняка увеличение проницаемости достигло 25,17 %. При относительно высокой начальной проницаемости оолитового известняка и его хрупкой текстуры при ультразвуковой обработке проницаемость образцов увеличилась более чем в 30 раз. Сделан вывод, что ультразвуковые волны могут изменить поровую структуру известняков двумя механизмами: через расширение сети микротрещин [3, 39, 40] и за счет разрушения и удаления частиц в поровом пространстве [1, 38]. Более того, из-за высокой начальной проницаемости и пористости отделившиеся частицы оолитового известняка легче извлекались, увеличивая проницаемость и пористость (рис. 2).

В доломитовых образцах из-за неоднородности и кристаллической и компактной текстуры ультразвуковые волны не смогли эффективно расширить сеть трещин и увеличить проницаемость. Это означает, что если микроразрывы начнутся, то они не будут эффективными из-за отсутствия хорошей внутренней связности в результате высокой гетерогенности доломитовых образцов. Следовательно, ультразвуковая обработка ухудшает процесс тонкой миграции, что

может привести к закрытию порового горла и снижению проницаемости [38].

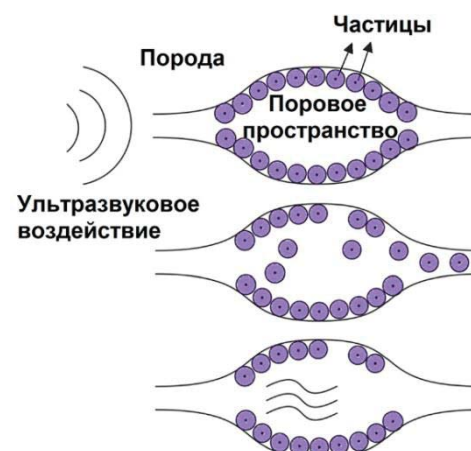


Рис. 2. Схема ультразвукового воздействия на известняк: увеличение проходного сечения поровых каналов [38]

Fig. 2. Schematic of ultrasonic effect on limestone: increased flow cross section of the pore throats [38]

В работе [41] отмечено системное увеличение эффективной проницаемости вследствие динамического напряжения, вызванного колебаниями порового давления инфразвуковой частоты (0,05 Гц). Применялись относительно небольшие колебания давления (от 10^{-2} до 10^{-1} МПа); выявлено повышение эффективной проницаемости до 50 % в образцах с преобладанием трещин. При воздействии на керны ультразвуком движение мелких частиц может приводить как к расширению, так и к сужению трещин. Авторы отмечают, что увеличение и уменьшение проницаемости связано с механическими процессами, а не с механизмами необратимых процессов, наблюдаемых при ультразвуковом воздействии. При этом эффекты динамического напряжения также предполагают, что проницаемость является динамически управляемой переменной [41].

О динамической проницаемости сообщалось более 30 лет назад. В работе [42] представлена теория динамической проницаемости в флюидонасыщенных пористых средах. Авторы рассматривали реакцию ньютоновской жидкости, насыщающей поровое пространство жесткой изотропной пористой среды, на бесконечно малый колебательный градиент давления в образце. Выведенная ими аналитически функция проницаемости от частоты имеет вид:

$$\tilde{k}(\omega) = \frac{k_0}{\left(1 - \frac{4i\alpha_\infty^2 k_0^2 \rho_f \omega}{\eta \Lambda^2 \phi^2}\right)^{\frac{1}{2}} - \frac{i\alpha_\infty k_0 \rho_f \omega}{\eta \phi}}, \quad (1)$$

где k_0 – проницаемость при отсутствии возмущений, м^2 ; α_∞ – извилистость поровых каналов; ρ_f – плотность флюида, кг/м^3 ; ϕ – пористость, д. ед.; η – вязкость флюида, $\text{Па}\cdot\text{с}$; Λ – отношение объема пор к площади поверхности зерен, м. Зависимость (1) представлена в комплексном виде, однако практическое значение имеет ее действительная часть ($\text{Re}(\tilde{k}(\omega))$). Мы оценили влияние частоты возмущений и начальной проницаемости на изменение динамической проницаемости (рис. 3). Из рисунка видно, что при низкой начальной проницаемости влияние возмущений слабое. Однако при больших значениях начальной проницаемости $k_0 > 1$ Дарси с увеличением частоты возмущений значение динамической проницаемости резко снижается. Таким образом, согласно теории динамической проницаемости [42], малые возмущения приводят к снижению проницаемости для высокопроницаемых пористых сред. К сожалению, данная теория не объясняет увеличения проницаемости при колебаниях большой амплитуды, которое наблюдается в многочисленных лабораторных и промысловых исследованиях. Очевидно, что при больших амплитудах имеют место нелинейные процессы, а уравнение (1) соответствует линейной ситуации. Для объяснения явления увеличения проницаемости в работе [43] предложено использовать в уравнении (1) дополнительный коэффициент, учитывающий степень очистки порового пространства от отложений. Такой подход позволил автору разработать методику прогнози-

рования изменения дебита добывающих скважин терригенных пластов.

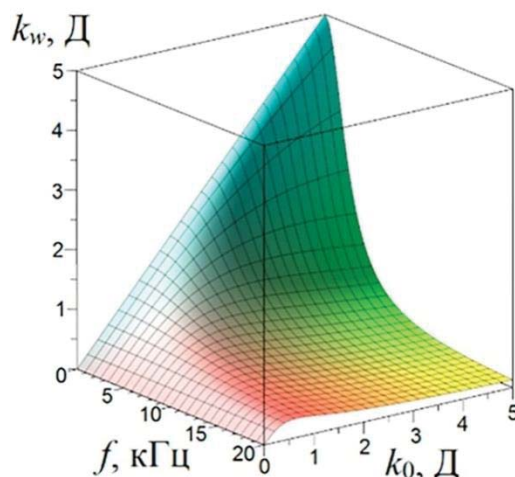


Рис. 3. Зависимость динамической проницаемости k_w от частоты акустического воздействия f и начальной проницаемости k_0

Fig. 3. Dependence of dynamic permeability k_w on the frequency of acoustic action f and initial permeability k_0

В работе [44] на основе экспериментальных исследований установлено, что в явлении увеличения проницаемости под действием сейсмических волн важным фактором, влияющим на этот процесс, является скорость потока. Полученные результаты позволили авторам предположить, что проницаемость пласта можно регулировать путем наложения волнового поля и изменения скорости фильтрации.

Другим аспектом динамической проницаемости является то, что в пористых средах имеет место медленная продольная волна – волна Био, которая проявляется в основном на частотах ультразвукового диапазона. В работе [45] исследовали затухание упругих волн в плотных нефтяных породах (алевролитах). Ультразвуковые измерения в породах, насыщенных газом и водой, показывают, что затухание упругих волн уменьшается с увеличением водонасыщенности в плотных нефтяных алевролитах. Иное поведение наблюдается в карбонатах и песчаниках, где затухание обычно увеличивается с ростом водонасыщенности.

В работе [46] представлены результаты исследования образца терригенного керна. Изучен образец с пористостью 23,7 % и проницаемостью 0,6 Д. На основе рентгеновской микротомографии керна была создана цифровая 3D-модель пористого образца. Численное моделирование течения жидкости в поровом пространстве с наложенными колебаниями давления (имитация акустического воздействия) позволило выявить особенности гидродинамики потока (рис. 4). Было установлено, что наложенные колебания приводят к возникновению дополнительного направленного течения с характеристиками, зависящими от параметров наложенных колебаний. Другими словами, при акустическом воздействии имеет место «надбавка» к значению проницаемости, измеренной для стационарных условий.

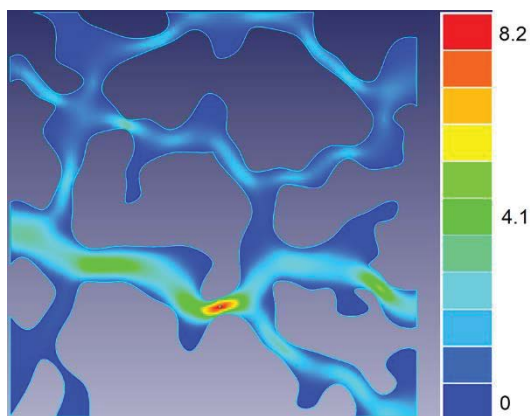


Рис. 4. Распределение скоростей установившегося потока в поперечном сечении порового пространства [46]

Fig. 4. Velocity distribution of steady flow in the cross-section of pore space [46]

В исследовании [47] было проанализировано влияние ультразвуковых волн на течение нефти при свободном гравитационном дренаже. Авторы исследования смоделировали пористую среду в виде пакета стеклянных шариков для проведения испытания в условиях ультразвукового воздействия и без воздействия. Результаты данного исследования показали, что воздействие ультразвуковыми волнами значительно повышает коэффициент фильтрации при рассматриваемом режиме течения флюида. Кроме того, проницаемость как смачивающей, так и несмачивающей фазы увеличилась под воздействием излучения ультразвуковых волн.

Следуя методологии исследования [47], Н. Arabzadeh и М. Amani провели серию аналогичных экспериментов на трех различных образцах, чтобы подтвердить или опровергнуть выводы этого исследования [48]. В результате исследований установлено, что волновое воздействие позволяет интенсифицировать процесс извлечения нефти на режиме гравитационного дренажа. Такой вид дренажа является доминирующим в процессе добычи для неасфальтеновой сырой нефти в трещиноватых продуктивных пластах. При продолжительном времени волнового воздействия авторы отмечают, что в образцах, содержащих асфальтены, увеличивается вязкость нефти и как следствие снижается её скорость извлечения. Авторы за-

метили, что увеличение размеров стеклошариков в неасфальтеновых образцах приводит к повышению темпа извлечения нефти под воздействием ультразвуковой обработки, а в асфальтеновых образцах наблюдается обратный эффект [48].

В работе [49] проведены исследования взаимосвязи нелинейной динамической жесткости с проницаемостью трещин гранита Вестерли. Совместные измерения скорости звуковых волн и проницаемости при колебаниях порового давления и нормальных напряжениях показали, что нелинейность и проницаемость трещин модулируется амплитудой колебаний и возрастает с увеличением частоты колебаний. Исследования другого гранита также отражены в работе [50], где установлено, что изменения проницаемости связаны с образованием и расширением трещин при внешнем воздействии.

В исследовании [51] в качестве гипотезы акустического воздействия предложено следующее. Флюид в нефтяной залежи состоит из легкой и тяжелой углеводородных фаз, находящихся в термодинамическом равновесии. Внешние воздействия могут сместить точку равновесия таким образом, что тяжелая фракция может либо отложиться на стенках пор, либо раствориться, изменяя проницаемость призабойной зоны вокруг скважины. Разработанная модель позволяет воспроизвести характерные особенности фильтрации до и после акустического воздействия, в том числе и интенсификации нефтеотдачи коллектора.

Об изменении проницаемости пористой среды говорится также в работе [52]. Эксперименты с синтетическими образцами пористых сред с проницаемостями от 180 до 245 мД показали, что максимально увеличение проницаемости происходит при непрерывном воздействии с интенсивностью 4 Вт/см² (рис. 5). Увеличение интенсивности до 7 Вт/см² приводит к уменьшению эффекта воздействия, а еще большее увеличение интенсивности сопровождается снижением проницаемости – эффект отрицательный. Исследования спектров акустической эмиссии, возникающей при фильтрации флюида, до и после ультразвукового воздействия свидетельствуют о структурных изменениях пористой среды, проявляющихся в том, что характерные частоты спектра увеличиваются.

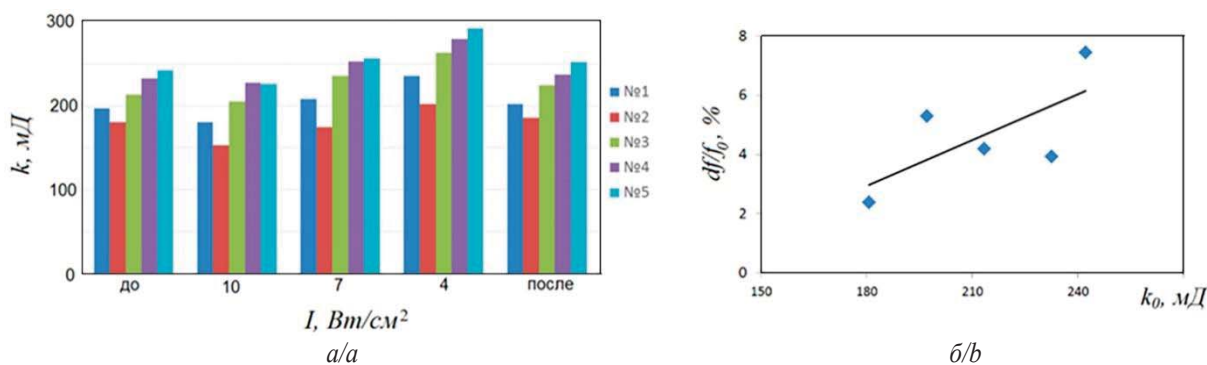


Рис. 5. Изменение проницаемости (а) и относительной частоты фильтрационных шумов (б) при ультразвуковом воздействии [52]

Fig. 5. Change of permeability (a) and relative frequency of filtration noise (b) under ultrasonic influence [52]

Поврежденные пористые среды

Продуктивный пласт подвержен снижению проницаемости на протяжении всего срока эксплуатации скважины, начиная с прохождения бурового долота и заканчивая стадией ликвидации скважины. Под повреждением пласта понимается снижение проницаемости породы-коллектора вблизи ствола скважины. При этом производительность скважины уменьшается, а вместе с ней и общий доход отрасли [53]. Нефтяные компании заинтересованы в снижении себестоимости добычи углеводородов и устранении причин падения производительности скважин. В последнее время в связи с энергетическим кризисом на первый план выходит выявление повреждений пласта и восстановление нарушенной проницаемости. Снижение проницаемости в продуктивном пласте может быть вызвано закупоркой пор и перфораций, химическими отложениями и механической деформацией пласта под действием давлений, а также несовместимостью нефтяных флюидов с нагнетаемыми жидкостями или флюида с породой [53].

В работе [54] исследованием микрофлюидики потока показано, что миграция частиц и засорение приводят к тому, что закупоренные поры меняют локальный поток и способствуют дальнейшему закупориванию близлежащих пор. Моделирование сети пор показало, что такое «зависимое засорение» сильнее снижает проницаемость пористой среды, по сравнению с независимым засорением в случайных местах.

Многие пласты теряют свою естественную проницаемость при взаимодействии с водой из-за эффекта глины, и это нарушение проницаемости пласта, содержащего глину, связывают с ионным составом и рН-показателем нагнетаемых флюидов в пласт [55]. Естественно, что до начала проникновения бурового долота система «порода-коллектор» и содержащийся в ней флюид вместе с входящими в состав минералами находятся в физико-химическом равновесии. Однако установившееся равновесие может быть нарушено из-за взаимодействия чужеродного флюида в процессе бурения, цементирования и заводнения. Вследствие этого чувствительные к воде частицы глины разбухают и увеличиваются в размерах, нарушая естественные процессы фильтрации жидкости. В результате эти частицы могут попасть в поток и двигаться вниз по течению, где они могут закупорить пористую среду и вызвать серьезное нарушение проницаемости [55]. Все это значительно снижает фильтрационные свойства пласта и приводит к снижению добычи нефти. В свою очередь, при интенсивном ультразвуковом воздействии на нефтяной пласт в процессе распространения упругой волны формируется большое ускорение, которое может разрушить структуру частиц нефтяного пласта и увеличить его проницаемость [56].

По мнению исследователей [56, 57], ультразвуковая технология добычи нефти подразумевает использование упругих волн для обработки околоскважинных нефтяных пластов в нагнетательных и добывающих скважинах за счет изменения физических

свойств и состояния жидкости в пласте, улучшения условий циркуляции и проницаемости на забое скважины. Решением проблемы приемистости нагнетательных скважин достигается цель – увеличение добычи нефти, скорости закачки воды и нефтеотдачи [56].

В работе [1] авторы использовали ультразвуковые волны с различной частотой – от 10 до 100 кГц – для воздействия на керн, загрязненный буровым раствором. Результаты их исследования показывают, что проницаемость керна значительно (в 3–7 раз) увеличивается под воздействием ультразвуковых волн. Также в работе [1] исследовано влияние звуковых волн того же частотного диапазона на образцы песчаника и карбоната, которые были загрязнены буровым раствором и твердыми частицами, и было показано, что применение упругих волн позволило увеличить проницаемость образцов в 4 и 1,5 раза соответственно.

В работе [2] проведено экспериментальное исследование влияния ультразвуковых волн на асфальтовые отложения. Авторы отмечают, что ультразвуковая кавитация и тепловое воздействие являются фундаментальными причинами снижения вязкости сырой нефти и повышения пропускной способности сырой нефти, и предлагают этот механизм для объяснения эффекта ультразвукового тампонирувания. Проницаемость пласта повышается после удаления асфальтовых отложений, тем самым увеличивается скорость фильтрации нефти [2]. Теоретические расчеты и компьютерное моделирование показали, что расположение скважинного ультразвукового инструмента вблизи боковой стенки скважины приводит к более однородному распределению акустического поля и более широкому проникновению акустических волн.

Р.М. Roberts и др. [58, 59] изучали влияние частоты и интенсивности упругих волн на процент восстановления проницаемости поврежденной породы. Было показано, что рост частоты повышает только скорость восстановления проницаемости, в то время как рост мощности упругих волн увеличивает глубину проникновения волн в пласт. В 2004 г. S.A. Shedid [3] исследовал влияние ультразвуковых волн на разрушение асфальта в керне. Он утверждал, что основными механизмами, которые улучшают проницаемость в его экспериментах, были удаление отложений и инициирование микротрещин.

К повреждению пласта могут привести также неорганические отложения. Так, осаждение хлорида натрия (NaCl), особенно в газодобывающих скважинах, является одной из проблем повреждения пласта, ухудшающих проницаемость. В работе [60] приведено исследование влияния ультразвуковых волн на эффективность удаления отложений NaCl. Двадцать образцов керна с различной проницаемостью были насыщены NaCl. После осаждения NaCl в керне образцы сначала подвергались закачке воды, а затем закачке воды с воздействием ультразвуковых волн. На каждом этапе измерялась и регистрировалась проницаемость кернов. Результаты экспериментов показали, что применение ультразвуковых волн восстанавлива-

ет проницаемость кернов в большей степени, чем только закачка воды. В частности, в образцах с проницаемостью ниже 20, 30–100, 100–700 мД и кернах с проницаемостью выше 1000 мД ультразвуковые волны восстанавливают проницаемость до 80, 42, 87 и 81 %, соответственно. В отличие от нагнетания воды с ультразвуковым воздействием, нагнетание в образцы только воды повышает проницаемость до 29, 18,5, 62 и 77 % соответственно. Таким образом, явно виден положительный эффект от применения ультразвуковых волн (рис. 6).

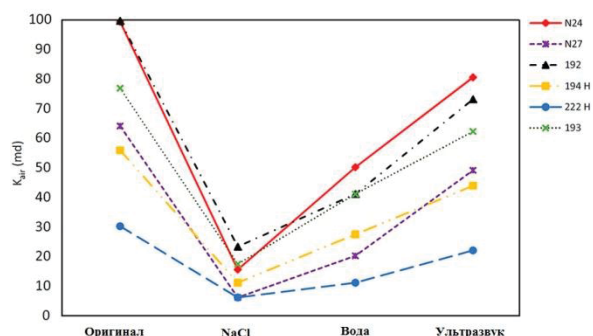


Рис. 6. Изменения проницаемости образцов на каждом этапе эксперимента [60]

Fig. 6. Sample permeabilities in each stage of experiment [60]

Изображения поверхности кернов, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии, показывают, что ультразвуковые волны разрушают структуру отложений хлорида натрия. Разрушение отложений обусловлено распространением упругих волн и повышением температуры в окружающей среде, что приводит к увеличению растворимости NaCl. После воздействия ультразвуковых волн отложения хлорида натрия внутри кернов могли быть удалены из трещины, тогда как закачка только воды не могла вымыть и удалить отложения из трещины. Согласно результатам работы [60], ультразвуковые волны могут быть использованы в качестве новой и эффективной технологии в нефтяных и газовых скважинах для удаления неорганических отложений в призабойной зоне скважины.

В исследовании [5] предложен комбинированный способ воздействия на поврежденные образцы керна. Способ заключался в совместной обработке кернов ультразвуком и химическими реагентами. С целью восстановления проницаемости в экспериментальной работе на трех видах поврежденных образцах керна были и независимо, и одновременно применены метод кислотной обработки и метод ультразвукового воздействия. Оптимальные частота и мощность ультразвуковых волн были определены как 20 кГц и 1000 Вт, которые обеспечили максимальное восстановление проницаемости на 19,5, 21,7 и 22,3 % в соответствующих образцах керна 30, 80 и 150 мД. Совместное воздействие ультразвука и кислот (смесь плавиковой и соляной кислот) в течение 100 минут привело к восстановлению проницаемости на 44,2, 45,8 и 43,1 % для соответствующих трех образцов

керна. Отмечается, что на такой частоте и мощности генерации упругих волн наблюдаются резонансные явления. Восстановление проницаемости при продолжительности воздействия более 100 минут не наблюдалось. Установлено, что основными механизмами увеличения проницаемости являются кавитация и тепловой эффект.

Подобная работа, в которой представлено экспериментальное исследование влияния различных режимов воздействия на проницаемость кернов, проведена Z. Wang и J. Huang [7]. Результаты показали, что на низких частотах ультразвука и высокой мощности генерации повышается проницаемость кернов за счет удаления из них воды, однако с увеличением продолжительности обработки эффект заметно снижается. Оптимальные значения частот ультразвукового воздействия определены в 30 кГц и 1000 кГц. Несмотря на то, что химическая обработка оказалась немного эффективнее, чем применение ультразвуковых волн, для повышения проницаемости керна применение ультразвука выглядит перспективнее в связи с его стоимостью и экологической безопасностью. В целом комбинированный метод ультразвуковой и химической обработки дал лучший эффект для удаления чувствительности воды, чем использование ультразвуковой или только химической обработки, как показано на рис. 7.

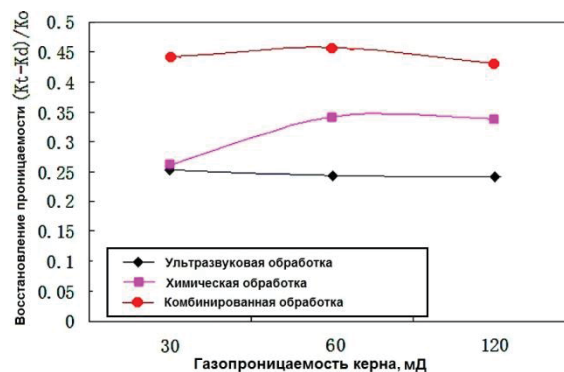


Рис. 7. Сравнение проницаемости образцов при ультразвуковой, химической и комбинированной обработке [7]

Fig. 7. Comparison of the permeability of samples with ultrasonic, chemical and combined treatment [7]

Использование традиционных методов, таких как обработка паром, циклическая закачка пара для долгосрочной добычи тяжелой нефти, как правило, наносит повреждение пласту, в основном из-за отложения парафина вблизи ствола скважины и проникновения внешних жидкостей и твердых частиц при различных видах эксплуатационных операций [57]. Выпадение в порах коллектора парафина и других веществ снижает проницаемость пласта. Ультразвуковой метод удаления парафиновых осадков, требующий меньших затрат энергии и мощности, является альтернативой традиционным методам воздействия и не требует закачки растворителей. Был проведен эксперимент по ультразвуковому удалению парафиновых осадков с использованием моделирования ультразвуковой ди-

намической экстракции и искусственных кернов, поврежденных парафиновыми осадками [4]. Результаты показали, что частота преобразователя, время ультразвуковой обработки, температура и начальная проницаемость керна влияют на эффект удаления парафиновых осадков. Темп осаждения парафина снижается с увеличением частоты преобразователя, температуры и времени обработки. Кроме того, были проведены эксперименты по удалению парафиновых осадков с помощью ультразвуковой волны, химического агента и комбинированного метода ультразвука и химии соответственно. Эксперименты доказывают, что при волновой обработке удаление парафиновых осадков лучше, чем при химическом методе, а эффект совместного применения явно лучше, чем при использовании только одного метода.

В другом исследовании [61] приведены результаты лабораторных экспериментов на образцах керна для изучения способности ультразвуковых волн мобилизовать дополнительную нефть. Заводнение керна проводилось в горизонтальном и вертикальном направлениях, а волновая стимуляция применялась при исходном состоянии нефти и при остаточной нефтенасыщенности после проведения первоначального заводнения. Авторами определена относительная проницаемость системы «нефть–вода» и скорость извлечения нефти в условиях волнового воздействия и без него. Результаты исследования подтверждают, что за счет применения ультразвуковых волн темп вытеснения нефти возрастает, а взаимодействие генерируемых упругих волн с флюидами в пористой среде способствует изменению скорости фильтрации и относительной проницаемости. Воздействие ультразвуком на образцы уже после проведения заводнения оказалась более эффективным, чем в случае с исходной нефтью. Это говорит о том, что целесообразнее использовать ультразвук на такие нефтяные коллекторы, которые уже подвергались различным методам добычи. Кроме того, не рекомендуется проводить волновую обработку на образцах керна, полученных под давлением менее 1 МПа, поскольку происходит разрушение образца. Авторы также отмечают, что при применении вертикальных скважин с обсаженными стволами и селективной перфорацией волновая стимуляция рекомендуется в коллекторах, в которых проницаемость уменьшается с увеличением глубины залегания залежи [61].

Промысловые исследования

Систематические исследования воздействия упругими колебаниями на процесс добычи нефти в промышленных условиях начинаются с середины прошлого столетия [11, 62]. Хотя еще раньше нефтяники России и Америки заметили, что природная и техногенная сейсмичность влияет на дебит скважин. Так, после землетрясений или после прохождения поездов по железной дороге вблизи месторождений увеличивалась добыча нефти, повышался уровень жидкости в скважинах. Эти наблюдения привели к разработке технологий и методов воздействия на пласты как с поверхности земли, так и через скважины. В систематическом обзоре I.A. Veresnev и P.A. Johnson [63] бы-

ли собраны и проанализированы исследования по методам добычи нефти с помощью ультразвуковых и сейсмических волн. В этой работе был сделан вывод, что в независимости от частоты упругие волны способны увеличить проницаемость пористой среды и добычу нефти из нее.

В работе [64] представлены результаты экспериментов и промысловых данных, которые продемонстрировали увеличение проницаемости, вызванное сейсмическими волнами при землетрясении. Однако несколько экспериментов выявили, что после сейсмической активности значительно снизилась проницаемость трещиноватых песчаников, расположенных на небольшой глубине. Авторы связывают такие изменения с закупориванием трещин.

V.O. Abramov и др. [65] исследовали 85 скважин с различными диапазонами проницаемости и пористости. Ультразвуковая обработка улучшила добычу скважин, проницаемость и пористость которых превышали 20 мД и 15 % соответственно. Для скважин с более низкой проницаемостью и пористостью комбинация ультразвукового и химического методов могла повысить дебит скважин более чем в три раза. Такой результат сопоставим с кислотной обработкой низкопроницаемой породы, на эффективность которой влияют фильтрационно-емкостные свойства призабойной зоны пласта [66].

Результаты приведенного промыслового исследования [67] показывают, что использование упругих колебаний может интенсифицировать процесс добычи нефти. Так, сочетание волнового воздействия с внутрискважинным горением может увеличить скорость добычи нефти и снизить обводненность извлекаемой продукции. Объектом были участки Мордово-Кармалынского месторождения природных битумов со следующими характеристиками: глубина залегания углеводородов 80–95 м, пористость 20–35 %, нефтенасыщенность 70–90 %, проницаемость $0,5 \cdot 10^{-12}$ м². Используя скважинный излучатель на различных частотах, удалось существенно повысить проницаемость пористой среды, снизить обводненность извлекаемой продукции и удельные энергетические затраты [68]. Режим волнового воздействия в 1000 Гц обеспечил повышение дебита в два раза, а на частоте 2000 Гц достигалось пятикратное увеличение показателей добычи нефти.

В работе [2] представлен разработанный метод воздействия, который был опробован на горизонтальной скважине в Западной Сибири. Скважина характеризовалась высокой обводненностью. На основании геофизических исследований были обработаны только зоны с низкой обводненностью и высокой добычей нефти, что привело к снижению обводненности на 20 % и увеличению добычи нефти на 91 % после обработки тестовой скважины. Обработка пласта проводилась магнитострикционным скважинным излучателем, его рабочая частота составляла 18 кГц.

Для увеличения нефтеотдачи на месторождениях с разной проницаемостью предлагаются различные химические реагенты для блокирования высокопроницаемых зон нефтеносного пласта, предварительно

промытых водой. Например, в работе [69] в качестве таких реагентов предлагаются композиции на основе карбамида и уротропина. При этом акустическое воздействие при закачке реагентов может способствовать более глубокому их проникновению в высокопроницаемые зоны пласта, увеличивая зону охвата и коэффициент вытеснения нефти [62].

В работе [70] отмечается, что метод воздействия упругими волнами может быть применим как дополнение после использования на месторождении различных способов физико-химической очистки. Причем за счет применения волновых методов должна интенсифицироваться очистка зоны обработки от различных твердых частиц и продуктов химических реакций. Авторами, на основе успешной реализации волновых технологий на углеводородных месторождениях Татарстана и Западной Сибири [67, 71], разработан способ воздействия на пласт техническими средствами на основе магнитострикционных эффектов. Воздействие осуществляется с поверхности земли путем передачи через специальный кабель в пласт электрической энергии мощностью до 5 кВт. Установлено, что максимальный эффект волнового воздействия проявился при плотности акустической мощности 20 кВт/м^2 , оптимальное время воздействия 4–12 часов, а генерируемая частота колебаний должна быть в диапазоне 10–20 кГц, что соответствует условиям обеспечения возникновения резонанса.

В работе [65] описывается новый метод ультразвукового повышения нефтеотдачи пластов с низкопродуктивными скважинами. Технология включает в себя спуск источника мощного ультразвука, выполненного на основе магнитострикционных преобразователей, на устье скважины для кратковременной обработки (СП-42/1300) либо в качестве постоянного размещения для периодического применения (СП-102/1270). Оборудование для комбинированной ультразвуковой и химической обработки состоит из двух частей – наземного генератора и скважинного ультразвукового инструмента. Наземное оборудование позволяет генерировать колебания на частотах от 18 до 27 кГц с выходной мощностью 10 кВт. Эти инструменты обеспечивают радиальные колебания через излучающие поверхности. Рабочая частота скважинных излучателей – 25 кГц. Мощность СП-42/1300 составляет 5 кВт, а мощность СП-102/1270 – 10 кВт.

В скважинах, где проницаемость превышает 20 мД, а пористость более 15 %, ультразвуковая обработка может увеличить добычу нефти на 50 %, а в некоторых случаях и больше. В скважинах с более низкой проницаемостью и пористостью ультразвуковая обработка сама по себе менее успешна, но высокие темпы добычи могут быть достигнуты, если ультразвук применяется в сочетании с химическими реагентами. На рис. 8 представлена схема, где раствор химических реагентов закачивается по НКТ в призабойную зону за счет создания высокого давления от насосной установки. Затем излучатель спускается в скважину через НКТ и проводится ультразвуковая обработка околоскважинной зоны с одновременной подачей химических реагентов через специальный шлангокабель [72].

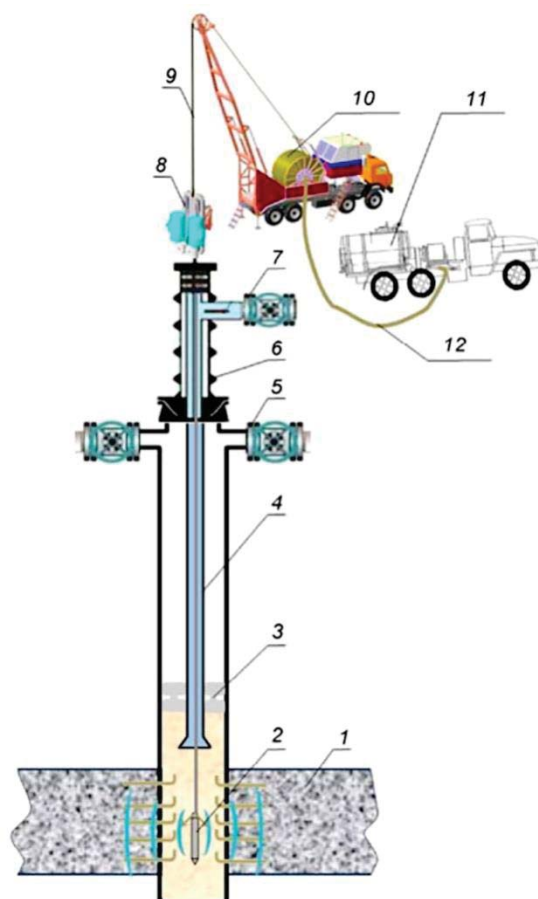


Рис. 8. Расположение элементов оборудования при комбинированной обработке призабойной зоны скважины волновым воздействием и химическими реагентами: 1 – нефтяной пласт; 2 – излучатель; 3 – пакер; 4 – НКТ; 5 – затрубная задвижка; 6 – лубрикатор; 7 – выкидная линия; 8 – податчик шлангокабеля; 9 – шлангокабель; 10 – каротажный подъемник ПКС-5Г-Т; 11 – насосный агрегат типа СИН-32; 12 – шлангокабель подачи химических реагентов [72]

Fig. 8. Arrangement of the elements of equipment during combined treatment of the near-wellbore region using ultrasonic irradiation and chemical reagents: 1 – oil formation; 2 – downhole tool; 3 – packer; 4 – tubing; 5 – casing valve; 6 – lubricator; 7 – discharge line; 8 – feeder for an umbilical cable; 9 – umbilical cable; 10 – well logging truck hoist PKS-5G-T; 11 – pumping unit SIN-32; 12 – hose pipe for supplying chemical reagents [72]

Среднее увеличение производительности почти в 3 раза было достигнуто для этого типа скважин при использовании комбинированной технологии ультразвуковой и химической обработки. Исследование показало, что ультразвуковая технология при этом может повысить нефтеотдачу на 40 % и более на скважинах с проницаемостью более 20 мД и пористостью более 15 % (месторождения Западной Сибири и Самарской области). Авторы утверждают, что применяемый способ ультразвуковой обработки прост и экологически безопасен. Ультразвуковая обработка обладает эффектом последействия, который длится от 3 до 12 месяцев и более. Метод повышает проницае-

мость призабойной зоны и может ослабить кольматацию при наличии минеральных частиц [65, 72]. На коллекторах с более низкой проницаемостью и пористостью ультразвуковая обработка оказалась неэффективной. Для таких скважин был разработан метод, сочетающий ультразвук с химическими веществами, который был испытан на добывающих и нагнетательных скважинах. Дебит таких скважин стал значительно выше после комбинированной обработки ультразвуком и химикатами по сравнению с ультразвуковой или химической обработкой по отдельности [65].

Силовое акустическое воздействие на керны и в скважинах является источником сейсмоакустической эмиссии. В работе [73] показано, что волновое воздействие увеличивает проницаемость по сравнению с первоначальным значением, а вызванная таким воздействием акустическая эмиссия насыщенной пористой среды служит надежным источником информации о ее фильтрационно-емкостных свойствах.

В работе [74] исследовано влияние ультразвукового воздействия с различными параметрами на процесс удаления неорганических отложений. Затем на основе полученных результатов были проведены промышленные эксперименты с использованием разработанного ультразвукового оборудования высокой мощности. Результаты показали, что частота и мощность преобразователя, время ультразвуковой обработки и начальная проницаемость керна влияют на эффект удаления неорганических отложений. Эффект удаления пробок улучшается с повышением частоты и мощности преобразователя. Оптимальное время обработки составляет около 80–120 мин (рис. 9). Полевые испытания, проведенные в низкопроницаемых коллекторах в северной Шэньси и на месторождении Дацин, показали, что ультразвуковая обработка может значительно увеличить добычу и закачку, что подтверждается результатами лабораторных исследований. Так, после обработки ультразвуковой системой суточная добыча нефти увеличивается вдвое (на 0,64 т). Кроме того, хорошие результаты наблюдались в нагнетательных скважинах – отмечено снижение давления и увеличение закачки воды [74]. Результаты показывают, что ультразвуковая обработка может способствовать удалению парафиновых осадков.

В работе [75] проведен анализ существующего акустического оборудования, работающего в ультразвуковом диапазоне частот, и технологий его использования при добыче нефти. В основу данных приборов положен принцип преобразования электрической энергии в механические колебания. Проведенный сравнительный анализ использования методов интенсификации добычи нефти показал высокую эффективность применения акустического воздействия. Использование ультразвуковых излучателей целесообразно не только для воздействия на пласт, но и для обработки высоковязкой нефти при подготовке ее к транспорту [76].

В работе [77] представлены результаты испытания акустического воздействия на нефтяной пласт совместно с технологией поддержания пластового давления на Первомайском нефтяном месторождении в Татарстане. Результаты промышленных исследований подтвердили эффективность предлагаемой техноло-

гии в килогерцовом диапазоне работы устройства на основе струйного осциллятора Гельмгольца [78]: дебит нефти на эксплуатационных участках повысился примерно на 11 %. Также стоит отметить эффект последствия акустического воздействия на пласт с продолжительностью до нескольких месяцев. Наиболее важным результатом применения акустического воздействия стоит признать восстановление приемистости нагнетательной скважины за счет увеличения проницаемости загрязненной призабойной зоны.

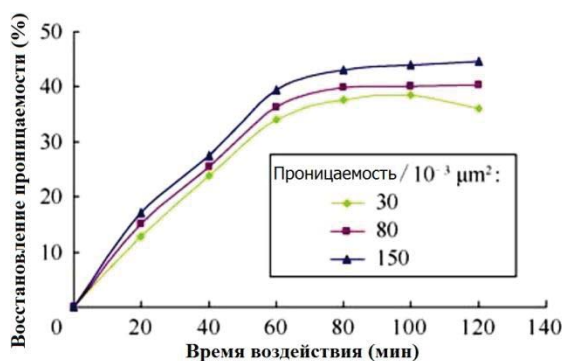


Рис. 9. Влияние продолжительности ультразвуковой обработки на проницаемость образцов [74]

Fig. 9. Effect of ultrasonic treatment duration on the permeability of the samples [74]

Z. Wang и др. [37] утверждают, что ультразвуковая технология извлечения нефти имеет очевидные преимущества по сравнению с традиционными термическими и химическими методами добычи. Применение ультразвука значительно повышает коэффициент извлечения при снижении стоимости добычи, а простота технологии и отсутствие загрязнения нефтяного пласта свидетельствуют о ее больших перспективах. В работе [37] представлены последние достижения в области разработки ультразвуковых устройств для повышения нефтеотдачи в Китае.

Проанализировав публикации по влиянию упругих волн на проницаемость пористых сред, мы представляем сводную краткую информацию в таблице. Видно, что большее количество исследований посвящено воздействию в ультразвуковом диапазоне частот.

Таким образом, анализ литературы свидетельствует о том, что акустическое воздействие на пласт позволяет очистить призабойную зону скважины и увеличить проницаемость продуктивного пласта. Такие изменения фильтрационно-емкостных свойств коллектора способствуют увеличению добычи нефти.

Заключение

В последнее время повышение нефтеотдачи пластов с помощью акустических технологий стало предметом повышенного интереса из-за интенсификации процесса добычи, низкой себестоимости и энергопотребления, высокой адаптивности, селективности применения и отсутствия загрязнения. Отмечаются активные промышленные испытания и разработка скважинных волновых технических средств для повышения нефтеотдачи пластов, особенно в России.

Таблица. Экспериментальные и промысловые исследования при акустическом воздействии на пористые среды и продуктивные пласты

Table. Experimental and field studies of acoustic impact on porous media and reservoirs

Ключевой эффект при волновом воздействии Key effect observed at wave action	Частота (интенсивность) воздействия Frequency (intensity) range	Время воздействия Duration of exposure	Тип исследования (объект воздействия, начальная проницаемость) Type of research (object of influence; initial permeability)	Ссылка Reference
Увеличение проницаемости образцов в 3–7 раз Increase in sample permeability by 3–7 times	10–100 кГц/kHz	0–2000 мин/minutes	Эксперимент (берейский песчаник и известняк) Experiment (Berea sandstone and limestone)	[1]
Повышение эффективности химической обработки и восстановление проницаемости зерна Increasing the efficiency of chemical treatment and recovery of core permeability	18–50 кГц (60–1000 Вт) Оптимально: 20 кГц (1000 Вт) 18–50 kHz (60–1000 W) Optimal: 20 kHz (1000 W)	60–120 мин/minutes	Эксперимент (поврежденные образцы зерна с газопроницаемостью 30, 80 и $100 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^2$) Experiment (damaged core samples with gas permeability of 30, 80 and $100 \cdot 10^{-3} \text{ } \mu\text{m}^2$)	[5]
Повышение проницаемости на 3–9 % и пористости образцов Increase of permeability by 3–9 % and porosity of samples	15, 18, 20, 25, 28 кГц/kHz	Циклы по 5 минут Cycles of 5 minutes each	Эксперимент (керна с сырой нефтью; $0,02 \cdot 10^{-3}$ – $3,1 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^2$) Experiment (cores with crude oil; $0,02 \cdot 10^{-3}$ to $3,1 \cdot 10^{-3} \text{ } \mu\text{m}^2$)	[13]
Увеличение проницаемости образцов известняка: индианский – на 12–25 %, оолитовый – на 3000–8000 % Increase in permeability of limestone samples: indiana – by 12–25 %, oolitic – by 3000–8000 %	20 кГц (300 Вт) 20 kHz (300 W)	10 мин/minutes	Эксперимент (индианский: 1,51–1,6 мД и оолитовый известняк: 64–205 мД) Experiment (indiana: 1,51–1,6 mD and oolitic limestone: 64–205 mD)	[38]
Улучшение проницаемости трещиноватых пористых систем до 50 % Improvement of permeability of fractured porous systems up to 50 %	0,05 Гц/Hz	20–1800 сек/seconds	Эксперимент (берейский песчаник; $1\text{--}1,6 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$) Experiment (Berea sandstone; $1\text{--}1,6 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$)	[41]
Повышение проницаемости образцов на ~5 % Increase in sample permeability by ~5 %	22 кГц (80 Вт) 22 kHz (80 W)	–	Моделирование (образцы из стеклошариков: проницаемость – 30, 38, 43 Д) Modelling (glass bead samples: permeability – 30, 38, 43 D)	[48]
Восстановление проницаемости образцов на 80, 42, 87, 81 % и удаление неорганических отложений Restoration of sample permeability by 80, 42, 87, 81 % and removal of inorganic deposits	22 кГц (1000 Вт) 22 kHz (1000 W)	до 80 минут up to 80 minutes	Эксперимент (низкопроницаемые керны: 20, 30–100, 100–700, >1000 мД) Experiment (low-permeability cores: 20, 30–100, 100–700, >1000 mD)	[60]
Повышение проницаемости; увеличение дебита скважин в 3 раза (комбинация ультразвукового и химического методов) Increase of permeability; increase of well flow rate by 3 times (combination of ultrasonic and chemical methods)	25 кГц (5–10 кВт) 25 kHz (5–10 kW)	10 месяцев/months	Промысел (пласты с проницаемостью 20 мД и пористостью 15 %) Field (reservoirs with permeability of 20 mD and porosity of 15 %)	[65]
Повышение проницаемости пласта; увеличение дебита скважин в 2–8 раз (комбинация волнового метода и внутрипластового горения) Increase of formation permeability; increase of well flow rate by 2–8 times (combination of wave method and in-situ combustion)	1000 Гц/Hz 2000 Гц/Hz 2800 Гц/Hz	36 месяцев/months	Промысел (пласт песчаника с проницаемостью 500 мД и пористостью 20–35 %) Field (sandstone formation with permeability 500 mD and porosity 20–35%)	[67]
Повышение проницаемости и очистка пласта от химической обработки Increase of permeability and cleaning the formation from chemical treatment	10–20 кГц (до 5 кВт) 10–20 kHz (up to 5 kW)	4–12 ч/hours	Эксперимент (модель пласта) Experiment (Reservoir model)	[70]
Повышение проницаемости; увеличение закачки и дебита скважин в 2 раза Increase of permeability; increase of injection and well flow rate by 2 times	5–30 кГц (10 кВт) 5–30 kHz (10 kW)	~14 месяцев ~ 14 months	Эксперимент и промысел (керна с сырой нефтью; 30, 80 и $150 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^2$) Experiment and field (cores with crude oil; 30, 80 and $150 \cdot 10^{-3} \text{ } \mu\text{m}^2$)	[74]

В данной работе обобщены исследования и практика применения методов и технических средств повышения нефтеотдачи пластов с точки зрения предотвращения выпадения органических и неорганических осадков под воздействием упругих волн, восстановления проницаемости насыщенных пористых сред, ультразвуковой де-

эмульсации/дегидратации, удаления пробок и различных отложений. Представлен широкий спектр работ по восстановлению проницаемости на образцах (кернax) с различным содержанием органических и неорганических примесей. Большинство работ подчеркивают положительное воздействие колебаний на процессы филь-

трации через такие среды. В частности, ультразвуковая технология воздействия на пласт имеет очевидные преимущества по сравнению с традиционными термическими и химическими методами добычи нефти. Ее применение повышает коэффициент извлечения при значительном снижении стоимости добычи, а простота конструкции и отсутствие загрязняющего фактора предоставляют ей большие перспективы. Для широкомасштабного применения таких технологий необходимо акцентировать внимание на следующем:

- практически все виды оптимизационных исследований механизма упругих волн на добычу нефти достигли больших успехов в лабораторных условиях и не были широкомасштабно применены к промышленной добыче нефти. Поскольку лабораторные эксперименты не в состоянии полностью повторить пластовые условия, необходимо увеличить количество промысловых испытаний;
- в настоящее время акустическая технология извлечения нефти играет большую роль только в низкопроницаемых пластах с высоковязкой нефтью. В будущем необходимо рассматривать возможность применения этой технологии для извлечения нефти из сланцевых пород и при разра-

ботке сланцевого газа и метана угольных пластов. Данное направление развития имеет большие перспективы в будущем;

- ультразвуковая технология имеет большой эффект для увеличения добычи, но она ограничена радиусом действия. В будущих исследованиях необходимо рассматривать ультразвуковую технологию в сочетании с другими технологиями, например, с термическими методами и методами добычи нефти с использованием химических реагентов, для получения максимальной выгоды, а также проводить исследования в акустическом и инфразвуковом диапазоне частот;
- помимо положительных эффектов воздействия (успешности порядка 80 %), проявляются также и отрицательные результаты. Поэтому актуальной задачей в будущем является необходимость изучить причины и выявить условия снижения проницаемости пористых сред и увеличения вязкости нефтей для оптимизации режимов воздействия на жидкие и пористые среды.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01174, <https://rscf.ru/project/22-29-01174/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Venkittaraman A., Roberts P.M., Sharma M.M. Ultrasonic removal of near-wellbore damage caused by fines and mud solids // SPE Drilling & Completion. – 1995. – V. 10. – P. 193–197. DOI: 10.2118/27388-PA
2. Selective ultrasonic treatment of perforation zones in horizontal oil wells for water cut reduction / V.O. Abramov, A.V. Abramova, V.M. Bayazitov, A.V. Marnosov, S.P. Kuleshov, A.S. Gerasin // Applied Acoustics. – 2016. – V. 103. – P. 214–220. DOI: 10.1016/j.apacoust.2015.06.017
3. Shedid S.A. An ultrasonic irradiation technique for treatment of asphaltene deposition // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2004. – V. 42. – P. 57–70. DOI: 10.1016/j.petrol.2003.11.001
4. Wang Z., Xu Y. Review on application of the recent new high-power ultrasonic transducers in enhanced oil recovery field in China // Energy. – 2015. – V. 89. – P. 259–267. DOI: 10.1016/j.energy.2015.07.077
5. Permeability recovery of damaged water sensitive core using ultrasonic waves / N. Khan, C. Pu, X. Li, Y. He, L. Zhang, C. Jing // Ultrasonics Sonochemistry. – 2017. – V. 38. – P. 381–389. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2022.105949
6. Zhenjun W., Yuanming X., Bajracharya S. Research status and development trend of ultrasonic oil production technique in China // Ultrasonics Sonochemistry. – 2015. – V. 26. – P. 1–8. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2015.01.014
7. Wang Z., Huang J. Research on removing reservoir core water sensitivity using the method of ultrasound-chemical agent for enhanced oil recovery // Ultrasonics Sonochemistry. – 2018. – V. 42. – P. 754–758. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.12.046
8. Сургучев М.И. Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи пластов. – М.: Недра, 1985. – 308 с.
9. Волновые технологии и их использование при разработке месторождений нефти с трудноизвлекаемыми запасами / В.П. Дыбленко, Е.Ю. Марчуков, И.А. Туфанов, Р.Я. Шарифуллин, В.С. Евченко. – М.: РАЕН, 2012. – 344 с.
10. Кузнецов О.Л., Ефимова С.А. Применение ультразвука в нефтяной промышленности. – М.: Недра, 1983. – 192 с.
11. Гатауллин Р.Н., Кадыйров А.И. Интенсификация добычи нефти методами волнового воздействия на продуктивные пласты // Научные труды НИПИНефтегазГНКАР. – 2020. – № 2. – С. 78–90. DOI: 10.5510/OGP20200200434
12. Application of ultrasonic treatment for demulsification of stable water-in-oil emulsions / Y. Romanova, T. Maryutina, N. Musina, B. Spivakova // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – V. 209. – 109977. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.109977
13. Study on frequency optimization and mechanism of ultrasonic waves assisting water flooding in low-permeability reservoirs / X. Li, C. Pu, X. Chen, F. Huang, H. Zheng // Ultrasonics Sonochemistry. – 2021. – V. 70. – 105291. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2020.105291
14. Razavifar M., Qajar J. Experimental investigation of the ultrasonic wave effects on the viscosity and thermal behaviour of an asphaltene crude oil // Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. – 2020. – V. 153. – 107964. DOI: /10.1016/j.ccep.2020.107964
15. The mechanism of ultrasonic irradiation effect on viscosity variations of heavy crude oil / J. Gao, C. Li, D. Xu, P. Wu, W. Lin, X. Wang // Ultrasonics Sonochemistry. – 2021. – V. 81. – 105842. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2021.105842
16. Hua Q. Experimental studies on viscosity reduction of heavy crude oil by ultrasonic irradiation // Acoustical Physics. – 2020. – V. 66 (5). – P. 495–500. DOI: 10.1134/S106377102005005X
17. Features of rheological behavior of crude oil after ultrasonic treatment / A. Kadyirov, J. Karaeva, E. Barskaya, E. Vachagina // Brazilian Journal of Chemical Engineering. – 2022. DOI: 10.1007/s43153-022-00226-6
18. Hamidi H., Ephraim A.S.H., Otumudia W. Recent applications of ultrasonic waves in improved oil recovery: a review of techniques and results // Ultrasonics. – 2021. – V. 110. – 106288. DOI: 10.1016/j.ultras.2020.106288
19. Adeyemi I., Meribout M., Khezzer L. Recent developments, challenges, and prospects of ultrasound-assisted oil technologies // Ultrasonics Sonochemistry. – 2022. – V. 82. – 105902. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2021.105902
20. Changes in permeability caused by transient stresses: field observations, experiments, and mechanisms / M. Manga, I. Beresnev, E.E. Brodsky, J.E. Elkhoury, D. Elsworth, S.E. Ingebritsen, D.C. Mays, C.-Y. Wang // Reviews of Geophysics. – 2012. – V. 50 (2). – RG 2004. DOI: 10.1029/2011RG000382
21. Optimization of acoustic parameters for ultrasonic separation of emulsions with different physical properties / X. Luo, H. Gong, H. Yin, Z. He, L. He // Ultrasonics Sonochemistry. – 2020. – V. 68. – 105221. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2020.105221
22. Исследование влияния температуры и скорости течения на вязкость нефтяных эмульсий / И.Ш. Мингулов, М.Д. Валеев,

- В.В. Мухаметшин, Ш.Г. Мингулов, Л.С. Кулешова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 10. – С. 69–76. DOI: 10.18799/24131830/2021/10/3029
23. Поплыгин В.В., Уирсигроч М. Исследование эффективности комплексного нестационарного воздействия на залежь с высковазкой нефтью // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 1. – С. 7–12. DOI: 10.18799/24131830/2021/10/3029
24. Experimental and mechanism study: partially hydrolyzed polyacrylamide gel degradation and deplugging via ultrasonic waves and chemical agents / N. Khan, J. Pu, C. Pu, H. Xu, X. Gu, Z. Lei, F. Huang, M.A. Nasir, R. Ullah // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2019. – V. 56. – P. 350–360. DOI: 10.1016/j.ulsonch.2019.04.018
25. Xu H., Pu C. Experimental study of heavy oil underground aquathermolysis using catalyst and ultrasonic // *Journal of Fuel Chemistry and Technology*. – 2011. – V. 39. – P. 606–610. DOI: 10.1016/S1872-5813(11)60037-6
26. Meribout M. On using ultrasonic-assisted Enhanced Oil Recovery (EOR): recent practical achievements and future prospects // *IEEE Access*. – 2018. – V. 6. – P. 51110–51118. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2859774
27. Ultrasound-assisted CO₂ flooding to improve oil recovery / H. Hamidi, A.H. Sharifi, E. Mohammadian, R. Rafati, A. Azdarpour, P. Ghahri, P. Ombewa, T. Neuert, A. Zink // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2017. – V. 35. – P. 243–250. DOI: 10.1016/j.ulsonch.2016.09.026
28. Comparative study of ultrasound assisted water and surfactant flooding/ A. Agi, R. Junin, R. Shirazi, G. Afeez, N. Yekeen // *Journal of King Saud University, Engineering Sciences*. – 2019. – V. 31. – P. 296–303. DOI: 10.1016/j.jksues.2018.01.002 1018-3639
29. Effects of sonication radiation on oil recovery by ultrasonic waves stimulated water-flooding / E. Mohammadian, R. Junin, O. Rahmani, A.K. Idris // *Ultrasonics*. – 2013. – V. 53. – P. 607–614. DOI: 10.1016/j.ultras.2012.10.006
30. Oil recovery enhancement in low permeable and severe heterogeneous oil reservoirs via gas and foam flooding / P. Wei, W. Pu, L. Sun, Y. Pu, S. Wang, Z. Fang // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2018. – V. 163. – P. 340–348. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.01.011
31. Dongqi W., Daiyin Y., Yazhou Z. Fine classification of ultra-low permeability reservoirs around the Placanticline of Daqing oilfield (PR of China) // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – V. 174. – P. 1042–1052. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.12.008
32. The visual and quantitative study of remaining oil micro-occurrence caused by spontaneous imbibition in extra-low permeability sandstone using computed tomography / X. Gu, C. Pu, N. Khan, F. Wu, F. Huang, H. Xu // *Fuel*. – 2019. – V. 237. – P. 152–162. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.09.014
33. Teichgraeber H., Brandt A.R. Clustering methods to find representative periods for the optimization of energy systems: an initial framework and comparison // *Applied Energy*. – 2019. – V. 239. – P. 1283–1293. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.02.012
34. Luchi D., Loureiro R.A., Varejao F.M. Sampling approaches for applying DBSCAN to large datasets // *Pattern Recognition Letters*. – 2019. – V. 117. – P. 90–96. DOI: 10.1016/j.patrec.2018.12.010
35. Taheri-Shakib J., Shekarifard A., Naderi H. The experimental investigation of effect of microwave and ultrasonic waves on the key characteristics of heavy crude oil // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2017. – V. 128. – P. 92–101. DOI: 10.1016/j.jaap.2017.10.021
36. Agi A., Junin R., Chong A.S. Intermittent ultrasonic wave to improve oil recovery // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2018. – V. 166. – P. 577–591. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.03.097
37. Wang Z., Fang R., Guo H. Advances in ultrasonic production units for enhanced oil recovery in China // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2020. – V. 60. – P. 104791. DOI: 10.1016/j.ulsonch.2019.104791
38. Experimental investigation of ultrasonic treatment effectiveness on pore structure / A. Ghamartale, M. Escrochi, M. Riazi, A. Faghih // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2019. – V. 51. – P. 305–314. DOI: 10.1016/j.ulsonch.2018.10.002
39. Michlmayr G., Cohen D., Or D. Sources and characteristics of acoustic emissions from mechanically stressed geologic granular media – a review // *Earth-Science Reviews*. – 2012. – V. 112. – P. 97–114. DOI: 10.1016/j.earscirev.2012.02.009
40. Simulation of the crack development in coal without confining stress under ultrasonic wave treatment / Q. Shi, Y. Qin, J. Li, Z. Wang, M. Zhang, X. Song // *Fuel*. – 2017. – V. 205. – P. 222–231. DOI: 10.1016/J.FUEL.2017.05.069
41. Laboratory observations of permeability enhancement by fluid pressure oscillation of in situ fractured rock / J.E. Elkhoury, A. Niemeijer, E.E. Brodsky, C. Marone // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2011. – V. 116 (B2). – P. B02311. DOI: 10.1029/2010JB007759
42. Johnson D.L., Koplik J., Dashen R. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1987. – V. 176. – P. 379–402. DOI: 10.1017/S0022112087000727
43. Рябконов Е.П. Методика прогнозирования изменения дебита добывающих скважин при распространении упругих колебаний в призабойной зоне терригенных коллекторов // *Нефтяное хозяйство*. – 2020. – № 6. – С. 76–78. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-6-66-79
44. Flow rate dictates permeability enhancement during fluid pressure oscillations in laboratory experiments / T. Candela, E.E. Brodsky, C. Marone, D. Elsworth // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2015. – V. 120 (4). – P. 2037–2055. DOI: 10.1002/2014JB01151
45. Ultrasonic wave attenuation dependence on saturation in tight oil siltstones / J. Ba, R. Ma, J.M. Carcione, S. Picotti // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – V. 179. – P. 1114–1122. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.04.099
46. Simulation of fluid flow in the pore space of the core obtained by x-ray microtomography / E. Marfin, D. Chachkov, A. Abdrashitov, A. Kadyrov // *AIP Conference Proceedings: Computational Mechanics and Modern Applied Software Systems (CMMASS2019)*. – 2019. – 020013. DOI: 10.1063/1.5135673
47. Investigating the role of ultrasonic wave on two-phase relative permeability in a free gravity drainage process / B. Keshavarzi, R. Karimi, I. Najafi, C. Ghotbi, M.H. Ghazanfari // *Scientia Iranica, Transaction C: Chemistry & Chemical Engineering*. – 2014. – V. 21. – P. 763–771.
48. Arabzadeh H., Amani M. Application of a novel ultrasonic technology to improve oil recovery with an environmental viewpoint // *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*. – 2017. – V. 8. – Iss. 2. – P. 1000323. DOI: 10.4172/2157-7463.1000323
49. Dynamic stressing of naturally fractured rocks: on the relation between transient changes in permeability and elastic wave velocity / P. Shokouhi, J. Jin, C. Wood, J. Riviere, B. Madara, D. Elsworth, C. Marone // *Geophysical Research Letters*. – 2020. – V. 47 (116). – e2019GL083557. DOI: 10.1029/2019GL083557
50. Permeability evolution during shear zone initiation in low-porosity rocks / C. Kluge, G. Blöcher, A. Barnhoorn, J. Schmittbuhl, D. Bruhn // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2021. – V. 54 (10). – P. 5221–5244. DOI: 10.1007/s00603-020-02356-0
51. Maximov G.A., Radchenko A.V. Modeling of the intensification of oil production by an acoustic action on the oil pool from the borehole // *Acoustical Physics*. – 2005. – V. 51. – P. 118–131. DOI: 10.1134/1.2133958
52. Metelev I., Marfin E. Changes in the properties of a porous medium by ultrasound exposure. 6th Scientific Conference. Tyumen, European Association of Geoscientists and Engineers (EAGE), 2019. 148133. DOI: 10.3997/2214-4609.201900559
53. Ezenweichu C.L., Laditan O.D. The causes, effects and minimization of formation damage in horizontal wells // *Petroleum and Coal*. – 2015. – V. 57. – P. 169–184.
54. Liu Q., Zhao B., Santamarina J.C. Particle migration and clogging in porous media: a convergent flow microfluidics study // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2019. – V. 124 (9). – P. 9495–9504. DOI: 10.1029/2019JB017813
55. Water sensitivity of sandstones containing swelling and non-swelling clays / K.K. Mohan, R.N. Vaidya, M.G. Reed, H.S. Fogler // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 1993. – V. 73. – P. 237254. DOI: 10.1016/0927-7757(93)80019-B
56. Mullakaev M.S., Abramov V.O., Abramova A.V. Ultrasonic automated oil well complex and technology for enhancing marginal well productivity and heavy oil recovery // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2017. – V. 159. – P. 1–7. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.09.019

57. Moshin M., Meribout M. Antenna array design for enhanced oil recovery under oil reservoir constraints with experimental validation // *Energy*. – 2016. – V. 66. – P. 868–880. DOI: 10.1016/j.energy.2014.01.002
58. Roberts P.M., Adinathan V., Sharma M.M. Ultrasonic removal of organic deposits and polymer-induced formation damage // *SPE Drilling & Completion*. – 2000. – V. 15. – P. 19–24. DOI: 10.2118/62046-PA
59. High-power/high-frequency acoustic stimulation: a novel and effective wellbore stimulation technology / S.-W. Wong, F. van der Bas, P. Zuiderwijk, B. Birchak, W. Han, K. Yoo, D. van Batenburg // *SPE Production & Facilities*. – 2004. – V. 19. – P. 183–188. DOI:10.2118/84118-MS
60. Using ultrasonic as a new approach for elimination of inorganic scales (NaCl): an experimental study / J. Taheri-Shakib, H. Naderi, Y. Salimidelshad, A. Teymouri, A. Shekarifard // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2018. – V. 8. – P. 553–564. DOI: 10.1007/s13202-017-0369-4
61. Alhomadhi E., Amro M., Almobarkey M. Experimental application of ultrasound waves to improved oil recovery during waterflooding // *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. – 2014. – V. 26 (1). – P. 103–110. DOI: 10.1016/j.jksues.2013.04.002
62. Кузнецов О.Л., Симкин Э.М., Чилингар Дж. Физические основы вибрационного и акустического воздействия на нефтяные пласты. – М.: Мир, 2001. – 260 с.
63. Beresnev I.A., Johnson P.A. Elastic-wave stimulation of oil production: a review of methods and results // *Geophysics*. – 1994. – V. 59 (6). – P. 1000–1017. DOI: 10.1190/1.1443645
64. Seismic waves could decrease the permeability of the shallow crust / Y. Shi, X. Liao, D. Zhang, C.-P. Liu // *Geophysical Research Letters*. – 2019. – V. 46 (12). – P. 6371–6377. DOI: 10.1029/2019GL081974
65. Ultrasonic technology for enhanced oil recovery from failing oil wells and the equipment for its implementation / V.O. Abramov, M.S. Mullakaev, A.V. Abramova, I.B. Esipov, T.J. Mason // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2013. – V. 20. – P. 1289–1295. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2013.03.004
66. Дорфман М.Б., Сентемов А.А. Влияние фильтрационно-емкостных свойств призабойной зоны пласта на эффективность кислотной обработки // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 2. – С. 124–130. DOI: 10.18799/24131830/2020/2/2488
67. Elastic-wave effect on oil production by in situ combustion: field results / E.A. Marfin, Y.I. Kravtsov, A.A. Abdrashitov, R.N. Gataullin, A.R. Galimzyanova // *Petroleum Science and Technology*. – 2015. – V. 33 (15–16). – P. 1526–1532. DOI: 10.1080/10916466.2015.1037923
68. Гатауллин Р.Н. Технические средства волнового воздействия на продуктивные пласты // *Технологии нефти и газа*. – 2021. – № 2 (133). – С. 34–41. DOI: 10.32935/1815-2600-2021-133-2-34-41
69. Манжай В.Н., Ульянюк М.П., Рождественский Е.А. Перспективная технология для увеличения нефтеотдачи на месторождениях с разной проницаемостью пластов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 9. – С. 92–99. DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3356
70. Исследование ультразвукового воздействия на нефтяной пласт / Д.Н. Гуляев, Н.Е. Лазуткина, Ю.Ф. Жуйков, А.В. Ильинский, А.А. Рухман, А.Е. Шиканов, Е.А. Шиканов // *Нефтяное хозяйство*. – 2018. – № 8. – С. 60–63. DOI: 10.24487/0028-2448-2018-8-60-63
71. Mullakaev M.S., Abramov V.O., Abramova A.V. Ultrasonic piezoceramic module and technology for stimulating low-productivity wells // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2017. – V. 158. – P. 529–534. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.08.067
72. Опыт применения ультразвукового воздействия для восстановления продуктивности нефтяных скважин Западной Сибири и Самарской области / В.О. Абрамов, М.С. Муллакаев, В.М. Баязитов, Э.О. Тимашев, С.П. Кулешов, В.О. Прокопцев // *Нефтепромысловое дело*. – 2013. – № 6. – С. 26–31.
73. Дрягин В.В. Использование вызванной акустической эмиссии коллекторов для обнаружения и извлечения углеводородов // *Георесурсы*. – 2018. – Т. 20. – № 3 (2). – С. 246–260. DOI: 10.18599/grs.2018.3.246-260
74. Technology of removing near wellbore inorganic scale damage by high power ultrasonic treatment / C. Pu, D. Shi, S. Zhao, H. Xu, H. Shen // *Petroleum Exploration and Development*. – 2011. – V. 38 (2). – P. 243–248. DOI: 10.1016/S1876-3804(11)60030-X
75. Анализ существующего акустического оборудования и технологий его применения для повышения нефтеотдачи / М.С. Муллакаев, А.А. Салтыков, Ю.А. Салтыков Р.М. Муллакаев, А.Р. Раянов, В.Г. Прачкин // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. – 2019. – № 10. – С. 60–70. DOI: 10.30713/2413-5011-2019-10(334)-60-70
76. Математическое моделирование ультразвукового излучателя резонансного типа для подготовки высоковязкой нефти к транспорту / А.А. Азин, Е.П. Богданов, Н.Н. Марицкий, С.А. Пономарев, С.В. Пономарев // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 161–169. DOI: 10.18799/24131830/2021/11/3433
77. Marfin E.A., Gataullin R.N., Abdrashitov A.A. Acoustic stimulation of oil production by a downhole emitter based on a jet-driven Helmholtz oscillator // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – 110705. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.110705
78. Abdrashitov A.A., Marfin E.A. Short cylindrical nozzles in a jet-driven Helmholtz oscillator // *Physics of Fluids*. – 2020. – V. 32 (7). – 077103. DOI: 10.1063/5.0006845

Поступила 27.06.2022 г.

Прошла рецензирование 14.07.2022 г.

Информация об авторах

Гатауллин Р.Н., кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории теплофизики и волновых технологий Института энергетики и перспективных технологий ФИЦ Казанский научный центр РАН.

Галимзянова А.Р., младший научный сотрудник лаборатории теплофизики и волновых технологий Института энергетики и перспективных технологий ФИЦ Казанский научный центр РАН.

Марфин Е.А., кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории теплофизики и волновых технологий Института энергетики и перспективных технологий ФИЦ Казанский научный центр РАН.

UDC 622.276.6: 622.245.54

ACOUSTIC INFLUENCE EFFECT ON POROUS MEDIA PERMEABILITY (REVIEW)

Rustem N. Gataullin¹,
rustem.acadrome@mail.ru

Aliya R. Galimzyanova¹,
galimzyanova_aliy@mail.ru

Evgeny A. Marfin¹,
marfin_ea@mail.ru

¹ Institute of Power Engineering and Advanced Technologies, FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 2-31, Lobachevsky street, Kazan, 420111, Russia.

The relevance of the work is caused by the need to solve the problems arising in the development of oil fields: reducing the production rate; deterioration of reservoir filtration properties; increasing water cut of produced oil. The impact on the formation of elastic vibrations in a wide frequency range is considered a promising technology to stimulate and increase oil production. However, the large-scale introduction of such methods is constrained by insufficient understanding of the physics of the processes involved. **Objective:** to identify mechanisms of improving the permeability of porous media and reservoirs under acoustic influence on them based on theoretical and experimental studies, field tests; to identify priorities for future scientific and practical developments in the application of acoustic technologies to intensify oil production. **Methods:** analysis of the results of laboratory studies and generalization of experience in the application of acoustic and ultrasonic impact methods on productive formations to intensify oil production. **Objects:** productive formations of oil fields; contaminated bottomhole zone of wells; samples of porous medium from terrigenous and carbonate reservoirs. **Results.** The paper introduces the review of the results of theoretical, laboratory, and field studies of methods to improve the efficiency of oil production due to the wave action on the environment by elastic oscillations. The authors analyzed the phenomena occurring during this action in the productive formation. It is noted that most studies in this area refer to the ultrasonic exposure and mainly in laboratory conditions. The paper considers the phenomenon leading to increase in porous media permeability under this impact. In particular, the propagation of elastic vibrations contributes to the prevention of deposition of organic and inorganic sediments, restoration and increase of permeability of saturated porous media, removal of plugs and various deposits in carbonate and terrigenous reservoirs. The directions of promising research are formulated; recommendations for improving oil production through acoustic impact are given. The conducted analysis and generalization confirm that the impact of elastic oscillations in a wide range of frequencies activates various chemical and physical processes, affects the filtration-capacitive properties of productive formations and contributes to oil production intensification.

Key words:

Permeability, porous medium, elastic waves, ultrasound, oil, cores, oil production.

The research was funded with the grant of the Russian Science Foundation no. 22-29-01174, <https://rscf.ru/project/22-29-01174/>.

REFERENCES

- Venkitaraman A., Roberts P.M., Sharma M.M. Ultrasonic removal of near-wellbore damage caused by fines and mud solids. *SPE Drilling & Completion*, 1995, vol. 10, pp. 193–197, SPE 27388. DOI: 10.2118/27388-PA
- Abramov V.O., Abramova A.V., Bayazitov V.M., Marnosov A.V., Kuleshov S.P., Gerasin A.S. Selective ultrasonic treatment of perforation zones in horizontal oil wells for water cut reduction. *Applied Acoustics*, 2016, vol. 103, pp. 214–220. DOI: 10.1016/j.apacoust.2015.06.017
- Shedid S.A. An ultrasonic irradiation technique for treatment of asphaltene deposition. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2004, vol. 42, pp. 57–70. DOI: 10.1016/j.petrol.2003.11.001
- Wang Z., Xu Y. Review on application of the recent new high-power ultrasonic transducers in enhanced oil recovery field in China. *Energy*, 2015, vol. 89, pp. 259–267. DOI: 10.1016/j.energy.2015.07.077
- Khan N., Pu C., Li X., He Y., Zhang L., Jing C. Permeability recovery of damaged water sensitive core using ultrasonic waves. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, vol. 38, pp. 381–389. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2022.105949
- Zhenjun W., Yuanming X., Bajracharya S. Research status and development trend of ultrasonic oil production technique in China. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2015, vol. 26, pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2015.01.014
- Wang Z., Huang J. Research on removing reservoir core water sensitivity using the method of ultrasound-chemical agent for enhanced oil recovery. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, vol. 42, pp. 754–758. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.12.046
- Surguchev M.L. *Vtorichnye i tretichnye metody uvelicheniya nefteodachi plastov* [Secondary and tertiary methods of enhanced oil recovery]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 308 p.
- Dyblenko V.P., Marchukov E.Yu., Tufanov I.A., Sharifullin R.Ya., Evchenko V.S. *Volnovye tekhnologii i ikh ispolzovanie pri razrabotke mestorozhdeni ynefti s trudnoizvlekaemymi zapasami* [Wave technologies and their use in the development of oil fields with hard-to-recover reserves]. Moscow, RAEN Publ., 2012. 344 p.
- Kuznetsov O.L., Efimova S.A. *Primenenie ultrazvuka v nefyanyy promyshlennosti* [The use of ultrasound in the oil industry]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 192 p.
- Gataullin R.N., Kadiyrov A.I. Intensifying oil extraction by wave action methods on productive layers. *SOCAR Proceedings*, 2020, no. 2, pp. 78–90. In Rus. DOI: 10.5510/OGP20200200434
- Romanova Y., Maryutina T., Musina N., Spivakova B. Application of ultrasonic treatment for demulsification of stable water-in-oil emulsions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 209, 109977. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.109977
- Li X., Pu C., Chen X., Huang F., Zheng H. Study on frequency optimization and mechanism of ultrasonic waves assisting water flooding in low-permeability reservoirs. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 70, 105291. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2020.105291
- Razavifar M., Qajar J. Experimental investigation of the ultrasonic wave effects on the viscosity and thermal behaviour of an asphaltic crude oil. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 2020, vol. 153, 107964. DOI: 10.1016/j.ccep.2020.107964

15. Gao J., Li C., Xu D., Wu P., Lin W., Wang X. The mechanism of ultrasonic irradiation effect on viscosity variations of heavy crude oil. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 81, 105842. DOI: 10.1016/j.ulsonch.2021.105842
16. Hua Q. Experimental studies on viscosity reduction of heavy crude oil by ultrasonic irradiation. *Acoustical Physics*, 2020, vol. 66 (5), pp. 495–500. DOI: 10.1134/S106377102005005X
17. Kadyrov A., Karaeva J., Barskaya E., Vachagina E. Features of rheological behavior of crude oil after ultrasonic treatment. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2022. DOI: 10.1007/s43153-022-00226-6
18. Hamidi H., Ephraim A.S.H., Otumudia W. Recent applications of ultrasonic waves in improved oil recovery: a review of techniques and results. *Ultrasonics*, 2021, vol. 110, 106288. DOI: 10.1016/j.ultras.2020.106288
19. Adeyemi I., Meribout M., Khezzer L. Recent developments, challenges, and prospects of ultrasound-assisted oil technologies. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, vol. 82, 105902. DOI: 10.1016/j.ulsonch.2021.105902
20. Manga M., Beresnev I., Brodsky E.E., Elkhoury J.E., Ingebritsen S.E., Elsworth D., Mays D.C., Wang C.-Y. Changes in permeability caused by transient stresses: field observations, experiments, and mechanisms. *Reviews of Geophysics*, 2012, vol. 50, no. 2, RG 2004. DOI: 10.1029/2011RG000382
21. Luo X., Gong H., Yin H., He Z., He L. Optimization of acoustic parameters for ultrasonic separation of emulsions with different physical properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 68, 105221. DOI: 10.1016/j.ulsonch.2020.105221
22. Mingulov I.Sh., Valeev M.D., Mukhametshin V.V., Mingulov S.G., Kuleshova L.S. Study of temperature and flow rate influence on the viscosity of oil emulsions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 10, pp. 69–76. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2021/10/3029
23. Poplygin V.V., Wiercigroch M. Research of efficiency of complex non-stationary impact on layer with high-quality oil. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 1, pp. 7–12. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2021/10/3029
24. Khan N., Pu J., Pu C., Xu H., Gu X., Lei Z., Huang F., Nasir M.A., Ullah R. Experimental and mechanism study: Partially hydrolyzed polyacrylamide gel degradation and deplugging via ultrasonic waves and chemical agents. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, vol. 56, pp. 350–360. DOI: 10.1016/j.ulsonch.2019.04.018
25. Xu H., Pu C. Experimental study of heavy oil underground aquathermolysis using catalyst and ultrasonic. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2011, vol. 39, pp. 606–610. DOI: 10.1016/S1872-5813(11)60037-6
26. Meribout M. On using ultrasonic-assisted Enhanced Oil Recovery (EOR): recent practical achievements and future prospects. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 51110–51118. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2859774
27. Hamidi H., Sharifi A., Mohammadian E., Rafati R., Azdarpour A., Ghahri P., Ombewa P., Neuert T., Zink A. Ultrasound-assisted CO₂ flooding to improve oil recovery. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, vol. 35, pp. 243–250. DOI: 10.1016/j.ulsonch.2016.09.026
28. Agi A., Junin R., Shirazi R., Afeez G., Yekeen N. Comparative study of ultrasound assisted water and surfactant flooding. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 2019, vol. 31, pp. 296–303. DOI: 10.1016/j.jksues.2018.01.002 1018-3639
29. Mohammadian E., Junin R., Rahmani O., Idris A.K. Effects of sonication radiation on oil recovery by ultrasonic waves stimulated water-flooding. *Ultrasonics*, 2013, vol. 53, pp. 607–614. DOI: 10.1016/j.ultras.2012.10.006
30. Wei P., Pu W., Sun L., Pu Y., Wang S., Fang Z. Oil recovery enhancement in low permeable and severe heterogeneous oil reservoirs via gas and foam flooding. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 163, pp. 340–348. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.01.011
31. Dongqi W., Daiyin Y., Yazhou Z. Fine classification of ultra-low permeability reservoirs around the Placanticline of Daqing oilfield (PR of China). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 174, pp. 1042–1052. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.12.008
32. Gu X., Pu C., Khan N., Wu F., Huang F., Xu H. The visual and quantitative study of remaining oil micro-occurrence caused by spontaneous imbibition in extra-low permeability sandstone using computed tomography. *Fuel*, 2019, vol. 237, pp. 152–162. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.09.014
33. Teichgraber H., Brandt A.R. Clustering methods to find representative periods for the optimization of energy systems: an initial framework and comparison. *Applied Energy*, 2019, vol. 239, pp. 1283–1293. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.02.012
34. Luchi D., Loureiros Rodrigues A., Miguel Varejão F. Sampling approaches for applying DBSCAN to large datasets. *Pattern Recognition Letters*, 2019, vol. 117, P. 90–96. DOI: 10.1016/j.patrec.2018.12.010
35. Taheri-Shakib J., Shekarifard A., Naderi H. The experimental investigation of effect of microwave and ultrasonic waves on the key characteristics of heavy crude oil. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2017, vol. 128, pp. 92–101. DOI: 10.1016/j.jaap.2017.10.021
36. Agi A., Junin R., Chong A.S. Intermittent ultrasonic wave to improve oil recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 166, pp. 577–591. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.03.097
37. Wang Z., Fang R., Guo H. Advances in ultrasonic production units for enhanced oil recovery in China. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, vol. 60, 104791. DOI: 10.1016/j.ulsonch.2019.104791
38. Ghamartale A., Escrochi M., Riazhi M., Faghhi A. Experimental investigation of ultrasonic treatment effectiveness on pore structure. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, vol. 51, pp. 305–314. DOI: 10.1016/j.ulsonch.2018.10.002
39. Michlmayr G., Cohen D., Or D. Sources and characteristics of acoustic emissions from mechanically stressed geologic granular media – a review. *Earth-Science Reviews*, 2012, vol. 112, pp. 97–114. DOI: 10.1016/j.earscirev.2012.02.009
40. Shi Q., Qin Y., Li J., Wang Z., Zhang M., Song X. Simulation of the crack development in coal without confining stress under ultrasonic wave treatment. *Fuel*, 2017, vol. 205, pp. 222–231. DOI: 10.1016/J.FUEL.2017.05.069
41. Elkhoury J.E., Niemeijer A., Brodsky E.E., Marone C. Laboratory observations of permeability enhancement by fluid pressure oscillation of in situ fractured rock. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, vol. 116 (2), B02311. DOI: 10.1029/2010JB007759
42. Johnson D.L., Koplik J., Dashen R. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *Journal of Fluid Mechanics*, 1987, vol. 176, pp. 379–402. DOI: 10.1017/S0022112087000727
43. Riabokon E.P. Methodology for forecasting the oil rate change while elastic wave propagation in the near-wellbore zone of elastic reservoirs. *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*, 2020, no. 6, pp. 76–78. In Rus. DOI: 10.24487/0028-2448-2020-6-66-79
44. Candela T., Brodsky E.E., Marone C., Elsworth D. Flow rate dictates permeability enhancement during fluid pressure oscillations in laboratory experiments. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, vol. 120, no. 4, pp. 2037–2055. DOI: 10.1002/2014JB011511
45. Ba J., Ma R., Carcione J.M., Picotti S. Ultrasonic wave attenuation dependence on saturation in tight oil siltstones. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 179, pp. 1114–1122. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.04.099
46. Marfin E., Chachkov D., Abdrashitov A., Kadyrov A. Simulation of fluid flow in the pore space of the core obtained by x-ray microtomography. *AIP Conference Proceedings: Computational Mechanics and Modern Applied Software Systems (CMMASS'2019)*, 2019, 020013. DOI: 10.1063/1.5135673
47. Keshavarzi B., Karimi R., Najafi I., Ghotbi C., Ghazanfari M.H. Investigating the role of ultrasonic wave on two-phase relative permeability in a free gravity drainage process. *Scientia Iranica, Transaction C: Chemistry & Chemical Engineering*, 2014, vol. 21, pp. 763–771.
48. Arabzadeh H., Amani M. Application of a novel ultrasonic technology to improve oil recovery with an environmental viewpoint. *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*, 2017, vol. 8 (2), 1000323. DOI: 10.4172/2157-7463.1000323
49. Shokouhi P., Jin J., Wood C., Riviere J., Madara B., Elsworth D., Marone C. Dynamic stressing of naturally fractured rocks: on the relation between transient changes in permeability and elastic wave velocity. *Geophysical Research Letters*, 2020, vol. 47 (116), e2019GL083557. DOI: 10.1029/2019GL083557
50. Kluge C., Blöcher G., Barnhoorn A., Schmittbuhl J., Bruhn D. Permeability evolution during shear zone initiation in low-porosity rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, vol. 54 (10), pp. 5221–5244. DOI: 10.1007/s00603-020-02356-0

51. Maximov G.A., Radchenko A.V. Experimental studies on viscosity reduction of heavy crude oil by ultrasonic irradiation. *Acoustical Physics*, 2005, vol. 51, pp. 118–131. DOI: 10.1134/1.2133958
52. Metelev I., Marfin E. Changes in the properties of a porous medium by ultrasound exposure. *6th Scientific Conference*. Tyumen, European Association of Geoscientists and Engineers (EAGE), 2019. 148133. DOI: 10.3997/2214-4609.201900559
53. Ezenweichu C.L., Laditan O.D. The causes, effects and minimization of formation damage in horizontal wells. *Petroleum and Coal*, 2015, vol. 57, pp. 169–184.
54. Liu Q., Zhao B., Santamarina J.C. Particle migration and clogging in porous media: a convergent flow microfluidics study. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, vol. 124 (9), pp. 9495–9504. DOI: 10.1029/2019JB017813
55. Mohan K.K., Vaidya R.N., Reed M.G., Fogler H.S. Water sensitivity of sandstones containing swelling and non-swelling clays. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1993, vol. 73, 237254. DOI: 10.1016/0927-7757(93)80019-B
56. Mullakaev M.S., Abramov V.O., Abramova A.V. Ultrasonic automated oil well complex and technology for enhancing marginal well productivity and heavy oil recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 159, pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.09.019
57. Moshin M., Meribout M. Antenna array design for enhanced oil recovery under oil reservoir constraints with experimental validation. *Energy*, 2016, vol. 66, pp. 868–880. DOI: 10.1016/j.energy.2014.01.002
58. Roberts P.M., Adinathan V., Sharma M.M. Ultrasonic removal of organic deposits and polymer-induced formation damage. *SPE Drilling & Completion*, 2000, vol. 15, pp. 19–24. DOI: 10.2118/62046-PA
59. Wong S.-W., Van der Bas F., Zuidervijk P., Birchak B., Han W., Yoo K., Van Batenburg D. High-power/high-frequency acoustic stimulation: a novel and effective wellbore stimulation technology. *SPE Production & Facilities*, 2004, vol. 19, pp. 183–188. DOI: 10.2118/84118-MS
60. Taheri-Shakib J., Naderi H., Salimidelshad Y., Teymouri A., Shekarifard A. Using ultrasonic as a new approach for elimination of inorganic scales (NaCl): an experimental study. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2018, vol. 8, pp. 553–564. DOI: 10.1007/s13202-017-0369-4
61. Alhomadhi E., Amro M., Almobarky M. Experimental application of ultrasound waves to improved oil recovery during waterflooding. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 2014, vol. 26 (1), pp. 103–110. DOI: 10.1016/j.jksues.2013.04.002
62. Kuznetsov O.L., Simkin E.M., Chilingar J. *Fizicheskie osnovy vibratsionnogo i akusticheskogo vozdeystviya na neftegazovye plasty* [Physical bases of vibration and acoustic effects on oil reservoirs]. Moscow, Mir Publ., 2001. 260 p
63. Beresnev I.A., Johnson P.A. Elastic-wave stimulation of oil production: a review of methods and results. *Geophysics*, 1994, vol. 59 (6), pp. 1000–1017. DOI: 10.1190/1.1443645
64. Shi Y., Liao X., Zhang D., Liu C.-P. Seismic waves could decrease the permeability of the shallow crust. *Geophysical Research Letters*, 2019, vol. 46 (12), pp. 6371–6377. DOI: 10.1029/2019GL081974
65. Abramov V.O., Mullakaev M.S., Abramova A.V., Espipov I.B., Mason T.J. Ultrasonic technology for enhanced oil recovery from failing oil wells and the equipment for its implementation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2013, vol. 20, pp. 1289–1295. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2013.03.004
66. Dorfman M.B., Sentemov A.A. Influence of reservoir properties of the bottomhole zone on acidizing efficiency. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 2, pp. 124–130. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2020/2/2488
67. Marfin E.A., Kravtsov Y.I., Abdrashitov A.A., Gataullin R.N., Galimzyanova A.R. Elastic-wave effect on oil production by in situ combustion: field results. *Petroleum Science and Technology*, 2015, vol. 33 (15–16), pp. 1526–1532. DOI: 10.1080/10916466.2015.1037923
68. Gataullin R.N. Technical means of wave action on reservoirs. *Oil and gas technologies*, 2021, no. 2, pp. 34–41. In Rus. DOI: 10.32935/1815-2600-2021-133-2-34-41
69. Manzhay V.N., Ulyanyuk M.P., Rozhdestvensky E.A. Promising technology for enhanced oil recovery of oilfields with different reservoir permeability. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 92–99. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3356
70. Gulyaev D.N., Lazutkina N.E., Zhuikov Yu.F., Ilyinskiy A.V., Rukhman A.A., Shikanov A.E., Shikanov E.A. Research of ultrasonic treatment of an oil reservoir. *Oil Industry*, 2018, vol. 4, no. 8, pp. 60–63. In Rus. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-8-60-63
71. Mullakaev M.S., Abramov V.O., Abramova A.V. Ultrasonic piezoceramic module and technology for stimulating low-productivity wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 158, pp. 529–534. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.08.067
72. Abramov V.O., Mullakaev M.S., Bayazitov V.M., Timashev E.O., Kuleshov S.P., Prokoptsev V.O. Experience of using ultrasound technology to restore productivity of oil wells in West Siberia and Samara region. *Neftepromyslovoe delo*, 2013, no. 6, pp. 26–31. In Rus.
73. Dryagin V.V. Use of induced acoustic emission of reservoirs for the detection and recovery of hydrocarbons. *Georesources*, 2018, vol. 20, no. 3, P. 2, pp. 246–260. DOI: 10.18599/grs.2018.3.246-260
74. Pu C., Shi D., Zhao S., Xu H., Shen H. Technology of removing near wellbore inorganic scale damage by high power ultrasonic treatment. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, vol. 38 (2), pp. 243–248. DOI: 10.1016/S1876-3804(11)60030-X
75. Mullakaev M.S., Saltykov A.A., Saltykov Y.A., Mullakaev R.M., Rayanov A.R., Prachkin V.G. Analysis of the existing acoustic equipment and technologies of its application to enhanced oil recovery. *Geology, geophysics and development of oil and gas field*, 2019, no. 10, pp. 60–70. In Rus. DOI: 10.30713/2413-5011-2019-10(334)-60-70
76. Azin A.V., Bogdanov E.P., Maritsky N.N., Ponomarev S.A., Rikkonen S.V. Mathematical modeling of a resonant-type ultrasonic emitter for preparing high-viscosity oil for transport. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 161–169. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2021/11/3433
77. Marfin E.A., Gataullin R.N., Abdrashitov A.A. Acoustic stimulation of oil production by a downhole emitter based on a jet-driven Helmholtz oscillator. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 110705. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.110705
78. Abdrashitov A.A., Marfin E.A. Short cylindrical nozzles in a jet-driven Helmholtz oscillator. *Physics of Fluids*, 2020, vol. 32, no. 7, 077103. DOI: 10.1063/5.0006845

Received: 27 June 2022.

Reviewed: 14 July 2022.

Information about the authors

Rustem N. Gataullin, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Power Engineering and Advanced Technologies, FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences.

Aliya R. Galimzyanova, junior researcher, Institute of Power Engineering and Advanced Technologies, FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences.

Evgeny A. Marfin, Cand. Sc., leading researcher, Institute of Power Engineering and Advanced Technologies, FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences.