



SOCAR Proceedings

Reservoir and Petroleum Engineering

journal home page: <http://proceedings.socar.az>



ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ДОБЫЧИ НЕФТИ МЕТОДАМИ ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРОДУКТИВНЫЕ ПЛАСТЫ

Р.Н.Гатауллин*, А.И.Кадыров

*Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ
Казанский научный центр РАН, Казань, Россия*

Intensifying Oil Extraction by Wave Action Methods on Productive Layers

R.N.Gataullin, A.I.Kadyirov*

*Institute of Power Engineering and Advanced Technologies, FRC Kazan Scientific Center,
Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia*

Abstract

Article is devoted an actual problem of intensifying hydrocarbon extraction of through the use of wave technologies affecting on productive layers. The condition of wave action methods and means in the development of fields with hard-to-recover oil is given, their application features are revealed. The review was conducted in the field of researches of elastic wave influence on proceeding processes occurring in porous media and fluids contained in the rock. The special attention is given the integrated technology which consists in combining traditional enhanced oil recovery methods and wave action on the reservoir. Field test data and results of scientific and technical researches underline prospect of using wave technologies in the development of hydrocarbon fields.

Keywords:

Oil;
Wave action;
Emitter;
Well;
Frequency;
Elastic waves.

© 2020 «OilGasScientificResearchProject» Institute. All rights reserved.

Современное состояние технологий добычи углеводородов (УВ) определяется запасами, значительная часть которых – трудноизвлекаемые, в том числе природные битумы (ПБ) и высоковязкие нефти (ВВН). Если раньше эффективность освоения месторождений определялась на ранних этапах, то сейчас необходимы технологии на поздних стадиях разработки. На постсоветской территории наибольшие запасы с трудноизвлекаемой нефтью расположены в России, Казахстане и Азербайджане. Именно в этих странах при разработке нефтяных и битумных залежей все чаще используются новые и усовершенствованные методы воздействия на продуктивные пласты и призабойную зону. Для стабилизации добычи нефти возникла необходимость снизить обводненность скважин и интенсифицировать разработку малопроницаемых пластов и залежей нефти карбонатных коллекторов. Только широкомасштабное внедрение новых методов увеличения нефтеотдачи (МУН), существенно повышающих эффективность извлечения нефти, позволит стабилизировать и даже наращивать добычу нефти [1].

Одним из перспективных методов воздействия

на пласт является волновой, позволяющий более интенсивно воздействовать на застойные зоны и не вырабатываемые пласты. В результате волнового воздействия возможно увеличение приемистости, продуктивности и дебитов нагнетательных и добывающих скважин, а также межремонтного периода их работы. Распространение упругих волн может способствовать изменению реологических свойств насыщающих флюидов и уменьшению обводненности продукции, а при непрерывном волновом воздействии на продуктивный пласт замедляется или полностью приостанавливается процесс его коагуляции. Волновая обработка продуктивного пласта основана на специфических явлениях, происходящих в коллекторах пласта и в большей степени насыщающих их флюидов. В основном это нелинейные эффекты, в частности, искажение фронта волны, дисперсия и нелинейное поглощение энергии волн. В результате эти явления приводят к повышению проницаемости гомо- или гетерогенных систем [2].

Первые промышленные испытания применения акустических методов для обработки нефтяных месторождений в СССР приходятся на вторую половину 60-х годов XX века. Причем первым из этих методов был апробирован ультразвуковой метод. Ультразвуком принято определять

*E-mail: rustem.acadrome@mail.ru

<http://dx.doi.org/10.5510/OGP20200200434>

распространение упругих волн с частотой от $2 \cdot 10^4$ до 10^{13} Гц, а частоты от $1 \cdot 10^9$ Гц и выше относятся к гиперзвуковым волнам. Для генерации волн с такими частотами применяют механические или электромеханические излучатели, которые подразделяют на магнитострикционные и пьезоэлектрические [3].

Пионерами волнового воздействия на нефтяной пласт на постсоветском пространстве являются Духон и Кэмпбелл. В своих исследованиях они воздействовали на пористую среду волнами с частотами 45 и 65 кГц и выявили значительное снижение вязкости нефти. Авторы предположили, что ультразвуковая обработка способна значительно повысить коэффициент извлечения нефти (КИН) [4].

Отмечается интерес к развитию методов волнового воздействия на пласт как эффективной технологии повышения нефтеотдачи во всем мире [5]. В России, Китае, Канаде, США и Норвегии в исследованиях основное внимание уделяется процессам распространения упругих волн, пульсаций давления, вибросейсмическим технологиям в качестве новых методов увеличения нефтеотдачи, а также изучению механизмов влияния этих технологий на совершенствование добычи нефти и снижению обводненности месторождений. Звуковые волны также используют в нефтяной промышленности для оценки месторождений во время каротажа и сейсмической разведки, а также используются во многих других отраслях промышленности для очистки и удаления загрязняющих веществ [5].

Для оценки применения и выбора параметров волнового воздействия необходимо учитывать звукопоглощение и звукоизоляцию при обработке гетерогенных систем. Звукопоглощение нефтяных пластов характеризуется пористостью и наличием каналов или капилляров, которые сообщаются между собой. Диаметр таких каналов не превышает 2 мм, а общая пористость по объему – не менее 70-75%. Также стоит учитывать свойства скелета пласта и содержание газов в порах, поскольку при этом значительно снижается уровень вибрации. Несомненным достоинством ультразвукового воздействия является способность излучать волны в виде узких направленных пучков. Благодаря высокой амплитуде звукового давления от излучателей, в жидкостях наблюдается кавитация (на том или ином уровне), т.е. формирование и схлопывание мельчайших пузырьков, которое сопровождается кратковременным кратным увеличением давления в исследуемом объеме. В связи с этим, ультразвуковые волны способны разбивать

крупные молекулы и твердые тела, находящиеся во флюидах. Также стоит отметить, что ультразвук способен интенсифицировать процессы диффузии, растворения и скорость протекания химических реакций [3, 6].

По мнению авторов [6, 7] при волновом воздействии наиболее значимыми являются следующие процессы: изменение пустотного пространства породы за счет образования новых путей фильтрации и увеличения проницаемости пород; изменение деформационных и прочностных свойств нефтяных коллекторов; интенсификация физико-химических взаимодействий между ингредиентами породы и жидкой фазы, которая содержится в порах коллектора, что в свою очередь приводит как к положительным, так и к отрицательным последствиям.

Нарушение эксплуатационных характеристик пласта является одной из основных проблем для введения в строй новых скважин. Нарушения могут происходить по нескольким причинам, в том числе закупорки капилляров и пор скелета пласта, выпадение осадков в пласте вследствие взаимодействия с буровым раствором, осаждение асфальтенов, проникновения механических частиц или наличие глины в продуктивных пластах. Эти негативные факторы в основном снижают рентабельность разработки месторождений и иногда увеличивают эксплуатационные расходы [8].

Экономическое сравнение традиционных методов с методом ультразвуковой волны показывает, что этот подход может быть вполне актуальным (таб.) [8]. При устранении кольматации призабойной зоны пласта в основном применяются промывка кислотой или локальный гидроразрыв пласта. Но существенными недостатками применяемых методов, в частности методов химического окисления, являются проблемы безопасности и загрязнения окружающей среды, образование коррозии и снижения эффективности применения традиционных методов добычи. Кроме того, недостатком считается потребность большого количества наземного оборудования, необходимость использования мощных нагнетательных насосов, высокие эксплуатационные издержки. В последние годы особое внимание уделяется альтернативным недорогим методам стимуляции скважин. Один из перспективных методов основан на технологии ультразвуковых волн [8].

Одним из компонентов тяжелой нефти и природных битумов является наличие асфальтенов, которые представляют собой высокомолекулярные дисперсные частицы. Из-за их наличия состав

Экономическое сравнение применяемых методов

Таблица

№	Метод	Повышение эффективности, раз	Стоимость, евро	Рентабельность
1	Кислотная обработка	2.5	12.400	4960
2	Гидроразрыв	6	22.350	3725
3	Ультразвуковое воздействие	2.4	8200	3417

высоковязкой нефти может регулярно меняться, что существенно снижает эффективность процесса добычи. Осаждение асфальтенов или асфальто-смолистых парафиновых отложений (АСПО) инициирует многочисленные проблемы при разработке месторождений за счет ухудшения проницаемости пласта, изменения смачиваемости нефтяного коллектора, засорения ствола скважины, а также значительного падения давления на забое эксплуатационной скважины. Для решения проблем, связанных с осаждением асфальтенов, в основном применяются механические и химические методы [1]. Относительно новый и перспективный способ - применение энергии ультразвука.

В последнее время все больше предпринимаются шаги по разработке новых методов с меньшим риском воздействия на продуктивные пласты. Одним из таких альтернатив является применение стимуляции звуковой (ультразвуковой) волны. Этот метод является перспективным, как новая технология стимуляции скважин, которая служит для повышения нефтеотдачи и для очистки призабойной зоны пласта. Известно, что распространение приложенных волн зависит от упругости, зернистости и плотности породы. Ультразвуковые волны создают колебания в пласте, что способствует добычи нефти за счет изменения капиллярных сил и адгезии между породой и пластовыми флюидами. Генерирование упругих волн на месторождениях может привести к ускорению гравитационного разделения газа, нефти и воды [9].

Методы волнового воздействия на пласт

Перечисленные волновые методы различаются главным образом не по природно-функциональному (т.е. происхождению, виду и назначению), а по технологическому (способу и параметрам генерирования и способу применения) признаку. Все они, независимо от природного или техногенного происхождения, являются частными случаями упругих волновых колебаний. В основе их действия лежат близкие механизмы влияния на среды, отличающиеся скоростью протекания процессов, зависящих от частоты и амплитуды колебаний. В нагнетательных скважинах, как правило, используются системы с регулированием потока жидкости, а в добывающих скважинах – системы со штанговым приводом.

Таким образом, волновое воздействие на пласт можно условно классифицировать в отдельные самостоятельные методы обработки нефтеносных пластов – акустические (ультразвуковые, гидравлические), ударно-волновые и вибросейсмические.

Акустические методы

В работе [10] на основе фундаментальных исследований гидродинамики и нелинейной гидроакустики отмечены принципиально новые гидроакустические эффекты: кратное увеличение скорости движения флюидов и газов в пористых средах и капиллярах; гидроакустическая кавитация на резонансных режимах, интенсификация

теплообмена, а также возможность упругих волн к самостоятельному усилению и фокусировке. При гидроакустическом воздействии волновыми генераторами, устанавливаемыми против продуктивного пласта (на насосно-компрессорной трубе (НКТ) или кабеле), возникает гидродинамическая и гидроакустическая кавитация, которая приводит к разрушению кольматирующих призабойную зону веществ, снижению вязкостно-пластических свойств нефти и образованию акустического давления в поровых каналах. Гидроакустическая технология ускоряет в несколько раз химические реакции и тепло-массообменные процессы в пористых жидких, газообразных и многофазных средах. В связи с этим, с высокой эффективностью ее можно будет сочетать с химико-физическими и химико-биологическими методами. При генерировании в призабойной зоне гидроакустических волн, технология позволяет поддерживать определенные волновые режимы. Отмечается, что направленный фильтрационный поток пластовых флюидов позволяет восстанавливать коллекторские свойства пласта, а также вовлекает в процесс ранее не работавшие пропластки, застойные зоны подошвы и кровли, что в результате приводит к повышению коэффициента нефтеизвлечения пласта [10].

Результаты промысловых испытаний гидроакустического воздействия на низкодебитные скважины месторождений Канады, Пермской области и Татарстана показали, что дебит повышается примерно в 1.5-2 раза. Также технология характеризуется низкой себестоимостью при воздействии на продуктивные пласты [11]. Родственной гидроакустическому воздействию является аэро-гидроакустическая обработка призабойной зоны пласта, которая применяется без использования компрессоров. Данная технология позволяет снижать забойное давление при одновременном повышении амплитудно-частотных параметров генератора [10].

В работах [12, 13] представлен модуль ультразвуковой обработки скважины и технология повышения нефтеотдачи, а также их промысловые испытания на нефтяных месторождениях России (Западная Сибирь и Самарская область) и США. Согласно [13], в период с 2010 по 2012 год было проведено более 100 обработок и среднее повышение объема добычи нефти составило 4.4 т/сут на месторождениях Западной Сибири и около 10 т/сут в Самарской области. Представлены результаты сравнения производительности эксплуатационных скважин при наличии и отсутствии ультразвукового воздействия. Получено, что ультразвуковая стимуляция приводит к увеличению индекса продуктивности скважины в среднем на 33%, а на некоторых участках достигнуто снижение обводненности до 5-10% [13].

Промысловые испытания эффективности ультразвукового скважинного устройства PSMS-102 проведены на месторождении высоковязкой нефти в Грин-Ривер (штат Юта, США) на нескольких низкопродуктивных скважинах [12]. Нефть на этом

месторождении относится к категории трудноизвлекаемых (плотность 940 кг/м^3) с высоким содержанием парафинов (47 масс.%) и высокой вязкостью (6800 мПа·с). Согласно [12], режим работы скважинного излучателя (время работы и мощность) определялся индивидуально для каждой скважины. При высоком соотношении газ-нефть перед насосом устанавливался сепаратор. Во избежание засорения порового пространства при добыче тяжелой нефти и предотвращения блокировки каналов процедуру озвучивания нефти проводили в периодическом режиме (30 минут в день).

Стимуляция скважин с использованием ультразвуковой технологии привела к дополнительной добыче 3500 баррелей в течение полугода. При испытании оборудования мощностью 10 кВт было обнаружено, что забойное давление (согласно измерениям каротажа) составило 2500-3000 кПа перед ультразвуковой обработкой и более 6000 кПа после ультразвуковой обработки. Среднее увеличение дебита нефти после ультразвуковой обработки скважин составило около 4.5 тонн (32.6 баррелей) в сутки, а продолжительность последствия - не менее 6 месяцев. Таким образом, приведенные результаты промысловых испытаний по восстановлению продуктивности скважин и увеличению нефтедобычи на месторождениях с различными геолого-физическими условиями путем ультразвукового воздействия указывают на высокую эффективность и перспективность предлагаемой технологии [12].

Волновое воздействие для обработки нефтяных залежей может осуществляться периодическими ударными волнами [14]. В данном случае излучатель (генератор) располагается в одной из скважин, а воздействие осуществляется на окружающие скважины месторождения. Авторами получено, что в ряде случаев наблюдалось увеличение нефтедобычи и уменьшение обводненности в добывающих скважинах. На примере месторождения Elk Hills в Калифорнии продолжительная обработка (около года) привела к возрастанию суммарного дебита по 73 скважинам (нефтедобыча) на 42% по сравнению с исходными показателями. В результате волнового воздействия также зафиксировано снижение доли воды в извлекаемой продукции при продолжающемся увеличении дебита нефти.

В работе [15] предлагается осуществлять метод импульсно-волнового воздействия с помощью гидравлического генератора. Устройство формирует импульсы давления в призабойной зоне скважины. Гидроимпульсы давления, воздействуя с определенной частотой повторения на насыщенную пористую среду, возбуждают в пласте волновые пакеты упругих затухающих колебаний определенной длительности. Параметры волновых пакетов (амплитуда и время воздействия) определяются как акустическими характеристиками пласта (добротностью, скоростью распространения и поглощения упругих волн, акустическим импедансом), так и амплитудно-частотными характеристиками гидроимпульсов

давления. Вследствие импульсно-волнового воздействия для продуктивного пласта формируется оптимальный уровень депрессии, который способствует процессу извлечения нефти и очистке призабойной зоны пласта. Для этого используется специальное насосное оборудование, позволяющее плавно варьировать давление на забое в широком диапазоне. В результате, совместное применение насоса и гидравлического генератора импульсов обеспечивает минимальное содержание коагулирующих веществ и оптимальный режим извлечения пластовых флюидов [15].

В работе [8] представлен новый метод ультразвукового улучшения добычи нефти на низкопродуктивных скважинах. Эта технология включает в себя размещение высокочастотного источника ультразвука в скважину для коротких обработок и последующего извлечения устройства, либо в качестве постоянного размещения для дискретного воздействия. Авторы пришли к выводу, что в скважинах, где проницаемость выше 20 мД, а пористость превышает 15%, ультразвуковая обработка может увеличить добычу нефти до 50%, а в некоторых случаях даже больше. А для скважин с более низкой проницаемостью и пористостью волновая обработка является менее успешной, но высокие дебиты скважин могут быть достигнуты при применении ультразвука в сочетании с химическими добавками при воздействии на пласт. Согласно данным авторов статьи, применение метода ультразвукового воздействия увеличило проницаемость призабойной зоны пласта. Продуктивность эксплуатационных скважин значительно возросла при совместной ультразвуковой и химической обработке пласта по сравнению с применением этих методов по-отдельности.

Ударно-волновые

В работе [16] предлагается метод ударно-волновой обработки (УВО) с целью очистки призабойной зоны скважин, который применяется на месторождениях Казахстана. Основой метода является применение специального устройства (задвиги с пневмоприводом), работа которой осуществляется в периодической работе вентиля на его открытие и закрытие, благодаря которому формируются волны разрежения. Эти волны распространяются по НКТ и призабойной зоне пласта, образуя периодические удары. Применение УВО совместно с химическими соединениями показало высокую эффективность в процессе очистки призабойной зоны от коагулирующих веществ. Периодичность гидроударов составляла всего несколько секунд и вибрационные колебания от ударов передаются по всей области обработки продуктивного пласта, тем самым повышая его проницаемость. Применяемая технология отмечается снижением эксплуатационных затрат на ремонт скважинного оборудования, а также отсутствие негативного воздействия на окружающую среду. В результате промысловых испытаний, за несколько лет приемистость нагне-

тательных скважин возросла в несколько раз (от 20 до 160 м³/сут). Помимо высоких показателей приемистости скважин и проницаемости продуктивного пласта, получено, что применение УВО в несколько раз дешевле использования метода гидроразрыва пласта (ГРП). Применение ГРП оказалось менее эффективным и экологически небезопасным методом [16].

К ударно-волновым методам воздействия также относится ударно-депресссионный (импlosionный) МУН, который характеризуется возможностью обработки продуктивного пласта в течение длительного периода времени, причем многократно и непрерывно. Для осуществления ударно-депресссионного метода необходимо переоборудовать штанговый насос, чтобы вначале организовать импульс депрессии, а затем и гидравлический удар с давлением. Эффективность ударно-депресссионного метода подтверждается его испытаниями на промыслах Тимано-Печорской провинции. Применение различных скважинных технических средств (генераторов) свидетельствует об эффективности их использования с целью повышения производительности и приёмистости скважин. Достоинством данного метода, кроме относительной простоты его осуществления, является непрерывная очистка призабойной зоны пласта [6, 17].

В работе [18] отмечается, что методы интенсификации добычи нефти при использовании энергии ударных волн являются перспективными и могут быть использованы во многих отраслях промышленности, особенно при решении проблемы повышения КИН. В качестве достоинств метода воздействия на пласт силовыми волнами можно выделить следующие: простота оборудования; повышение дебита флюидов вследствие повышения коллекторских свойств пласта; осуществление воздействия волнами по всему нефтяному коллектору; очистка НКТ. Развитие ударно-волновых методов воздействия на продуктивные пласты позволит составить альтернативу дорогим и техническим сложным методам, например таким, как гидроразрыв пласта или бурение горизонтально-разветвленных скважин.

Вибросейсмические

Вибросейсмическое воздействие в основном осуществляется двумя способами: -воздействие на призабойную зону скважины специальными скважинными техническими устройствами или поверхностными источниками вибрации, которая реализовывается через волноводы; - виброисточниками, которые осуществляют передачу сейсмической энергии на продуктивный пласт с поверхности через вышележащие породы.

Согласно исследованиям [19, 20] выявлено, что использование вибросейсмического воздействия наземными и скважинными источниками повышает коэффициент извлечения нефти на обводненных участках месторождений. Согласно проведённым виброобработкам на 16 эксплу-

атационных скважинах на месторождении «Песчаный-море» нефтегазодобывающего управления (НГДУ) «Гум адасы» зафиксировано увеличение приемистости скважин в 1.5-3 раза [20]. Наилучшая эффективность метода зафиксирована на многопластовых месторождениях, а также эффект последствия может достигать до года.

Сейсмоакустическое воздействие основывается на распространении упругих волн в нефтяных пластах. При прохождении упругих волн через пористую среду возникают следующие основные эффекты: - увеличение относительной фазовой проницаемости, причем у нефти она значительно больше по сравнению с водой; - изменяется структура порового пространства; - многократное повышение скорости и объемов вытеснения нефти водой. Продольные сейсмические колебания могут вызывать изменение объема среды (сжатие и растяжение), а поперечные наоборот и представляют собой колебания частиц, которые происходят перпендикулярно направлению распространения волны [6].

К примеру, сейсмоакустическое воздействие осуществлялось на Ромашкинском и Бавлинском месторождениях Республики Татарстан [21]. В качестве технического устройства воздействия применялся скважинный излучатель, который обеспечивал формирование коротких импульсов давления на частотном диапазоне от 20 до 300 Гц. Критерием оценки эффективности воздействия являлось изменение трещиноватости продуктивного пласта в радиусе нескольких километров от зоны воздействия. В результате промысловых испытаний, большинство добывающих скважин показали повышение нефтеотдачи, причем на некоторых скважинах объем дополнительно добытой нефти был выше изначальных показателей дебита. Наибольшие дебиты зафиксированы на скважинах, которые находились в зонах повышенной трещиноватости, а также со значительным снижением коэффициента водонасыщения добываемых пластовых флюидов [21].

В работе [22] представлен метод вибросейсмического воздействия на пласты с трудноизвлекаемыми УВ, осуществляемыми вибраторами, располагаемыми на земной поверхности. На месторождениях вибраторы устанавливаются в зонах между скважинами и создают интенсивность колебаний не более 0.1 кВт/м². Объектами воздействия полей упругих колебаний сейсмических частот были застойные зоны нефтяной залежи. Несмотря на невысокие значения интенсивности колебаний, полученные результаты на промысле свидетельствовали об эффективности вибросейсмического воздействия на продуктивные пласты.

Представленные в литературе данные показывают, что сейсмоакустическое воздействие рентабельнее применять на месторождениях с неоднородными продуктивными пластами с изменяющимися показателями по проницаемости и трещиноватости.

Лабораторные исследования

С целью определения механизма волнового воздействия на насыщенные пористые среды и пластовые флюиды, а также выявления особенностей распространения упругих волн в гетерогенных средах выполнено множество теоретических и экспериментальных работ. Среди них выделяются работы по: 1) воздействию ультразвука на реологические характеристики нефти и продукты его переработки; 2) волновому воздействию на модели гетерогенных сред; 3) моделированию волнового воздействия на пласт.

Воздействие ультразвука на реологические характеристики нефти и продукты его переработки

В работе [23] проведены экспериментальные исследования воздействия ультразвуковых волн на разных частотах (25, 40, 68 кГц) и мощности (100, 250, 500 Вт) на изменения вязкости трех типов жидкости (парафиновое масло, синтетическое масло и керосин). Эксперименты показали, что вязкость всех образцов снижалась при ультразвуковой обработке, причем эффект снижения вязкости проявлялся у более легких жидкостей значительно быстрее. Выявлено, что более высокая мощность ультразвука приводит к более интенсивному снижению вязкости жидкости. В изотермических условиях эксперимента получено, что снижение вязкости флюидов обратно пропорционально увеличению частоты. Было предположено, что такие явления как кавитация, тепловыделение и снижение вязкости являются основными, которые способствуют увеличению добычи нефти с помощью ультразвукового воздействия.

Результаты аналогичного лабораторного исследования представлены в работе [24] на примере керосина, моторного масла и тяжелой нефти для температур 27 °С, 35 °С, 45 °С, 55 °С. В результате воздействия ультразвуковыми волнами на всех образцах зафиксировано снижение вязкости, особенно при обработке керосина. Результаты показали, что подвижность флюидов возрастает по мере увеличения температуры при ультразвуковом воздействии. Ультразвуковые волны формируют энергию, которая увеличивает подвижность вытесняющей жидкости, тогда как энергия колебаний способствует подвижности флюидов, находящихся в порах. Эти эффекты, в свою очередь, содействуют повышению нефтеотдачи продуктивных пластов.

В работе [25] проведена обработка ультразвуком нефти с высоким содержанием АСПО. Выявлено, что изменение структурных и механических свойств нефти при обработке ультразвуком, зависит от его компонентного состава. Отмечается, что улучшение вязкостно-температурных характеристик нефти пропорционально увеличивается со временем воздействия на образцы. Также выявлено, что ультразвуковая обработка в нормальных условиях и длительностью не более 30 минут не приводит к существенному изменению свойств компонентов нефти. Авторы

считают, что улучшение вязкостно-температурных характеристик нефти при обработке ультразвуком заключается в разрушении межмолекулярных связей и перераспределении компонентов нефти [25].

В работе [26] экспериментально исследовано воздействие акустических волн высокой частоты на течение флюидов через пористый материал. Воздействие осуществлялось на частотах 20 и 40 кГц с максимальной мощностью в 2 и 0.7 кВт соответственно. Результаты экспериментального исследования выявили снижение градиента давления пластовых флюидов на примере берейского песчаника. Эффект объясняется уменьшением вязкости жидкости, вызванной воздействием ультразвуковых волн. Однако можно утверждать, что последний вывод справедлив только в том случае, если другие параметры, такие как относительная проницаемость, остаются одинаковыми до и после излучения. Тем не менее, изменение относительной проницаемости в результате ультразвукового воздействия наблюдалось и у других авторов [27].

Исследования на моделях гетерогенных сред

В работе [28] представлено экспериментальное исследование на макро- и микромоделях с целью подтверждения увеличения подвижности нефти при ультразвуковом воздействии в пористых средах. Результаты показали, что влияние ультразвукового воздействия на процесс извлечения нефти значительно больше на пористых средах с высоковязкой нефтью, чем с менее вязкими. Коэффициент нефтеизвлечения больше при воздействии на высоких частотах, хотя суммарный общий показатель одинаков для обоих случаев. Результаты на микромоделях показали, что при увеличении частоты от 20 до 68 кГц на постоянной мощности глобулы нефти перемещаются быстрее в условиях нагнетания жидкости. Этот же эффект наблюдается при увеличении мощности ультразвука от 50 до 500 Вт при постоянной частоте воздействия (40 кГц). Тем самым, остаточная нефтенасыщенность уменьшается. В итоге, результаты этого исследования показывают, что коэффициент извлечения нефти пропорционален мощности и частоте воздействия ультразвука.

В работе [29] представлены результаты экспериментального исследования волнового воздействия на образцах керна при горизонтальном и вертикальном нагнетании жидкости. Волновая стимуляция проведена в двух различных пластовых условиях: в первой серии - при остаточной нефтенасыщенности после заводнения, а во второй - при исходном содержании нефти. Относительная проницаемость нефти и воды определялась при воздействии и отсутствии ультразвуковых волн, оценена дополнительная добыча нефти за счет обработки и уровень обводненности. Образцы керна подвергались ультразвуковому воздействию не более 45 минут. Результаты экспериментов показали повышение эффективности применения волнового воздействия на

керны после процесса заводнения по сравнению с образцами без применения заводнения. Авторы рекомендуют использовать волновое воздействие на обводненных месторождениях и истощенных нефтяных коллекторах [29].

В работе Кешаварзи и др. [30] проанализировано влияние ультразвуковых волн в условиях свободного гравитационного дренажа нефти. В качестве пористой среды рассмотрен объем, заполненный стеклянными шариками диаметром от 80 до 270 мкм. Исследована проницаемость фазы смачивания ультразвуковым генератором на частоте 22 кГц и мощностью 80 Вт. Результаты показали, что обработка ультразвуком значительно интенсифицирует процесс извлечения нефти в этих условиях. Кроме того, за счет излучения ультразвуковых волн повышается проницаемость смачивающейся и не смачивающейся фазы исследуемой среды.

В работе [31] представлены результаты анализа влияния ультразвукового излучения в условиях гравитационного дренажа на относительную проницаемость на примере трех разных образцов керна различной геометрии и с различными смачивающими свойствами.

Получено, что ультразвуковые волны способны повысить нефтеотдачу при гравитационном дренаже для нефти без содержания асфальтенов. Наличие асфальтенов приводит к повышению вязкости и к снижению их скорости фильтрации в течение длительного времени. Согласно методам, используемых в [30], подтверждено, что ультразвуковые волны способны повысить нефтеотдачу при гравитационном дренаже для нефти без содержания асфальтенов, и в то время ультразвук повышает вязкость образцов с содержанием асфальтенов и, как следствие, снижает их скорость фильтрации в течение длительного времени. Увеличение размера шариков на физических моделях пористой среды приводило к увеличению извлечения нефти без содержания асфальтенов благодаря ультразвуковому воздействию. Обратная картина наблюдалась с образцами, которые содержали асфальтены [31].

В работе [32] изучено влияние ультразвуковых волн с частотой 30 кГц и мощностью 100 Вт на осаждение асфальтенов на примере стеклянной микромоделли. В качестве рабочих сред рассмотрены сырая тяжелая нефть и синтетическое масло. Результаты исследования подтвердили, что влияние ультразвуковых волн предотвращает осаждение асфальтенов. Выявлено, что под действием ультразвука снижается межфазное натяжение между нефтью и водой, и в результате это может привести к образованию эмульсий. Также определено, что вследствие изменения смачиваемости, ультразвук способствует интенсификации течения жидкости в исследуемой системе.

В статье [33] предлагается метод прерывистой вибрации в качестве эффективного и экологически безопасного способа для повышения нефтеотдачи. Для определения вязкости и интенсивности

воздействия использовалась двумерная микромоделль, помещенная внутри ультразвуковой ванны. В результате экспериментального исследования было выявлено, что: 1) степень извлечения нефти больше при прерывистой вибрации, чем при постоянном виброволновом воздействии; 2) наилучший эффект непрерывного воздействия наблюдался на образцах с высокой вязкостью и интенсивностью виброобработки, а также на малых расстояниях от источника вибрации; 3) вибрационное воздействие снижает вязкость нефти, тем самым может увеличить скорость фильтрации нефтяных флюидов в пласте и позволяет улучшить условия дренажа на добывающих скважинах.

Моделирование воздействия на пласт

В работе [34] рассмотрен акустический метод стимуляции скважин, основанный на передаче акустических волн, излучаемых скважинным генератором, в призабойную зону скважины. Генератор предназначен для повышения проницаемости пористой среды. Авторами предложено математическое моделирование метода акустической стимуляции скважин. Среди физических процессов модель учитывает: снижение вязкости жидкости за счет перемешивания и нагрева, возбуждение упругих волн на стенках скважины (для уменьшения сил прилипания между пластовыми флюидами и породой), возбуждение собственных частот, связанных с вибрацией жидкости внутри пористой среды, а также образование и схлопывание кавитационных пузырьков вблизи забитых пор породы. На основе численного моделирования для реальных геометрических характеристик скважин определены оптимальные частоты излучения, связанные с явлением акустического резонанса. Показано, что производительность скважин может быть значительно улучшена за счет правильного выбора рабочих частот.

В работах Аббасова и Агаевой [35, 36] приведено моделирование процесса волнового воздействия на продуктивный пласт и призабойную зону. Модель учитывала установку излучателя на устье скважины и распространение упругих колебаний на забой скважины через поток добываемой жидкости. Выявлено, что характер распространения упругих волн является затухающим, причем период таких колебаний значительно больше периода вынужденных. Определено, что с увеличением радиуса волнового воздействия на продуктивный пласт, величина амплитуды колебаний давления на забой значительно сокращается [35]. Также авторами получены аналитические выражения, которые описывают распространение упругих волн в пласте с учетом деформации коллектора. Показано, что затухание упругих волн в деформируемых коллекторах значительно усиливается по сравнению с недеформируемыми коллекторами [36].

В исследовании [27] предлагается комбинированное использование ультразвуковых волн и химических агентов для обработки уже поврежденных образцов керна, вызванных гидродинами-

ческим воздействием. Результаты показали, что воздействие на образцы ультразвуковыми волнами с параметрами (20 кГц, 1000 Вт) вместо максимальной частоты и мощности является оптимальным, поскольку при этих параметрах воздействия соблюдалось условие возникновения резонанса. Кроме того, оптимальное время облучения составило 100 минут, которое обеспечило отделение мелких слабо взвешенных частиц, причем увеличение времени воздействия отрицательно сказалось на восстановлении поврежденной проницаемости. Выявлено, что увеличение проницаемости проходит за счет кавитации, которая возникает при распространении ультразвуковых волн через флюиды, содержащиеся в пористой среде, и за счет распространения тепловой энергии. Экспериментальные результаты показали, что максимальное увеличение проницаемости составило 25%. Причем, одновременное применение химического реагента и ультразвуковых волн оптимальной частоты позволило увеличить проницаемость на 46%. Авторы, подчеркивают, что применение ультразвуковых волн является хорошей альтернативой применяемым традиционным методам воздействия, а также подобные методы являются надежными, экономически и экологически эффективными.

Стоит отметить, что некоторые незаменимые проблемы в традиционных методах делают ультразвуковую технологию более привлекательной благодаря простому, надежному, выгодному, экономически эффективному и экологически безопасному характеру воздействия.

Интегрированное воздействие на продуктивный пласт

Интегрированное воздействие представляет собой совмещение традиционных методов увеличения нефтеотдачи с волновым. В результате суммарный эффект совмещенного воздействия значительно превосходит от применения отдельно взятых методов - достигается синергетический эффект воздействия.

Предлагаемый метод интегрированного воздействия на нефтяные пласты направлен на решение проблемы интенсификации процесса добычи трудноизвлекаемых УВ и повышение коэффициента извлечения нефти, особенно высоковязкой тяжелой нефти и природных битумов. Существенным достоинством интегрированного метода является экологическая чистота процесса, представляющего все более актуальным по мере выработки нефтяных пластов и ужесточения экологических требований к разработке недр. Дополнительным преимуществом данного метода является сравнительно низкая себестоимость и возможность обеспечения непрерывного технологического процесса извлечения УВ.

Реализация интегрированного метода на пласт и призабойную зону осуществляется благодаря специальному техническому средству (излучателю колебаний давления), который размещается

на забое нагнетательной скважины в интервале нефтяного пласта. Преимуществом данного решения является то, что генерация упругих волн осуществляется за счет энергии нагнетаемого в пласт теплоносителя. За счет реализации физических процессов в проточном тракте излучателя, часть кинетической энергии потока преобразуется в колебания давления. В качестве рабочих агентов могут быть использованы сжимаемые и несжимаемые жидкости. При этом применяемое волновое воздействие интенсифицирует внутрипластовые процессы, а также может легко совмещаться с другими видами воздействия на продуктивные пласты. Интегрированное воздействие позволяет увеличить проницаемость насыщенной пористой среды и снизить вязкость пластовых флюидов, что в свою очередь расширяет зону воздействия и повышает коэффициенты охвата и замещения [37].

Апробация интегрированного воздействия на пласт, выполненная коллективом авторов под руководством Я.И.Кравцова [38], в промышленных условиях Мордово-Кармальского месторождения природных битумов Республики Татарстан показала высокие результаты применяемой технологии. В данном случае совмещались волновое воздействие и внутрипластовое горение. Режим волнового воздействия в 1000 Гц обеспечил двукратное повышение дебита, а на частоте 2000 Гц – в среднем 5-8 кратное увеличение показателей добычи нефти. При этом зафиксировано существенное снижение обводненности извлекаемой продукции, а также удельных энергетических затрат на процессы извлечения нефти [38].

Эффективность интегрированного воздействия на продуктивные пласты также подтверждена на промысловых участках Первомайского месторождения ОАО «Татнефть» в условиях заводнения. Реализация волнового воздействия осуществлялась гидродинамическим проточным излучателем, размещенным в вертикальной нагнетательной скважине. Эффект выразился в увеличении показателей дебита нефти, снижении обводненности, а также в повышении приемистости скважины. Эффект последствия сохранялся в течение нескольких месяцев [39].

Полученные положительные результаты на промыслах в условиях вертикальных скважин позволяют рассчитывать на эффективное осуществление интегрированной технологии и при эксплуатации горизонтальных скважин. Наиболее рентабельным видится совмещение волнового воздействия с методом парointенсифицированного дренажа, более известного в мире как метод SAGD (Steam Assisted Gravity Drainage), подробно изложенный в работах [40, 41]. Предлагаемая интегрированная технология заключается в нагнетании пара через нагнетательную верхнюю горизонтальную скважину, в которой размещается излучатель колебаний, а из нижней скважины отбирается нефть или природный битум. В данном случае, нагнетательная скважина является линейным источником тепло-

вой и волновой энергии и позволяет воздействовать на весь участок продуктивного пласта, ограниченный протяженностью скважин (рис.1). Изменяя интенсивность и частоту волнового воздействия, можно варьировать степень прогрева призабойной зоны пласта. Применение метода может быть реализовано на месторождениях практически любой вязкости УВ [37].

В работах [37, 42] с целью определения оптимального режима интегрированного воздействия на пласт разработаны математические модели. С учетом геолого-физических характеристик продуктивного пласта, свойств нагнетаемого агента и пластовых жидкостей, геометрии горизонтальных скважин, модель позволяет выявить распространение тепловых и волновых полей в пласте, оценить параметры генерации волнового поля и наземного оборудования, а также место размещения излучателя в скважине. Результаты теоретической оценки интегрированного воздействия по геолого-физическим данным месторождения природных битумов показали высокий уровень добычи нефти по сравнению с традиционным методом SAGD [37].

Поскольку реализация интегрированного воздействия на продуктивный пласт зависит от эффективности распространения упругих волн в динамической системе «скважина – пласт», то в работе [43] приведено экспериментальное исследование распространения волнового поля в перфорированной скважине и амплитудно-частотных характеристик исследуемой системы. Исследование диссипации упругих волн в скважине, а также элементах обсадной колонны проводилось на режиме «белого шума» (20 Гц до 20 кГц), а также на различных частотах вынужденных колебаний (250, 350 и 400 Гц). Также варьировалась геометрия перфорационных отверстий (форма, длина и диаметр), которые учитывала реальные промысловые значения толщины стенки обсадной

колонны, цементного кольца, а также углублений, которые образуются при простреле перфораций.

Выявлено, что наибольший эффект интенсификации фильтрационных процессов в пласте реализуется на определенных частотах и амплитудах колебаний, а именно в области существования устойчивого резонанса. С целью снижения потерь энергии при переходе из скважины в пласт, необходим выбор перфорационных отверстий с большими относительными размерами, поскольку при увеличении размеров перфорации (длины и его диаметра) эффективность возбуждения колебаний в среде возрастает. В процессе исследований также определено, что меньшие частоты колебаний обеспечивают максимальную амплитуду колебаний, а на более высоких частотах – поглощение энергии усиливается. При выборе конструктивных решений и частотных характеристик излучателя учитываются механизм возбуждения и распространения волн в различных средах, волновые характеристики продуктивного пласта (система кровля – пласт – подошва) и параметры нагнетаемого в пласт рабочего агента [43].

Интегрированные методы воздействия имеют ряд своих преимуществ по сравнению с аналогами: 1 - излучение колебаний возбуждается и поддерживается за счет энергии потока рабочего агента и характеризуется собственной частотой; 2 - устройство обеспечивает непрерывный процесс воздействия, то есть работает в режиме автоколебаний; 3 - в устройстве отсутствуют подвижные элементы конструкции. Все это позволяет исключить необходимость в дополнительном источнике энергии, повысить ресурс работы излучателя, расширить область эффективного применения технологии, упростить и снизить стоимость технических средств.

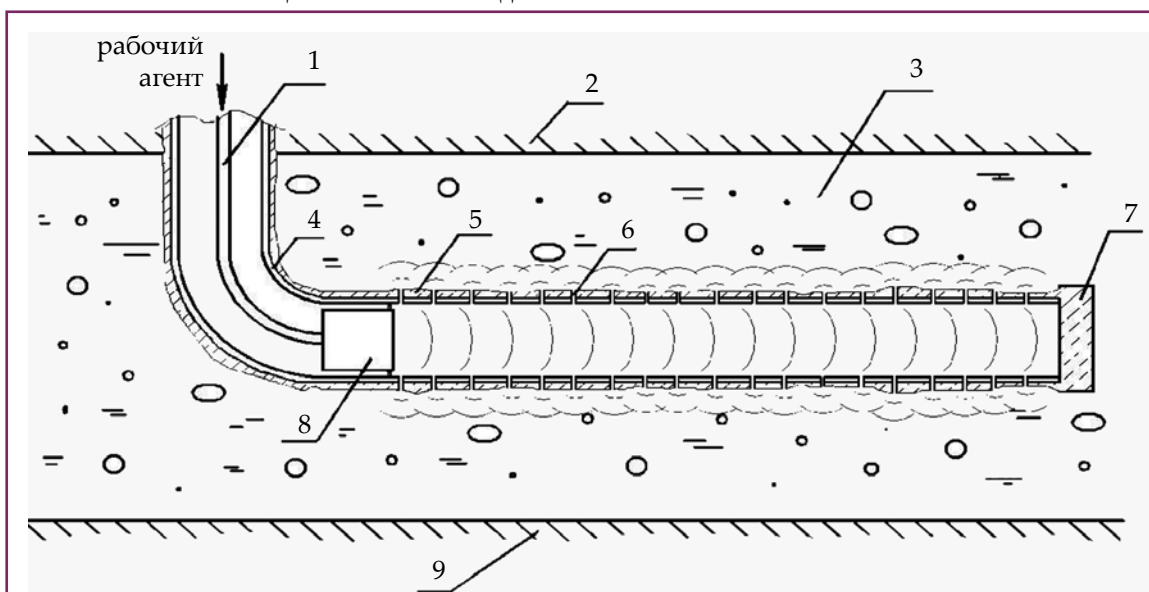


Рис. Схема забоя горизонтальной нагнетательной скважины:
 1 - насосно-компрессорная труба; 2 - кровля; 3 - продуктивный пласт;
 4 - обсадная колонна; 5 - цементный камень; 6 - перфорации;
 7 - дно скважины; 8 - излучатель колебаний; 9 - подошва пласта

Выводы

В настоящее время волновые методы представляются технологиями будущего, которые могут применяться самостоятельно, так и легко совмещаться с другими МУН, тем самым повышая их рентабельность. Однако широкое использование волновых технологий ограничено тем, что они являются наукоемкими и требуют детального геолого-физического исследования участков их применения.

Анализ и обобщение исследований позволяют сделать следующие выводы. Основные направления эффективного применения волновых технологий при разработке УВ месторождений являются: - очистка призабойной зоны продуктивного пласта, а также повышение притока и приемистости скважин; - интенсификация добычи УВ, снижение обводненности скважин и извлекаемой продукции; - снижение эксплуатационных затрат и экологическая безопасность.

Для поддержания на современном этапе темпов добычи нефти и природных битумов, а также увеличения КИН, волновые методы и средства воздействия на продуктивные пласты занимают одну из ключевых ролей среди перспективных МУН.

Одним из перспективных является метод интегрированного воздействия (включая волновое) на продуктивные пласты, в том числе и в условиях горизонтальных скважин. Эффективное и сбалансированное сочетание параметров воздействия позволит достичь синергетического эффекта, а также снизить энергетические и материальные затраты. В результате исследования выявлено, что интенсификация извлечения нефти при интегрированном воздействии на основе технологии SAGD обеспечивается двумя основными факторами: - снижение вязкости пластовых флюидов за счёт нагнетания пара в пласт; - повышение проницаемости насыщенной пористой среды за счет воздействия на нее упругими волнами.

Поскольку в процессе добычи наблюдается тенденция снижения нефтеотдачи – основного показателя рационального использования сырьевой базы, то выходом из сложившейся ситуации видится в наращивании добычи нефти волновыми методами воздействия на месторождениях с трудноизвлекаемыми УВ.

А.И.Кадыровым выполнен анализ литературы по воздействию ультразвука на реологические характеристики нефти и продукты его переработки при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-31-20037.

Р.Н.Гатауллиным работа выполнена за счет государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН.

Литература

1. Гатауллин Р.Н. (2018). Состояние разработки месторождений тяжелой нефти и природных битумов. *Вестник технологического университета*, 21(10), 71-82.
2. Муслимов, Р.Х. (2014). Нефтеотдача: прошлое, настоящее, будущее. *Казань: «Фэн».*
3. Вахитов, Г.Г., Симкин, Э.М. (1985). Использование физических полей для извлечения нефти из пластов. *Москва: Недра.*
4. Duhon, R.D., Campbell, J.M. (1965, November). The effect of ultrasonic energy on flow through porous media. Paper SPE-1316-MS. In: *SPE Eastern Regional Meeting. Society of Petroleum Engineers.*
5. Hamida, T., Babadagli, T. (2005, April). Effect of ultrasonic waves on the capillary-imbibition recovery of oil. Paper SPE-92124-MS. In: *Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.*
6. Иванов, Б.Н., Гурьянов, А.И., Гумеров, А.М. (2009). Волновые процессы и технологии добычи и подготовки нефти. *Казань: «Фэн».*
7. Зайцев, Ю.В., Балакирев, Ю.А. (1986). Технология и техника эксплуатации нефтяных и газовых скважин. *Москва: Недра.*
8. Abramov, V. O., Mullakaev, M. S., Abramova, A. V., etc. (2013). Ultrasonic technology for enhanced oil recovery from failing oil wells and the equipment for its implementation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(5), 1289-1295.
9. Gharabi, R. (2005). Application of an expert system to optimize reservoir performance. *Petroleum Science and Engineering*, 49, 261-273.

References

1. Gataullin, R.N. (2018). The state of heavy oil and natural bitumens fields development. *Bulletin of the Technological University*, 21(10), 71-82.
2. Muslimov, R.H. (2014). Oil recovery: past, present, future. *Kazan: Fen.*
3. Vakhitov, G.G., Simkin, E.M. (1985). Use of physical fields in oil recovery. *Moscow: Nedra.*
4. Duhon, R.D., Campbell, J.M. (1965, November). The effect of ultrasonic energy on flow through porous media. Paper SPE-1316-MS. In: *SPE Eastern Regional Meeting. Society of Petroleum Engineers.*
5. Hamida, T., Babadagli, T. (2005, April). Effect of ultrasonic waves on the capillary-imbibition recovery of oil. Paper SPE-92124-MS. In: *Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.*
6. Ivanov, B.N., Guryanov, A.I., Gumerov, A.M. (2009). Wave processes and oil production and preparation technologies. *Kazan: «Fen».*
7. Zaitsev, Y.V., Balakirev, Y.A. (1986). Oil and gas well operation technology and techniques. *Moscow: Nedra.*
8. Abramov, V. O., Mullakaev, M. S., Abramova, A. V., etc. (2013). Ultrasonic technology for enhanced oil recovery from failing oil wells and the equipment for its implementation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(5), 1289-1295.
9. Gharabi, R. (2005). Application of an expert system to optimize reservoir performance. *Petroleum Science and Engineering*, 49, 261-273.

10. Муфазалов, Р.Ш., Муслимов, Р.Х., Муфазалов, Р.Ш. и др. (2005). Гидроакустическая техника и технология для бурения и вскрытия продуктивного горизонта. Казань: Дом печати.

11. Муфазалов, Р.Ш. (2013). Возрастающая роль инновационных технологий повышения эффективности эксплуатации на поздней стадии разработки месторождений. Материалы международной научно-практической конференции «Проблемы эффективности разработки нефтяных месторождений на поздней стадии». Казань: Изд-во «Фэн» АН РТ, 280-283.

12. Mullakaev, M.S., Abramov, V.O., Abramova, A.V. (2015). Development of ultrasonic equipment and technology for well stimulation and enhanced oil recovery. *Petroleum Science and Engineering*, 125, 201–208.

13. Абрамов, В.О., Муллакаев, М.С., Баязитов, В.М. и др. (2013). Опыт применения ультразвукового воздействия для восстановления продуктивности нефтяных скважин Западной Сибири и Самарской области. *Нефтепромысловое дело*, 6, 26-31.

14. Kostrov, S., Wooden, W. (2005). In situ seismic stimulation shows promise for revitalizing mature fields. *Oil & Gas Journal*, 103, 43-49.

15. Бажалук, Я.М., Карпаш, О.М., Клымышин, Я.Д. и др. (2012). Увеличение отбора нефти путем воздействия на пласты пакетами упругих колебаний. *Нефтегазовое дело*, 3, 185–198.

16. Абдукамалов, О.А., Серебрякова, Л.Н., Тастемиров, А.Р. (2017). Опыт применения технологии воздействия ударно-волновой обработки на призабойную зону нагнетательных скважин на месторождениях Западного Казахстана. *SOCAR Proceedings*, 1, 62-69.

17. Юшин, Е.С. (2018). Перспективы развития метода имплозии и технических средств для ударно-депресссионного воздействия на призабойную зону пласта. *Территория Нефтегаз*, 7-8, 76-80.

18. Силков, Р.А. (2012). Использование силовых ударных волн в технических методах и средствах повышения нефтеотдачи пластов. *Литье и металлургия*, 3, 295-299.

19. Мохов, М.А., Сахаров, В.А., Хабибуллин, Х.Х. (2004). Виброволновое и вибросейсмическое воздействие на нефтяные пласты. *Нефтепромысловое дело*, 4, 24-28.

20. Ахундов, Р.И. (2009). Промысловые исследования вибро-воздействия на призабойную зону скважин на морских нефтяных месторождениях Азербайджана. *Нефтепромысловое дело*, 5, 29-32.

21. Файзуллин, И.С., Дьяконов, Б.П., Хисамов, Р.С. и др. (2006). О технологии сейсмоакустического воздействия на обводненные нефтяные пласты. *Технологии сейсморазведки*, 3, 86-89.

22. Николаевский, В.Н., Степанова, Г.С., Ненартович, Т.Л., Ягодов, Г.Н. (2006). Ультразвук определяет отбор нефти при вибросейсмическом воздействии на пласт. *Нефтяное хозяйство*, 1, 48 - 50.

23. Hamidi, H., Mohammadian, E., Junin, R., et al. (2014). A technique for evaluating the oil/heavy-oil viscosity changes under ultrasound in a simulated porous medium. *Ultrasonics*, 54, 655-662.

24. Dollah, A., Rashid, Z.Z., Othman, N.H., et al. (2018). Effects of ultrasonic waves during waterflooding for enhanced oil recovery. *International Journal of Engineering & Technology*, 7, 232-236.

25. Волкова, Г.И., Ануфриев, Р.В., Юдина, Н.В. (2016). Влияние ультразвуковой обработки на состав и свойства парафинистой высокосмолистой нефти. *Нефтехимия*, 56(5), 454-460.

10. Mufazalov, R.S., Muslimov, R.H., Mufazalov, R.S. i dr. (2005). Gidroakusticheskaya tekhnika i tekhnologiya dlya bureniya i vskrytiya produktivnogo gorizonta. *Kazan: Dom pechati*.

11. Mufazalov, R.S. (2013). Vozrastayushchaya rol' innovatsionnykh tekhnologiy povysheniya effektivnosti ekspluatatsii na pozdney stadii razrabotki mestorozhdeniy. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Problemy effektivnosti razrabotki neftyanykh mestorozhdeniy na pozdney stadii». *Kazan: Izd-vo «Fen» AN RT*, 280-283.

12. Mullakaev, M.S., Abramov, V.O., Abramova, A.V. (2015). Development of ultrasonic equipment and technology for well stimulation and enhanced oil recovery. *Petroleum Science and Engineering*, 125, 201–208.

13. Abramov, V.O., Mullakaev, M.S., Bayazitov, V.M. (2013). Experience of using ultrasound technology to restore productivity of oil wells in West Siberia and Samara region. *Oilfield Engineering*, 6, 26-31.

14. Kostrov, S., Wooden, W. (2005). In situ seismic stimulation shows promise for revitalizing mature fields. *Oil & Gas Journal*, 103, 43-49.

15. Bazhaluk, Y.M., Karpash, O.M., Klymyshyn, Y.D., et al. (2012). Oil production increase due to formation stimulation with the help of mechanical oscillations train. *Oil and Gas Business*, 3, 185–198.

16. Abdukamalov, O.A., Serebryakova, L.N., Tastemirov, A.R. (2017). Experience of shock action for bottomhole zone treatment of injection wells in the fields of Western Kazakhstan. *SOCAR Proceedings*, 1, 62-69.

17. Yushin, E.S. (2018). Prospects for the development of the implosion method and technical means for impact-depressive effects on the bottomhole formation zone. *Oil and gas Territory (Territorija «Neftegas»)*, 7-8, 76-80.

18. Silkov, R.A. (2012). The use of power of shock waves in the technical methods and tools for enhancing reservoir recovery. *Litiyo i Metallurgiya (Foundry Production and Metallurgy)*, 3, 295-299.

19. Mokhov, M.A., Sakharov, V.A., Khabibullin, H.H. (2004). Vibration and vibroseis impact on oil reservoirs. *Oilfield Engineering*, 4, 24-28.

20. Akhundov, R.I. (2009). Field research into vibration effect on the wells near-bottom zone in Azerbaijan offshore oil fields. *Oilfield Engineering*, 5, 29-32.

21. Faizullin, I.S., Dyakonov, B.P., Khisamov, R.S., i dr. (2006). O tekhnologii seysmoakusticheskogo vozdeystviya na obvodnennyye neftyanyye plasty. *Seismic Technologies*, 3, 86-89.

22. Nikolayevskiy, V.N., Stepanova, G.S., Nenartovich, T.L., Yagodov, G.N. (2006). The ultrasound determines an oil withdrawal at vibroseis bed stimulation. *Oil Industry*, 1, 48-50.

23. Hamidi, H., Mohammadian, E., Junin, R., et al. (2014). A technique for evaluating the oil/heavy-oil viscosity changes under ultrasound in a simulated porous medium. *Ultrasonics*, 54, 655-662.

24. Dollah, A., Rashid, Z.Z., Othman, N.H., et al. (2018). Effects of ultrasonic waves during waterflooding for enhanced oil recovery. *International Journal of Engineering & Technology*, 7, 232-236.

25. Volkova, G.I., Anufriev, R.V., Yudin, N.V. (2016). Effect of ultrasonic treatment on the composition and properties of waxy high-resin oil. *Petroleum Chemistry*, 56, 683–689.

26. Poesio, P., Ooms, G., Barake, S., Bas, V.D. (2002). An investigation of the influence of acoustic waves on the liquid flow through a porous material. *Journal of Acoustical Society of America*, 111, 2019-2025.
27. Khan, N., Pu, C., Li, X., et al. (2017). Permeability recovery of damaged water sensitive core using ultrasonic waves. *Ultrasonics Sonochemistry*, 38, 381-389.
28. Hamidi, H., Rafati, R., Junin, R., Manan, M.A. (2012). A role of ultrasonic frequency and power on oil mobilization in underground petroleum reservoirs. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2, 29-36.
29. Alhomadhi, E., Amro, M., Almobarky, M. (2014). Experimental application of ultrasound waves to improved oil recovery during waterflooding. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 26, 103-110.
30. Keshavarzi, B., Karimi, R., Najafi, I., et al. (2014). Investigating the role of ultrasonic wave on two-phase relative permeability in a free gravity drainage process. *Scientia Iranica, Transaction C: Chemistry & Chemical Engineering*, 21, 763-771.
31. Arabzadeh, H., Amani, M. (2017). Application of a novel ultrasonic technology to improve oil recovery with an environmental viewpoint. *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*, 8(2). 1000323.
32. Dehshibi, R.R., Mohebbi, A., Riazi, M., Niakousari, M. (2018). Experimental investigation on the effect of ultrasonic waves on reducing asphaltene deposition and improving oil recovery under temperature control. *Ultrasonics Sonochemistry*, 45, 204-212.
33. Agia, A., Junin, R., Chonga, A. S. (2018). Intermittent ultrasonic wave to improve oil recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 166, 577-591.
34. Perez-Arancibia, C., Godoy, E., Duran, M. (2018). Modeling and simulation of an acoustic well stimulation method. *Wave Motion*, 77, 224-228.
35. Аббасов, Э.М., Агаева, Н.А. (2014). Распространение упругих волн, создаваемых в жидкости, с учетом динамической связи системы пласт-скважина. *SOCAR Proceedings*, 1, 77-84.
36. Аббасов, Э.М., Агаева, Н.А. (2012). Влияние виброволнового воздействия на характер распределения давления в пласте. *Инженерно-физический журнал*, 85(6), 1189-1195.
37. Гатауллин, Р.Н., Кравцов, Я.И., Марфин, Е.А. (2013). Интенсификация добычи трудноизвлекаемых углеводородов за счет интегрированного тепловолнового воздействия на пласт. *Нефтяное хозяйство*, 1, 90-93.
38. Marfin, E.A., Kravtsov, Y.I., Abdrashitov, A.A., et al. (2015). Elastic-wave effect on oil production by in situ combustion: field results. *Petroleum Science and Technology*, 33(15-16), 1526-1532.
39. Марфин, Е.А., Кравцов, Я.И., Абдрашитов, А.А., Гатауллин, Р.Н. (2014). Промысловые испытания волнового воздействия на процесс добычи нефти на Первомайском месторождении. *Георесурсы*, 2, 14-16.
40. Butler, R.M. (1998). SAGD Comes of AGE. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 37(7), 9-12.
41. Guo, T., Wang, J., Gates, I. (2018). Pad-scale control improves SAGD performance. *Petroleum*, 4(3), 318-328.
42. Гатауллин, Р.Н., Галимзянова, А.Р. (2015). Определение протяженности горизонтального участка скважины для интегрированного воздействия на пласт. *Технологии нефти и газа*, 4, 44-48.
43. Гатауллин, Р.Н., Марфин, Е.А. (2017). Исследование волнового поля в обсадной колонне скважины. *Технологии нефти и газа*, 1, 49-54.
26. Poesio, P., Ooms, G., Barake, S., Bas, V.D. (2002). An investigation of the influence of acoustic waves on the liquid flow through a porous material. *Journal of Acoustical Society of America*, 111, 2019-2025.
27. Khan, N., Pu, C., Li, X., et al. (2017). Permeability recovery of damaged water sensitive core using ultrasonic waves. *Ultrasonics Sonochemistry*, 38, 381-389.
28. Hamidi, H., Rafati, R., Junin, R., Manan, M.A. (2012). A role of ultrasonic frequency and power on oil mobilization in underground petroleum reservoirs. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2, 29-36.
29. Alhomadhi, E., Amro, M., Almobarky, M. (2014). Experimental application of ultrasound waves to improved oil recovery during waterflooding. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 26, 103-110.
30. Keshavarzi, B., Karimi, R., Najafi, I., et al. (2014). Investigating the role of ultrasonic wave on two-phase relative permeability in a free gravity drainage process. *Scientia Iranica, Transaction C: Chemistry & Chemical Engineering*, 21, 763-771.
31. Arabzadeh, H., Amani, M. (2017). Application of a novel ultrasonic technology to improve oil recovery with an environmental viewpoint. *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*, 8(2). 1000323.
32. Dehshibi, R.R., Mohebbi, A., Riazi, M., Niakousari, M. (2018). Experimental investigation on the effect of ultrasonic waves on reducing asphaltene deposition and improving oil recovery under temperature control. *Ultrasonics Sonochemistry*, 45, 204-212.
33. Agia, A., Junin, R., Chonga, A. S. (2018). Intermittent ultrasonic wave to improve oil recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 166, 577-591.
34. Perez-Arancibia, C., Godoy, E., Duran, M. (2018). Modeling and simulation of an acoustic well stimulation method. *Wave Motion*, 77, 224-228.
35. Abbasov, E.M., Agaeva, N.A. (2014). Propagation of the constructed of pressure waves in fluid with the account dynamic connection of system the well-formation. *SOCAR Proceedings*, 1, 77-84.
36. Abbasov, E. M., Agaeva, N. A. (2012). Influence of vibrowave action on the character of pressure distribution in a bed. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 85(6), 1189-1195.
37. Gataullin, R.N., Kravtsov, Y.I., Marfin, E.A. (2013). Intensification the process of hard to recover hydrocarbons reserves extraction by integrated heat-wave influence on layer. *Oil Industry*, 1, 90-93.
38. Marfin, E.A., Kravtsov, Y.I., Abdrashitov, A.A., et al. (2015). Elastic-wave effect on oil production by in situ combustion: field results. *Petroleum Science and Technology*, 33(15-16), 1526-1532.
39. Marfin, E.A., Kravtsov, Y.I., Abdrashitov, A.A., Gataullin, R.N. (2014). Field tests of wave action on oil production in the Pervomaysky field. *Georesources*, 2(57), 14-16.
40. Butler, R.M. (1998). SAGD Comes of AGE. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 37(7), 9-12.
41. Guo, T., Wang, J., Gates, I. (2018). Pad-scale control improves SAGD performance. *Petroleum*, 4(3), 318-328.
42. Gataullin, R.N., Galimzyanova, A. R. (2015). Definition the length of horizontal well for the integrated bed stimulation. *Oil and Gas Technologies*, 4, 44-48.
43. Gataullin, R.N., Marfin, E.A. (2017). Study of wave field in a well casing string. *Oil and Gas Technologies*, 1, 49-54.

Интенсификация добычи нефти методами волнового воздействия на продуктивные пласты

Р.Н.Гатауллин, А.И.Кадыйров

Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ
Казанский научный центр РАН, Казань, Россия

Реферат

Статья посвящена актуальной проблеме интенсификации извлечения углеводородов за счет применения волновых технологий воздействия на продуктивные пласты. Приведено состояние развития методов волнового воздействия и технических средств при разработке месторождений с трудноизвлекаемой нефтью, выявлены их особенности применения. Представлен обзор в области исследований влияния упругих волн на протекающие процессы в пористых средах и содержащихся в породе флюидов. Особое внимание уделено интегрированной технологии, которая заключается в совмещении традиционных методов увеличения нефтеотдачи и волнового воздействия на пласт. Данные промысловых испытаний и результаты научно-технических исследований подчеркивают перспективу применения волновых технологий при освоении углеводородных месторождений.

Ключевые слова: нефть; волновое воздействие; излучатель; скважина; частота; упругие волны.

Məhsuldar laylara dalğa təsiri üsulları ilə neft hasilatının intensivləşdirilməsi

R.N.Qataullin, A.İ.Kadıyrov

REA-nın Kazan Elmi Mərkəzinin Energetika və
Perspektiv Texnologiyalar Institutu, Kazan, Rusiya

Xülasə

Məqalə məhsuldar laylara dalğa təsiri texnologiyalarının tətbiqi ilə karbohidrogenlərin çıxarılmasının intensivləşdirilməsi kimi aktual problemə həsr edilmişdir. Nefti çətin çıxarılan yataqların işlənməsi zaman dalğa təsiri üsullarının və texniki vasitələrin inkişaf vəziyyəti göstərilmiş, onların tətbiq xüsusiyyətləri aşkar edilmişdir. Məsaməli mühitlərdə gedən proseslərə elastik dalğaların təsirinin və süxurda olan flüidlərin tədqiqi sahəsi üzrə icmal verilmişdir. İntegrasiya olunmuş texnologiyaya xüsusi diqqət ayrılmışdır ki, o, ənənəvi neftveriminin artırılması və laya dalğa təsiri üsullarının birləşdirilməsindən ibarətdir. Mədən sınaqlarının məlumatları və elmi-texniki tədqiqatların nəticələri karbohidrogen yataqlarının mənimsənilməsi zaman dalğa texnologiyalarının tətbiqinin perspektivini göstərir.

Açar sözlər: neft; dalğa təsiri; şüalandırıcı; quyu; tezlik; elastik dalğalar.