

Казанский Федеральный Университет

Кафедра технологии нефти, газа и углеродных материалов

Kazan Federal University,

Department of oil & gas technology and carbon materials

Монография. Ультразвуковая обработка дисперсных систем: физические механизмы и практическое применение

Monograph. Ultrasonic treatment of dispersed systems: physical mechanisms and practical application

Алфаяд Ассим Гани Хашим, Alfayyadh Assim Gheni Hashim ¹

Кемалов Руслан Алимович, Kemalov Ruslan Alimovich ²

Кемалов Алим Фейзрахманович, Kemalov Alim Feizrahmanovich ³

аспирант кафедры технологии нефти, газа и углеродных материалов ¹

кандидат технических наук,

доцент кафедры технологии нефти, газа и углеродных материалов ²,

доктор технических наук, профессор, академик РАН ³

заведующий кафедрой технологии нефти, газа и углеродных материалов

Казань, Россия

УДК 665.5-405. Шифр научной специальности ВАК:

25.00.17 – Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений

E-mail: assemalfayad@gmail.com¹, kemalov@mail.ru², alim.kemalov@mail.ru³

Аннотация: Статья представляет собой обзор ультразвукового воздействия на нефтяные дисперсии с целью улучшения их свойств. В работе обсуждаются механизмы акустического воздействия, включая его влияние на физические и химические свойства нефти. Особое внимание уделяется перспективам ультразвукового воздействия для улучшения вязкостно-температурных свойств нефтей, особенно тех с повышенным содержанием парафинов. Также рассматриваются механизмы воздействия ультразвука на нефтяные дисперсии и его влияние на структурно-механические параметры нефтей.

Abstract: The article is a review of ultrasonic influence on oil dispersions in order to improve their properties. The work discusses the mechanisms of acoustic

influence, including its influence on the physical and chemical properties of oil. Particular attention is paid to the prospects of ultrasonic influence for improving the viscosity-temperature properties of oils, especially those with a high paraffin content. The mechanisms of the effect of ultrasound on oil dispersions and its influence on the structural and mechanical parameters of oils are also considered.

Ключевые слова: импульсно-волновое воздействие, призабойная зона пласта, волновые методы, скважина, фильтрация.

Keywords: pulse-wave impact, bottomhole formation zone, wave methods, well, filtration.

1. ВВЕДЕНИЕ (INTRODUCTION)

В современном мире нефтепереработка играет ключевую роль в обеспечении энергетических и промышленных потребностей человечества. Однако многие типы нефти, добываемые в настоящее время, характеризуются повышенным содержанием парафинов, что приводит к ухудшению их низкотемпературных свойств и создает определенные трудности при их транспортировке и хранении. В связи с этим важным вопросом возникает необходимость разработки и применения методов, направленных на улучшение качества и обработку нефти с высоким содержанием парафинов [1].

В последние десятилетия ультразвуковая технология привлекает все больше внимания исследователей в нефтяной промышленности как один из перспективных способов обработки нефти. Ультразвуковое воздействие, как физический метод, показало свою эффективность в изменении структуры и свойств различных материалов, включая нефть и нефтепродукты. В силу своей высокой интенсивности и способности проникать в глубокие слои среды, ультразвук может оказывать разнообразное воздействие на нефтяные дисперсии, что приводит к изменениям как в их физических, так и в химических свойствах [2].

Цель данной статьи состоит в обзоре текущего состояния исследований по ультразвуковому воздействию на нефтяные дисперсии с учетом их химических

и физических свойств. Мы также рассмотрим результаты проведенных исследований, направленных на определение оптимальных условий применения ультразвука для улучшения свойств нефти, особенно в контексте содержания парафинов.

Перед обзором исследований по ультразвуковому воздействию на нефтяные дисперсии мы рассмотрим некоторые основные аспекты ультразвуковой технологии, ее механизмы действия и применение в различных областях. Это поможет понять основные принципы функционирования ультразвуковых систем и их потенциал в обработке нефти.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ (MATERIALS AND METHODS)

Сущность волновых методов увеличения нефтеотдачи пластов заключается в формировании для увеличения объема извлекаемого из недр углеводородного сырья и снижению энергетических затрат [3].

Чтобы увеличить суммарный объем добычи нефти из пласта, темп добычи и улучшить качество добываемой продукции [4], необходимо применять методы обработки ПЗП. Существует множество методов, восстанавливающих продуктивность скважин, но как было указано выше, чаще они являются неэффективными [4].

Акустическое воздействие (АВ) на ПЗС можно отнести к числу перспективных методов. Подтверждают это известные явления и эффекты, способные оказывать положительное влияние на ПЗП вышерассмотренных проблем [5].

Положительный эффект АВ на продуктивный пласт возникает на горную породу в процессе воздействия упругих колебаний и сопровождается большим числом вторичных эффектов, имеющих разную зависимость от интенсивности частоты колебаний и различную физическую природу.

В работе [6] провели практические исследования на Сотчемьюском месторождении нефти (МН), скважина № 130 изучали эффект от применения АВ до и после. Результат показал, что увеличение дебита скважины повысилось в

4,5 раза (450%) и продолжалось более 2-х лет. Динамика добычи нефти на скважине № 130 Сотчемьюского МН до и после применения АВ представлена на рисунке 1.

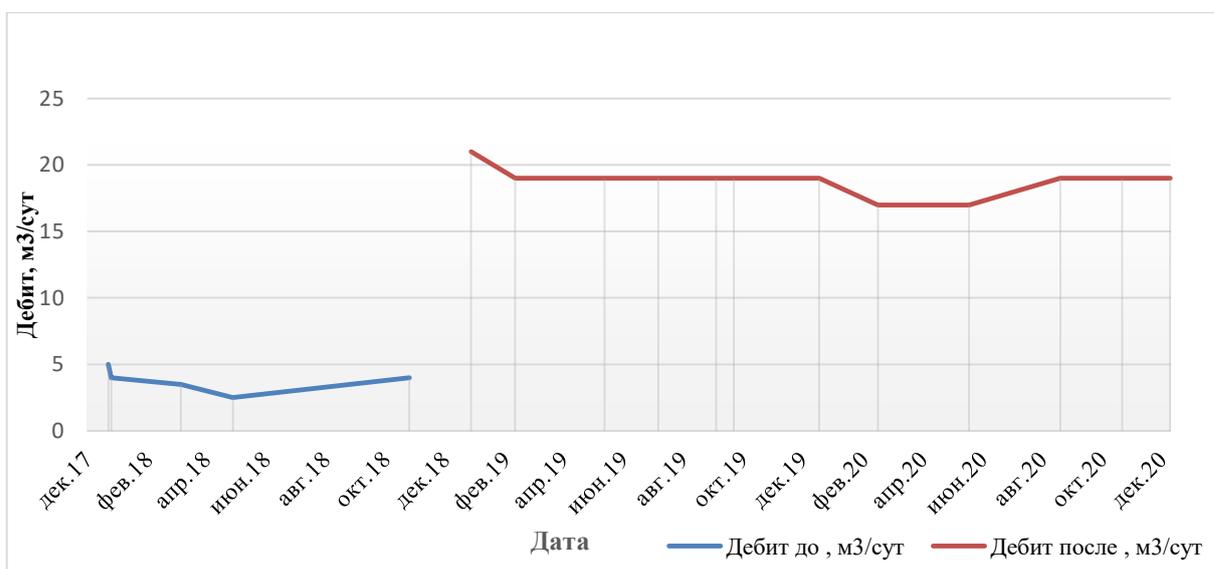


Рисунок 1 - Динамика добычи нефти до и после применения акустического воздействия на скважине № 130 Сотчемьюского месторождения [6]

Для акустической стимуляции скважин существует оборудование с двумя вариантами колебательных систем: СП 108/1410 для работы с высокопарафинистой нефтью и СП- 42/1300 для работы в нефтяных скважинах.

Метод ультразвуковой тоже прошёл проверку на месторождениях Татарстана, Удмуртии, Западной Сибири, Республики Коми и Белоруссии. Положительный эффект подтверждается на нагнетательных, добывающих, фонтанирующих нефтяных, нефтегазоконденсатных, и даже на артезианских скважинах питьевой воды.

УЗ-воздействие основано на мощном акустическом излучении в пласт. Развивающиеся процессы кавитации в окружающей среде, связаны с ростом и схлопыванием пузырьков газа, а также наблюдается тепловой интенсивный разогрев породы и жидкости.

УЗ обработка призабойной зоны скважины увеличивает проницаемость и текучесть флюида, вследствие расколматации каналов коллектора от АСПО,

частиц песка, бурового раствора и др. УЗ метод использует поля частотой 18 - 35 кГц с интенсивностью до 1 Вт/см², при этом рабочая резонансная частота излучателей скважины примерно равна 18-24 кГц при этом интенсивность ультразвука на оси скважины достигает 0,1 Вт/см² на расстоянии 1 м от оси скважины составляет примерно 0,02 Вт/см² [2].

Для очищения ствола скважины от различных загрязнений, также применяют УЗ, который эффективно удаляет барьеры для потока нефти в скважину. В 40–50% изученных случаев ультразвуковой метод считается успешным и эффект ультразвуковой генератор может продолжаться до нескольких месяцев. Также этот метод имеет очень локальный эффект [2].

Как показано в работе [7] эффекту снижения вязкости нефти, которая нагрета до температур 40-50 °С аналогично УЗ-воздействие при 25 °С, при этом происходит интенсивное увеличение текучести высоковязких нефтей при воздействии упругих волн продолжительностью до 1 часа и снижение вязкости в 6 раз.

По результатам расчёта доказано, что УЗ-воздействие меняет распределение равновесной концентрации тяжелых углеводородов на пористую матрицу и пористости. Это влияет на улучшение протекания нефти через поры, к увеличению объема вышедшей из пористого коллектора нефти, а также к повышению коэффициента извлечения нефтеотдачи, больше чем на 30 % [2].

Виброволновое воздействие (ВВ) на ПЗС тоже можно отнести к числу перспективных методов.

Сущность технологии заключается в обработке ПЗП промывочной жидкостью, поток движения которой пульсационный. Частота 1-3 Гц, а давление изменяется в пределах от 1 до 6 МПа. В результате анализа геологических условий и опыта разработки прошлых лет был составлен технологический план, состоящий из нескольких этапов. На первом разрушается структура загрязнения с помощью гидравлических импульсов. На следующем этапе кислотная обработка (КО) растворяет загрязняющие частицы. На заключительном этапе

создается депрессия (для добывающих скважин) или репрессия (для нагнетательных), чтобы очистить или вытеснить в пласт частички загрязнения.

В работе [5] на практике Западной Сибири сравнивались эффективность от применения виброволновой технологии и КО, а затем ГРП. Были продемонстрированы три скважины, одна из которых была проблемной, из-за большого поглощения бурового раствора, что повлекло за собой низкую продуктивность. Эффект от применения виброволновой технологии был положителен на более длительное время, чем эффект от КО, а затем ГРП. Прирост нефти также повысился до 6 т/сут. Технологическая схема ВВ представлена на рисунке 2.

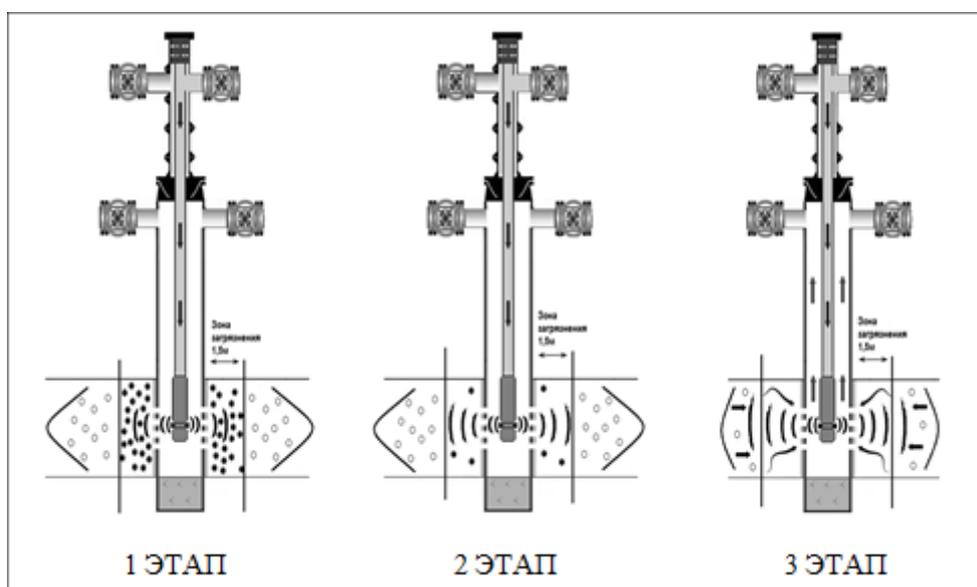


Рисунок 2 - Схема метода воздействия на ПЗП [5]

Таким образом, после обработок по виброволновой технологии очагов заводнения участков пласта происходит увеличение приемистости скважин и повышение охвата пласта по толщине. К работе подключаются новые пропластки, которые не освоены после бурения или загрязнены в ходе эксплуатации, а также улучшаются общие характеристики заводнения участков [1].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ (RESULTS)

Воздействие ультразвуковых полей на дисперсные системы различного состава

Ультразвук находит применение в множестве научных и технических сфер. Воздействие ультразвука приводит к разрушению молекул полимеров [8], способствует диспергированию и изменению коллоидных свойств, а также ускоряет химические реакции. До 1960-х годов большинство исследователей полагали, что сонохимические реакции возможны только в водных средах. Однако первые успешные эксперименты по звукохимии в неводных системах были проведены в 1963 году, что доказало значительное увеличение скорости и селективности реакций в таких условиях. Сегодня ультразвуковые технологии активно используются в нефтяной промышленности: для улучшения добычи нефти, предотвращения образования парафиновых отложений, очистки резервуаров и оборудования, а также в процессах транспортировки нефти. Ультразвуковое воздействие изменяет не только физические, но и химические свойства нефти, что позволяет углублять её переработку и увеличивать выход легких фракций. Акустические колебания с частотой выше 20 кГц классифицируются как ультразвук. При воздействии ультразвука различных частот происходит изменение состояния обрабатываемой среды и перенос энергии без перемещения вещества. Физико-химические процессы, сопровождающие распространение акустических волн, обусловлены нелинейными эффектами, включая кавитацию. Особенность кавитации заключается в локализации энергии ультразвукового поля в малых объемах, что создает высокие уровни энергетической плотности [8,9,10].

Понятие кавитации

Кавитация - это явление разрыва жидкой среды, возникающее при образовании в ней отрицательных давлений. При наличии определенного напряжения как жидкость, так и твердое тело могут растягиваться, что приводит к появлению полостей, в которые проникают пары жидкости и растворенные газы. Жидкости обладают высокой прочностью при растягивающих напряжениях. Например, в водной среде могут образовываться полости с радиусом, близким к кинетическому радиусу молекулы воды (10^{-8} см).

Теоретически для создания таких полостей необходимо формировать отрицательное давление около $1,5 \cdot 10^9$ Па. Однако, по мнению Я. Б. Зельдовича, образование флуктуаций в однородной жидкости приводит к ее разрыву в "слабых" местах, при этом прочность на разрыв снижается по сравнению с предельной прочностью на порядок. Результаты исследований показывают, что устойчивость реальных жидкостей к разрыву на 30-40 раз ниже, чем теоретически рассчитанная. В некоторых случаях кавитация может возникать при амплитуде звукового давления 10 кПа.

Для некоторых образцов воды достигается кавитационная прочность в 28 МПа [10]. Наличие различных микрон неоднородностей в жидкостях, нарушающих сплошную структуру среды, существенно снижает ее прочность на разрыв. Твердые частицы, содержащие адсорбированные газы на своей поверхности, также могут служить зародышами для кавитации. Образование кавитационных пузырьков возможно даже при наличии всего лишь одного микророзародыша в исследуемой жидкости. Прочность жидкости на разрыв, или кавитационная прочность, зависит от природы содержащихся в ней веществ, а также от объема и концентрации газа. Жидкость, подвергнутая значительным статическим давлениям, становится более однородной из-за растворения в ней большей доли микропузырьков.

Однако результаты исследований приводят к парадоксу: при создании кавитации разрыва жидкости фактически не происходит. В большинстве случаев наблюдается рост уже присутствующих в жидкости пузырьков микророзародышей, что приводит к резкому увеличению поверхности раздела между исследуемой жидкостью и кавитационными пузырьками.

При невысоких интенсивностях ультразвукового поля в жидкости образуются многочисленные кавитационные пузырьки. Следовательно, первоначальное определение кавитации практически не отражает физическую сущность явления, которое наблюдается в большинстве экспериментов. Г. Блином предложен комплекс явлений, связанных с движением образующихся микропузырьков в акустическом поле и вызывающих

различные физико-химические эффекты, такие как эрозия и сонолюминесценция. Такое определение базируется на исследованиях эффектов, протекающих при различных условиях и независимо друг от друга, и более полно отражает реально наблюдаемые процессы, чем предположения о разрыве однородной структуры жидкостей [8,10].

Отличие кавитационных пузырьков от обычных пузырьков, которые образуются при кипении и барботировании газа, заключается в их способности к расширению при превышении давления внутри них давления в жидкости. Под воздействием акустического поля обычные пузырьки с размером, близким к резонансному, начинают пульсировать синфазно с полем и приобретают свойства кавитационных.

Виды кавитации

Снижение давления, вызывающее образование кавитации, может быть результатом различных методов: например, обтекание препятствий потоком жидкости, движение твердых тел с высокой скоростью относительно жидкости, резкий отрыв поршня, передача ударных нагрузок, а также распространение ультразвуковых волн. Кавитация разделяется на гидродинамическую и ультразвуковую. При создании гидродинамической кавитации образующиеся пузырьки часто называют кавернами, и они могут иметь существенные размеры - до нескольких сантиметров [10].

В отличие от описанной кавитации, при прохождении ультразвуковых колебаний через жидкости давление меняет свой знак с удвоенной частотой создаваемого поля, что приводит к образованию пузырьков с очень малыми размерами - примерно от 10^{-5} до 10^{-1} см.

Физико-химическое воздействие ультразвуковых волн на макромолекулы было изучено с начала 30-х годов. Исследования на различных полимерах, таких как каучук, агар-агар, крахмал и другие, показали, что воздействие ультразвуковых волн снижает вязкость этих систем. Для таких натуральных полимеров характерно тиксотропное ожижение при воздействии акустических

волн. Вязкость частично восстанавливается после снятия ультразвуковой нагрузки. Кроме того, действие ультразвуковых колебаний приводит к разрыву слабых связей Ван-Дер-Ваальса и деструкции макромолекул [11].

Снижение структурной вязкости также наблюдалось для растворов синтетических полимеров, таких как полиакрилаты, полистирол, поливинилацетат, нитроцеллюлоза. Например, при исследовании полистирола выяснилось, что его последняя величина при длительной обработке в ультразвуковом поле приближается к минимальному значению 30000 а. е. м. Считается, что главным фактором, влияющим на эффективность деструкции макромолекул полимеров, является интенсивность ультразвукового поля. Чем она выше, тем больше кавитационных пузырьков образуется, и тем выше скорость деструкции.

Длина макромолекулярной цепи также оказывает влияние на скорость деструкции полимеров. В результате исследований было показано, что скорость разрушения макромолекул линейно зависит от их молекулярной массы, и с увеличением интенсивности ультразвукового поля достигаемый предел деструкции снижается. Авторы работ [12,13] отмечают, что прохождение акустических колебаний через жидкость происходит через ряд последовательных стадий сжатия и растяжения, сопровождаемых образованием кавитационных пузырьков. Молекулы растворенного газа служат центрами формирования этих пузырьков. Молекулы, находящиеся вблизи или на поверхности кавитационных пузырьков, подвергаются значительным деформациям, приводящим к разрыву связей. Для жесткоцепных полимеров характерен разрыв связей, находящихся в центре макромолекулы. По мнению авторов, деструкция обусловлена действием сил сдвига высокой интенсивности, а не термическим или электрическим эффектом процесса кавитации.

Исследование, проведенное в работе [14], посвящено изучению влияния ультразвукового облучения на депрессорные свойства растворов полимеров. Было продемонстрировано значительное улучшение депрессорных свойств растворов полимера в олефиновом растворителе после обработки ультразвуком.

Это улучшение связано с разрушением ассоциатов полимера, что приводит к более равномерному распределению их в растворе. Отмечено, что с увеличением времени ультразвукового облучения увеличивается время релаксации полимера в растворе, а значения вязкости и плотности раствора снижаются. Таким образом, развитие химических реакций в ультразвуковом поле тесно связано с явлением кавитации - процессом образования и исчезновения пузырьков в жидкой среде под действием ультразвуковых волн, сопровождаемым гидравлическими ударами. Воздействие акустической энергии на растворы полимеров приводит к снижению вязкости и молекулярной массы за счет фрагментации цепей на активные частицы.

Влияние ультразвуковой обработки на коллоидно-дисперсные свойства нефтяных систем

Первые исследования в области звукохимии неводных систем [10] послужили стимулом для широкого спектра новых исследований, в которых было отмечено значительное увеличение скорости и повышение селективности звукохимических реакций. Локализованное высвобождение энергии ультразвукового поля в ограниченных областях обрабатываемой системы, с последующим резким охлаждением, сопровождается ускорением химических процессов. Благодаря обработке холодной жидкости не происходит разрушение целевых продуктов, что повышает селективность процесса. Нефть, ее фракции и остатки, как правило, представляют собой не молекулярные растворы, а коллоидно-дисперсные системы. Для нефтей с высоким содержанием смолоподобных веществ характерны аномалии вязкости и электрофизических свойств в определенных температурных диапазонах. В работе [15] исследовалось воздействие ультразвука на нефти различной природы и остатки их перегонки с разной глубиной отбора фракций. Авторы отмечают, что в работах [10,8] акустические колебания приводят к деструкции высокомолекулярных молекул линейного и разветвленного строения, а также алкилароматических углеводородов с длинными боковыми заместителями. Разрушение молекул

происходит там, где энергия валентной связи оказывается недостаточной для противодействия воздействующей силе. В случае молекул нормальных алканов это касается С-С связи, ближайшей к центру молекулы, а для ароматических углеводородов с алкильным заместителем - β -связи боковой цепи. Результатом такой деструкции является образование свободных радикалов разной молекулярной массы и структуры. Данные радикалы, образующиеся после ультразвукового воздействия, обладают повышенной активностью и способны вступать в реакции инициирования и рекомбинации с молекулами и радикалами различных углеводородов. В результате этих реакций в системе могут образовываться высокомолекулярные углеводороды, способные создавать новые центры сверхсоставных структур. Взаимодействие свободных радикалов может приводить к образованию углеводородов с меньшей молекулярной массой по сравнению с исходными соединениями. После прекращения ультразвукового воздействия новые молекулы углеводородов могут интегрироваться как в дисперсионную среду, так и в сольватную оболочку сверхсоставных структур. В исследовании [16] было исследовано влияние ультразвукового воздействия на вязкостно-температурные характеристики нефтей различного химического состава. Наибольший депрессорный эффект был отмечен для парафинистых смолистых нефтей. Применение технологии повышения нефтеотдачи, основанной на ультразвуковом воздействии на пласты-коллекторы, позволяет восстановить их продуктивность и приемистость в случае формирования скин-слоев в призабойной зоне в процессе эксплуатации. Ультразвуковая обработка проводилась с использованием погружаемого скважинного прибора при интенсивности поля до 10 кВт/м², спускаемого в зону перфорации на стандартном каротажном кабеле. Интенсивность акустического поля вблизи стенок скважины составляла около 1 кВт/м², а на расстоянии 1 м - порядка 0,2 кВт/м² [8].

В процессе добычи нефти глубина ее залегания может достигать от нескольких сотен до тысяч метров, поэтому ультразвуковое воздействие проводится поточно с интервалом до 1 метра по вертикали. Для этой цели

существует широкий ассортимент ультразвуковых излучателей разного диаметра, что позволяет осуществлять акустическую обработку как в стволе скважины, так и через насосно-компрессорные трубы. Эффект от применения ультразвукового метода сохраняется в течение нескольких суток до двух и более недель в зависимости от состава нефти. Одним из преимуществ данного метода является его экологическая и техническая безопасность. Рентабельность применения ультразвукового воздействия значительно выше по сравнению с использованием ингибирующих присадок или теплового метода. Увеличение дебита скважин связано с разрушением скин-слоев, представляющих собой различные органические и неорганические структуры, колматирующие зону перфорации. Сотрудниками Московского инженерно-физического института был изучен процесс интенсификации нефтедобычи под действием акустического поля на пласт из скважины [17]. Исследования показали, что скорость прогрева при использовании данного метода напрямую зависит от количества диссипируемой энергии акустического поля у стенок скважины. Это приводит к повышению температуры в околоскважинном пространстве на 10-13 градусов Цельсия, что на практике приводит к увеличению дебита скважины в среднем на 5-12 процентов. Стоит отметить, что в отличие от традиционного теплового метода обработки, использование акустического воздействия оказывается более эффективным благодаря более равномерному и глубокому прогреву среды.

Под руководством О. В. Абрамова в Институте общей и неорганической химии РАН им. Н. С. Курнакова было разработано ультразвуковое оборудование и технологии для интенсификации добычи нефти на месторождениях Западной Сибири и Самарской области. С использованием ультразвуковой обработки удалось увеличить коэффициент продуктивности нефтяных скважин в среднем на 33 процента. Кроме того, было зафиксировано снижение обводненности скважинной жидкости в среднем на 4 процента [8].

В других исследованиях была показана возможность использования акустической обработки для предотвращения образования солеотложений на нефтяном оборудовании при добыче, хранении и транспорте углеводородов.

Влияние акустического поля на пластовые воды приводит к объемной кристаллизации неорганических солей за счет увеличения флуктуации плотности, коэффициента диффузии и других физико-химических факторов. Образовавшиеся кристаллы менее склонны к оседанию на металлических деталях и более эффективно выводятся с потоками воды [18,19].

Были проведены исследования влияния ультразвука и химических добавок на реологические характеристики нефти, добываемой на Лузановском месторождении [20]. Результаты показали, что ультразвуковое обработка (УЗО) способствует дезинтеграции надмолекулярных структур нефтяного дисперсного системы (НДС) за счет нелинейных акустических эффектов. При комбинированном использовании ультразвука и химических реагентов последние равномерно распределяются по всему объему нефти и предотвращают восстановление разрушенных надмолекулярных структур.

В исследовании, проведенном Плиссом и его коллегами [21], было изучено воздействие ультразвука на физико-химические свойства нефти из Голубевского месторождения в Самарской области. Было обнаружено, что вязкость нефти уменьшилась в три раза уже после пяти минут обработки ультразвуком. Авторы объясняют этот эффект разрушением структурной сетки, состоящей из молекул парафинов, смол и асфальтенов, под действием ультразвука. Отмечается, что после прекращения ультразвукового воздействия система постепенно восстанавливается за счет хаотического броуновского движения молекул.

Изменение вязкости нефти из Голубевского месторождения при воздействии акустического поля связано с разрушением слабых межмолекулярных ван-дер-ваальсовых сил. Авторы исследования считают, что необратимое снижение вязкости нефти наблюдается при интенсивности ультразвуковых колебаний, превышающей 10 Вт/см^2 .

Влияние ультразвукового облучения на асфальтены в нефти было изучено в работах [22,23]. Исследования включали изменение концентрации растворителя, температуры и времени ультразвукового облучения. Результаты показали, что в нефтяных системах под воздействием ультразвука размер

асфальтеновых кластеров уменьшается. Также было отмечено, что после 10 минут ультразвукового воздействия наблюдалась тенденция к снижению осадка асфальтенов. Увеличение времени ультразвукового воздействия и частоты поля позволяет значительно улучшить проницаемость карбонатных пластов.

Авторы предложили механизм действия ультразвука на асфальтены. По их мнению, под воздействием ультразвука происходит распад асфальтеновых агрегатов, а затем рекомбинация образующихся радикалов, что приводит к образованию новой асфальтеновой частицы.

Исследование изменения реологических свойств высокопарафинистой нефти Харьягинского месторождения было проведено в работе [24]. Было показано, что при ультразвуковом облучении с добавлением воды можно значительно улучшить реологические свойства нефти и продлить период релаксации этих свойств. Автор предполагает, что длительный период восстановления структурно-механических свойств нефти вызван блокированием водородом и гидроксонием воды активных частей молекул парафина, разрушенных в ультразвуковом поле.

В работе Промтова М. А. [25] было продемонстрировано, что кинетика процессов перегонки и крекинга, являющихся ключевыми технологиями переработки нефти и нефтепродуктов, может быть модифицирована различными химическими и физическими методами. Эти методы приводят к перестройке нефтяной дисперсной системы (НДС), изменению радиуса ядра и толщины адсорбционно-сольватной оболочки сольватированных структурных единиц (ССЕ).

В технологии интенсивного разделения углеводородного сырья (ТИРУС) используется ультразвуковое облучение (УЗО) в условиях кавитации. При этом происходит термомеханическое воздействие на нефть, инициирующее низкотемпературное разрушение ее компонентов без использования катализаторов [8].

В работе [26] описана инновационная технология "Висбрекинг-ТЕРМАКАТ", основанная на мягком термическом крекинге, усиленном

акустической обработкой исследуемой жидкости. В процессе закачки энергии ультразвукового поля в жидкость происходит изменение гидродинамики и дисперсионной устойчивости жидких сред. Применение кавитационного метода существенно подавляет процессы коксообразования и интенсифицирует процессы деструкции. Также значительно снижается температура крекинга до 410 °С, давление с 2,5 до 0,2 Мпа, а металлоемкость оборудования уменьшается в несколько раз.

Компания SulphCo разработала технологию "SonoCracking", в которой используется мощный ультразвук для обработки смеси сырой нефти и воды с целью изменения молекулярной структуры воды и углеводородов [8]. В процессе применяются катализаторы, разработанные компанией SulphCo. Результатом является снижение содержания серы в нефти, разрыв связей высокомолекулярных компонентов и увеличение содержания светлых фракций.

Исследователи [27] изучали превращение нефтяных остатков под воздействием ультразвукового облучения (УЗО). Они обнаружили, что акустическая обработка приводит к изменению химического состава нефтяного остатка, включая увеличение содержания асфальтенов и снижение содержания парафинонафтеновых углеводородов. Кроме того, они обнаружили, что при увеличении частоты ультразвука степень конверсии снижается, а при увеличении интенсивности обработки наблюдается быстрый перегрев исследуемого образца.

Бесовым А.С. и его коллеги [28] на примере н-декана и н-октана продемонстрировали принципиальную возможность протекания процессов химической деструкции углеводородов в кавитационной области при дополнительном воздействии электрическим полем. Внутри кавитационного пузырька возникает электрический разряд, который приводит к образованию свободных радикалов. Исследователи показали, что при таком методе воздействия на н-декан и н-октан образуются около 2% непредельных углеводородов (этилен и 1-алкены) и ароматические соединения, преимущественно бензол.

В работе [29] на примере *n*-декана было показано, что ультразвуковое воздействие приводит к разрыву межмолекулярных связей с последующей рекомбинацией разнообразных радикалов и образованию новых веществ.

Считалось, что кавитация оказывает негативное влияние на стенки трубопровода, приводя к увеличению износа рабочих органов и сокращению срока их службы. Однако, авторы [30] с помощью комплекса дистанционной электромагнитной диагностики показали, что процесс кавитации не является столь разрушительным, как предполагали ранее. Хотя происходит изменение структуры трубопровода, серьезного разрушения внутренней поверхности трубопровода не наблюдается. Эти изменения лишь характеризуются небольшим увеличением напряженного состояния нефтепровода.

В работе [31] было исследовано влияние и эффективность использования ультразвукового воздействия на процесс разделения устойчивых эмульсий на составляющие компоненты. При УЗО на частоте 44 кГц и интенсивности излучения 4 Вт/см² наблюдалось укрупнение капель воды, их выпадение и скопление у дна сосуда. Следует отметить, что чем продолжительнее было время воздействия (30 мин), тем в большей степени происходило разделение эмульсий. Авторами была выявлена прямая зависимость интенсивности разделения от площади излучения ультразвуковых колебаний. В отсутствие УЗО разделение прекращалось.

Статья [32] исследовала оптимальные условия использования ультразвукового оборудования (УЗО) для высоковязких и неньютоновских жидких сред. Результаты этого исследования привели к предложению модели, которая позволяет более точно определить области кавитации в различных технологических объемах в зависимости от их размеров и формы. Монография на повышение эффективности химических процессов и смежных технологий путем оптимизации воздействия ультразвука на различные среды. В монографии рассматривается создание специализированных систем колебаний, способных обеспечивать наилучшее ультразвуковое воздействие с максимальной

эффективностью. Также предоставляются рекомендации по использованию ультразвукового оборудования в промышленности, сельском хозяйстве и домашнем хозяйстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (CONCLUSION)

Следовательно, многие существующие типы нефти характеризуются повышенным содержанием парафинов, что негативно сказывается на их низкотемпературных свойствах и создает сложности при транспортировке и хранении. Для улучшения этих свойств нефти применяются различные физические методы, среди которых одним из наиболее перспективных является ультразвуковое воздействие. Акустическое воздействие направлено на изменение как физических, так и химических свойств нефти. В результате ультразвукового облучения интенсивным акустическим полем происходит разрыв межмолекулярных связей, что обусловлено кавитационными процессами в нефтяных дисперсиях. Обработка парафинистых нефтей с высоким содержанием сахарозы активно влияет на улучшение структурно-механических параметров при оптимальных значениях времени, температуры и давления.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ (CONFLICT OF INTEREST)

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

БИБЛИОГРАФИЯ (BIBLIOGRAPHY):

1. Алфаяд А.Г.Х., Кемалов Р.А. Анализ волнового воздействия на изменение реологических характеристик тяжелой нефти // Технологии нефти и газа. 2022. № 2 (139). С. 55-58.
2. Алфаяд А. Г. Х., Валиев Д.З. Анализ методов волнового воздействия на призабойную зону пласта // Цифровая наука. 2021. №3. С.110-122.

3. Карманов Т.Д., Калиев Б.З. Нугуманов К.К. Виброволновое воздействие на призабойную зону пласта // OIL&GAS JOURNAL RUSSIA. 2013. № 10. С. 40-43.
4. Умарбеков Р.О. Технологии и реагенты, применяемые для интенсификации притока газа // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». 2020. № 4. С. 49–58.
5. Яковлев В. В., Воскобойник В. А., Ткаченко В. А., Бондарь В. В., Гончаренко Т. Б. Импульсно-волновое воздействие на разветвленную скважину // IV International Scientific and Practical Conference. 2020. № 2. С. 196–201.
6. Умняев В.Г. Развитие методов акустического воздействия из скважин с целью повышения конденсатоотдачи пласта. Ухта.: 2013. 23 с.
7. Владимиров А.И. Разработка волновой технологии и оборудования для транспорта высоковязких нефтей и нефтепродуктов // Учётный номер в БД источника 022000500271. № гос. регистрации-01200307565, 2005. С. 146.
8. Ануфриев Р.В. Влияние ультразвуковой обработки на структурно-механические свойства и состав нефтяных дисперсных систем: дис. ... канд. хим. наук: 02.00.13. – Томск, 2017. – 170 с.
9. Блин, Г. Физическая акустика: пер. с англ. М. : Мир, 1967. – 138 с.
10. Маргулис, М. А. Звукохимические реакции и сонолюминесценция / М. А. Маргулис. – М. : Химия, 1986. – 288 с.
11. Симионеску, К. Механохимия высокомолекулярных соединений / К. Семионеску, К. Опра. – М. : Мир, 1970. – 354 с.
12. Каргин, В. А. Блок-полимер на основе фенольно-формальдегидной смолы и нитрильного каучука / В. А. Каргин, Б. М. Коварска, Л. И. Голубенкова, // ДАН СССР. – 1957. – Т. 112, № 3. – С. 485–486.
13. Берлин, А. А. Механохимические превращения и синтез полимеров / А. А. Берлин // Успехи химии. – 1958. – Т. 27, № 1. – С. 94–106.
14. Влияние ультразвуковой обработки на депрессорные свойства растворов полимера / А. Ф. Кемалов [и др.] // Нефтехимия и нефтепереработка. – 2006. – № 12. – С. 32–34.

15. Клокова, Т. П. Влияние ультразвука на коллоидно-дисперсные свойства нефтяных систем / Т. П. Клокова, Ю. А. Володин, О. Ф. Глаголева // Химия и технология топлив и масел. – 2006. – № 1. – С. 32–34.
16. Ультразвуковая обработка нефтей для улучшения вязкостно-температурных характеристик / Г. И. Волкова [и др.] // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2012. – № 2. – С. 3–6.
17. Максимов, Г. А. Моделирование интенсификации нефтедобычи при акустическом воздействии на пласт из скважины / Г. А. Максимов, А. В. Радченко // Электронный журнал «Техническая акустика». – 2003. – № 10. – С. 1–16.
18. Муллакаев, М. С. Применение ультразвуковой технологии для восстановления продуктивности нефтяных скважин Западной Сибири и Самарской области / М. С. Муллакаев, В. О. Абрамов, В. О. Прокопцев // Нефтепромысловое дело. – 2013. – № 6. – С. 63–68. 83.
19. Mullakaev, M. S. Development of ultrasonic equipment and technology for well stimulation and enhanced oil recovery / M. S. Mullakaev, V. O. Abramov, A. V. Abramova // Journal of petroleum science and engineering. – 2015. – № 125. – P. 201–208.
20. Исследование воздействия ультразвука и химических реагентов на реологические свойства нефти Лузановского месторождения / М. С. Муллакаев [и др.] // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2011. – № 11. – С. 23–28.
21. Плисс, А. А. Влияние ультразвука на физико-химические свойства нефти / А. А. Плисс, В. П. Золотов, А. В. Якимов // Интервал. – 2007. – № 3. – С. 36–39.
22. Shedid, A. An ultrasonic irradiation technique for treatment of asphaltene deposition / A. Shedid // Journal of petroleum science and engineering. – 2004. – № 42. – P. 57–70. 91.
23. Najafi, I. Asphaltene flocculation inhibition with ultrasonic wave radiation: a detailed experimental study of the governing mechanisms / I. Najafi, M. Amani // Advances in petroleum exploration and development. – 2011. – V. 2, № 2. – P. 32–36.

24. Остащенко, Б. А. Изменение реологических свойств нефти / Б. А. Остащенко // Вестник. – 2007. – № 4. – С. 2–3.
25. Промтов, М. А. Импульсные технологии для переработки нефти и нефтепродуктов / М. А. Промтов, А. С. Авсеев // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2007. – № 6. – С. 22–24.
26. Применение процесса «Висбрекинг-ТЕРМАКАТ» в структуре действующих НПЗ / А. К. Курочкин [и др.] // «Нефтепереработка и нефтехимия – 2005»: Материалы конгресса нефтегазопромышленников России «Нефтегазовый комплекс – реальность и перспективы». – 2005. – С. 70–71.
27. Теляшев, И. Р. Исследование превращений нефтяных остатков при ультразвуковой обработке / И. Р. Теляшев, А. Р. Давлетшин, Р. Р. Везиров // Материалы XXXXVII-й научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – 1996. – Т. 1. – С. 176–178.
28. Деструкция углеводородов в кавитационной области в присутствии электрического поля при активации водными растворами электролитов / А. С. Бесов [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2003. – Т. 29, № 5. – С. 71–77.
29. Alkane Sonochemistry / K. S. Suslick [et al] // J. Phys. Chem. – 1983. – № 87. P. 2299– 2301.
30. Крапивинский, Е. А. Исследование влияния ультразвуковой кавитации на состояние нефтепровода при помощи комплекса дистанционной электромагнитной диагностики / Е. А. Крапивинский, М. В. Козачок, П. А. Пахотин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 9. – С. 386–390.
31. Хмелев, В. Н. Исследование влияния ультразвукового воздействия на процесс разделения устойчивых эмульсий / В. Н. Хмелев, С. Н. Цыганок, Ю. М. Кузовников // Южно-Сибирский научный вестник. – 2012. – № 1. – С. 175–177.
32. Хмелев, В. Н. Выявление оптимальных условий ультразвуковой кавитационной обработки высоковязких и неньютоновских жидких сред / В. Н. Хмелев, А. В. Шалунов, Р. Н. Голых, С. С. Хмелев // Южно-Сибирский научный вестник. – 2014. – № 2. – С. 138–142.

33. Хмелев В. Н. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве / В. Н. Хмелев, Г. В. Леонов, Р. В. Барсуков, С. Н. Цыганок, А. В. Шалунов. – Бийск. : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2007. – 400 с.