

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Самарский государственный технический университет»

На правах рукописи

Коваль Максим Евгеньевич



**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРИГОТОВЛЕНИЯ
БУРОВЫХ РАСТВОРОВ НА УГЛЕВОДОРОДНОЙ ОСНОВЕ
МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

25.00.15 – Технология бурения и освоения скважин

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Живаева Вера Викторовна

Самара – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1 Промывка горизонтальных и наклонно-направленных скважин.....	10
1.1 Роль буровых растворов при бурении скважин.....	10
1.2 Анализ применения промывочных жидкостей для бурения горизонтальных участков.....	13
1.3 Эмульсии и теория эмульгирования	16
1.4 Инвертные эмульсионные растворы.....	19
1.5 Выводы по главе 1.....	22
Глава 2 Способы приготовления эмульсионных растворов на углеводородной основе	24
2.1 Стандартная технология приготовления растворов на углеводородной основе на скважинной площадке.....	24
2.2 Регулирование параметров растворов на углеводородной основе	25
2.3 Альтернативная технология приготовления эмульсионных растворов.....	26
2.4 Физические основы кавитации	27
2.5 Ультразвуковые колебательные системы на основе пьезоэлементов	30
2.6 Выводы по главе 2.....	35
Глава 3 Методика проведения исследований эмульсионных растворов	36
3.1 Методы оценки свойств.....	36
3.2 Анализ применяемых составов эмульсионных растворов на углеводородной основе	46
3.3 Порядок приготовления РУО.....	52
3.4 Выводы по главе 3.....	52
Глава 4 Анализ результатов лабораторных исследований	54
4.1 Влияние способ приготовления эмульсий на их технологические параметры	54
4.2 Влияние частоты ультразвуковых волн на кавитацию	64

4.3 Влияние продолжительности воздействия ультразвуковых волн, работающих в режиме кавитации, на параметры эмульсий.....	65
4.4 Выводы по главе 4.....	73
Глава 5 Оценка экономической эффективности.....	74
5.1 Существующие установки для очистки металлических деталей от ржавчины и масла.....	74
5.2 Сценарные условия и результаты расчёта экономической эффективности..	79
Заключение	81
Список литературы	83
Приложение А Расчёт экономической эффективности	92

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Вовлечение в эксплуатацию остаточных запасов на месторождениях поздней стадии разработки требует бурение наклонно-направленных и горизонтальных скважин. В сложившейся обстановке зарождаются новые требования по повышению эффективности процессов бурения. На данном этапе технологического развития отрасли это достижимо за счёт снижения непроизводительного времени, затрачиваемого компаниями при ликвидации осложнений, связанных с нестабильностью ствола скважин, путём применения растворов на углеводородной основе (РУО). К преимуществам РУО относятся:

- высокая ингибирующая способность и низкая фильтрация, обеспечивающие устойчивость ствола и минимальное загрязнение продуктивных пластов;

- устойчивость к загрязнениям что даёт возможность его многократного повторного использования;

- высокая смазывающая способность, повышающая эффективность бурения скважин со сложным профилем.

В этих условиях растворы на углеводородной основе позволяют решать недостижимые для других типов промывочных жидкостей задачи, связанные с предотвращением осложнений при проводке скважин и качественным вскрытием продуктивных пластов. Успешному внедрению данного типа растворов препятствуют сравнительно высокие затраты на его приготовление. В этой связи, наиболее существенным является разработка решений по интенсификации диспергирования и повышения качества смешения компонентов при приготовлении РУО.

Степень разработанности темы исследования

Большой вклад в понимание процессов повышения дисперсности твердой и жидкой дисперсных фаз в буровом растворе и особенностей управления их свойствами при бурении горизонтальных скважин и скважин с большими отходами внесён трудами: Ю. Е. Алексеева, Б. А. Андресона, В. И. Балаба, Е. В.

Беленко, П. Бечер, А. И. Булатова, Л. П. Вахрушева, В. Д. Городнова, Дж. Р. Грея, Г. С. Г. Дарли, Ян. Джиниан, В. В. Живаевой, В. Н. Кошелева, Р. Ф. Крюгер, М. И. Липкеса, Н. Маковея, В. С. Новикова, М. В. Нуцковой, А. И. Острягина, А. И. Пенькова, Ю. М. Просёлкова, В. И. Рябченко, О. В. Савенок, Р. И. Федосовой, И. В. Чениковой, С. Н. Шишкова, Шу Юн.

Несмотря на реальные успехи в области продвижения эмульсионных буровых растворов и технологий промывки горизонтальных скважин, усовершенствование существующих и получение новых буровых растворов, отвечающих повышенным требованиям горизонтального бурения, до сих пор является одной из актуальнейших задач сегодняшнего дня.

Цель работы

Повышение эффективности строительства скважин за счёт формирования стабильной структуры бурового раствора на углеводородной основе с регулируемыми физико-механическими свойствами методом ультразвукового воздействия на стадии смешения компонентов и диспергирования.

Идея работы

Разработка методики приготовления стабильного бурового раствора на углеводородной основе с применением ультразвуковой кавитации.

Задачи исследований

1. Рассмотреть особенности применения РУО для бурения горизонтальных и наклонно-направленных скважин.
2. Проанализировать существующие способы приготовления эмульсионных растворов на углеводородной основе.
3. Определить параметры для контроля технологических свойств эмульсионных буровых растворов, приготовленных различными способами.
4. Разработать методику приготовления раствора на углеводородной основе с применением ультразвукового воздействия и выполнить сравнительные исследования эмульсионных буровых растворов, приготовленных разными способами.
5. Оценить влияние способа приготовления эмульсионного бурового

раствора на технико-экономические показатели бурения.

Научная новизна работы

1. Разработаны математические модели, позволяющие рассчитать средний размер частиц водной фазы эмульсии и реологические показатели в зависимости от продолжительности ультразвукового воздействия.

2. Обоснован механизм повышения стабильности эмульсионного бурового раствора на углеводородной основе созданием регулируемой кавитации путём применения ультразвукового воздействия.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретически обоснована связь технологических параметров эмульсионных буровых растворов с продолжительностью ультразвукового воздействия различной мощности.

Разработанная методика приготовления эмульсионных буровых растворов позволяет сократить время проведения лабораторных испытаний на стадиях проектирования, для отражения в проектах на строительство скважин, и оперативной доработки рецептур при участии в ликвидации аварий, что подтверждено справкой о применении в Лаборатории аналитических и технологических исследований при строительстве скважин ООО «Самара-НИПИнефть».

Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» в курсе «Буровые технологические жидкости» и по направлению подготовки 21.04.01 «Нефтегазовое дело» магистерская программа «Строительство наклонно-направленных и горизонтальных скважин».

Методология и методы исследований

В работе применялись статистические методы определения влияния концентрации компонентов на электростабильность растворов на углеводородной основе (РУО). Стендовые и экспериментальные исследования влияния различных способов приготовления на технологические параметры РУО. Аналитические методы определения содержания хлоридов и извести. Определение дисперсности

водной фазы с помощью динамического рассеяния света в углеводородных средах.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанная технология получения эмульсии сокращает время приготовления буровых растворов в лабораторных условиях до 10 мин, что в 18 раз быстрее по сравнению с временем приготовления на стандартном перемешивающем устройстве «Hamilton Bech». Получаемая эмульсия сохраняет технологические параметры как после термостарения в течение 16 ч при температуре 80 °С в вальцовой печи (при перемешивании со скоростью 25 об/мин), так и после нахождения в покое в течение 14 сут.

2. Воздействие ультразвуковых волн частотой (20 – 40) кГц обеспечивает достижение рабочих параметров: пластической вязкости не менее 18 мПа·с (49 °С), динамического напряжения сдвига не менее 5 Па и сокращение среднего размера частиц водной фазы эмульсии с 464 мкм до 34 мкм.

Степень достоверности результатов исследований подтверждается аналитическими и экспериментальными исследованиями, воспроизводимостью полученных данных и высокой сходимостью результатов расчетных величин с результатами лабораторных исследований.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы обсуждались на:

- Научно-исследовательский семинар ФГБОУ ВО «СамГТУ» (3 марта 2020 г., г. Самара);
- Техническая конференция SPE «Новая эра в бурении» (4 – 6 июня 2019 г., г. Сочи);
- IX научно-практическая конференция ПАО «НК «Роснефть» «Инжиниринг строительства и реконструкции скважин» (4 – 5 сентября 2019г., г. Самара);
- Международная научно-практическая конференция «Ашировские чтения» (24 – 27 сентября 2019 г., г. Туапсе);
- Российская нефтегазовая техническая конференция SPE (22 – 24 октября 2019 г., г. Москва);

- Научно-практическая конференция «Актуальные задачи нефтегазохимического комплекса. Добыча и переработка» (21 – 22 ноября 2019 г., г. Москва);
- XII корпоративная конференция по аварийности при строительстве скважин и резке боковых стволов (6 – 8 июня 2018 г., г. Красноярск);
- VIII научно-практическая конференция «Инжиниринг строительства и реконструкции скважин» (5 – 6 сентября 2018г., г. Самара);
- IV конференция «Технологии в области разведки и добычи нефти ПАО «НК «Роснефть 2018» (23 – 25 октября 2018 г., г. Москва).

Личный вклад

Проведён анализ применения промывочных жидкостей для бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин. Сформулированы цели и задачи исследований. Изучены существующие способы приготовления эмульсионных растворов (РУО). Рассмотрены методики измерения параметров растворов на углеводородной основе. Разработана методика исследования ультразвукового воздействия на технологические параметры и дисперсность РУО. Получены зависимости изменения технологических параметров и дисперсности РУО от продолжительности воздействия ультразвуковых волн частотой 40 кГц (50 Вт) и 22 кГц (1000 и 2000 Вт), работающих в режиме кавитации. Определено минимальное время, необходимое для получения стабильной эмульсии, сохраняющей технологические параметры как после испытания на старение бурового раствора в динамических условиях, так и при нахождении РУО в статических условиях. Разработана методика приготовления эмульсионных буровых растворов с применением ультразвукового воздействия.

Данные о публикациях автора

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 10 печатных работах, в том числе в 7 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 2 статьях – в изданиях, входящих в

международные базы данных и системы цитирования Scopus.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа включает в себя введение, пять глав с выводами по каждой из них, заключение, список литературы из 83 наименований и 1 приложение. Материал диссертации изложен на 94 страницах, содержит 18 таблиц, 40 рисунков.

ГЛАВА 1 ПРОМЫВКА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ И НАКЛОННО-НАПРАВЛЕННЫХ СКВАЖИН

1.1 Роль буровых растворов при бурении скважин

Одной из основных причин снижения фактической продуктивности горизонтальных скважин, по сравнению с их потенциальными возможностями, является изменения природного состояния нефтегазовых пластов в околоскважинной зоне [74]. Отличительные особенности бурения горизонтальных скважин от вертикальных заключаются в:

- увеличении продолжительности воздействия бурового раствора и его фильтрата;
- росте количества и интенсивность деформаций бурильного инструмента;
- вскрытии большего количества геологических неоднородностей;
- усложнении процесса бурения, заканчивания и испытания скважин.

Таким образом, при разработке программ бурения горизонтальных скважин прежде всего должны быть рассмотрены вопросы выбора и приготовления буровых растворов. В процессе бурения горизонтальной скважины часто используют несколько буровых растворов. Основное назначение бурового раствора меняется в зависимости от того, какой участок находится в бурении.

Выбор бурового раствора при бурении горизонтальных и вертикальных скважин не отличается. Однако для горизонтальных скважин требуется более учитывать во внимание больше количество факторов, что усложняет данную процедуру. [30, 31, 32, 77, 78]

Непрерывность бурения возможна при сохранении устойчивости стенок скважины. Устойчивость будет зависеть от напряженного состояния горных пород и физико-химического взаимодействия с ними бурового раствора и его фильтрата. Нестабильность ствола скважины определяется:

- механическими напряжениями;

- растяжениями, разрывами или пластическим течением;
- разрушениями при сжатии – растрескиванием;
- разрушениями вследствие трения, сотрясения и ударов;
- физико-химическим взаимодействием с буровыми растворами и их фильтрациями;
 - гидратацией, набуханием и диспергированием;
 - диффузией, осмосом и капиллярной пропиткой;
 - растворением пород;
- физическим взаимодействием с буровыми растворами;
 - эрозией;
 - раскрытие трещин;
 - проникновением жидкости под перепадом давления.

По мнению исследователей [8, 61, 55, 63, 74], наибольшее снижение механической прочности пород связано с адсорбцией воды глинистыми минералами. Это приводит к набуханию глин, снижает структурные связи и ослабляет предельное напряжение сдвига. Механизмы набухания глинистых частиц связаны с расклинивающим действием сольватных оболочек воды, формирующихся в процессе гидратации глины и при взаимодействии её диффузных слоев.

Кроме адсорбции существенными являются процессы массопереноса между скважиной и пластом (осмотический массообмен), которые зависят от состава глинистых минералов, их гидрофильности и адсорбционных свойств. Диффузия вызывает расслабление межмолекулярных связей между глинистыми частицами, что способствует глубокому диспергированию глин.

Для вертикальных скважин, при отсутствии тектонических напряжений, кольцевые напряжения во всех точка на контуре будут одинаковы. В случае приближения зенитного угла ствола скважины к горизонтали максимальное значение кольцевых напряжений будет наблюдаться на боковых стенках (рисунок 1.1), т. к. вышележащие породы сильнее давят сверху. С увеличением глубины пластичная деформация пород

становится выше, что приводит к выравниванию напряжений даже в горных районах.

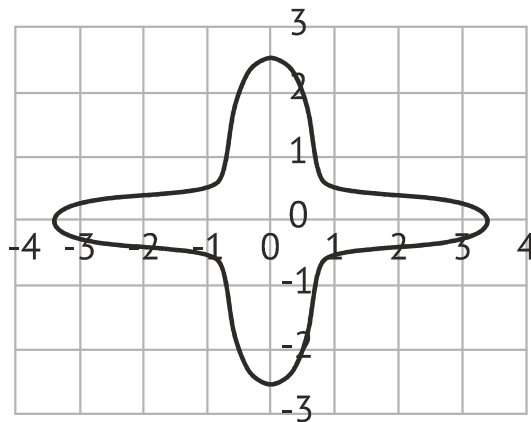


Рисунок 1.1 – Распределение кольцевых напряжений в вертикальном сечении горизонтального участка скважины

В процессе бурения горизонтальных скважин важно максимально сохранить естественную продуктивность пластов, ухудшение которой проявляется путём:

- снижения дебита скважин;
- повышения скин-эффекта.

На скин-эффект влияет не только загрязнение продуктивного пласта, но также и несовершенство вскрытия перфорацией по мощности, несовершенство заканчивания, искривление ствола скважины, наличие воздействий по повышению продуктивности, неоднородность пласта, наличие фазовой проницаемости при многофазном потоке, глубина перфорационных каналов, вынос механических примесей [62].

Пути снижения проницаемости породы [81]:

- кольматация пор твердой фазой при бурении, заканчивании и капитальном ремонте скважин;
- гидратация глинистых частиц в коллекторе;
- образование эмульсий, осадков при взаимодействии с пластовой жидкостью буровых растворов и их фильтратов;

– рост вязкости пластовых флюидов от полимеров.

В процессе фильтрации на поверхности стенки скважин образуется корка, снижающая продуктивность пласта на стадии испытаний. Это может исказить результаты подсчёта запасов. Глубокое проникновение коллоидной твёрдой фазы может навсегда ухудшить проницаемость коллектора.

Для снижения отрицательного воздействия твёрдых частиц, буровой раствор должен эффективно кольматировать коллектор. Глубина проникновения фильтрата может достигать 1 метра [44]. Следовательно он должен обладать ингибирующим действием на глинистые частицы. Также требуется минимизировать показатель фильтрации без ухудшения реологических характеристик.

Применение растворов на углеводородной основе сохраняет естественную проницаемость пород. Углеводородная основа по физико-химическим свойствам близка насыщающему пласты флюиду. [81, 62]

Для очистки скважины необходимо удалять выбуренную и обрушающуюся породу. Без эффективной очистки могут произойти серьёзные осложнения, включая прихваты, затяжки, посадки, потеря циркуляции, образование сальников, рост реологических показателей, снижение скорости проходки, увеличение объёмов разбавления. [27]

Эффективный вымыв шлама зависит от параметров бурового раствора, шлама и режима бурения. Важнейшими из них обычно считаются зенитный угол, скорость восходящего потока, вязкость и тиксотропные свойства бурового раствора [38].

1.2 Анализ применения промывочных жидкостей для бурения горизонтальных участков

Конечный коэффициент извлечения нефти (КИН) зависит от геологического строения и от применяемых технологий вскрытия пластов. Необходимо добиваться, чтобы КИН был максимально высок. Важную роль в этом несут буровые растворы.

Вместе с постоянным совершенствованием рецептур водных буровых растворов для бурения горизонтальных скважин (ГС), не всегда удаётся обеспечить сохранение коллекторских свойств и скважины дают меньший дебит нефти, чем планировалось. Растворы на водной основе ухудшают проницаемость коллектора, тем самым усложняя процесс извлечения нефти. [28]

Выбор бурового раствора для первичного вскрытия ГС осуществляется для каждого пласта, отличающегося от других основными характеристиками и условиями залегания. Для этого в настоящее время известные коллекторы разделены на четыре категории, отличающиеся схожей реакцией на технологические воздействия.

Также буровые растворы должны соответствовать требованиям правил безопасности в нефтяной газовой промышленности, в частности главе XVII «Требования безопасности к применению буровых растворов» [65]. Исследования физико-химических процессов, протекающих в системе «буровой раствор – коллектор» указывают на невозможность существования универсальных рекомендаций для сохранения максимального качества вскрытия продуктивных пластов.

В настоящее время при бурении горизонтальных скважин большое распространение получили следующие буровые растворы: безглинистые, малоглинистые, полимерные, безглинистые рассолы, растворы на нефтяной и синтетической основе. Сейчас существует два взгляда на содержание коллоидной составляющей в буровых растворах.

Зарубежные крупнейшие корпорации применяют полимер-глинистые буровые растворы, достигая низкий показатель фильтрации за счёт акриловых полимеров и бентонита. Глинистые растворы также обеспечивают приемлемую водоотдачу, удерживающую и транспортирующую способность, легки в приготовлении и поддержании плотности. Полиагликолевым и биополимерным растворам характерны псевдопластические свойства дающие разжижение при высоких скоростях

сдвига и хорошую удерживающей способностью при течении в затрубном пространстве.

Основой водных буровых растворах является структурообразователь (бентонит, биополимер, конденсированная твёрдая фаза и т. д.), обеспечивающий хорошую очистку и удерживающую способность, а также получение и регулирование реологических параметров. В акрилатных буровых растворах содержание твердой фазы легко контролировать, но они «боятся» ионов разных солей. Биополимерные буровые растворы инертны к наличию распространённых ионов кальция и магния. Высокое содержание коллоидной фракции может приводить к загрязнению коллектора при вскрытии. Применение биополимерных и малоглинистых буровых растворов характеризуется дополнительными затратами времени и финансов на приготовление и обработку раствора.

Многих недостатков, присущих растворам на водной, лишены растворы на углеводородной и псевдонефтяной основе. Их применение при бурении горизонтальных скважин исключает сальники, прихваты бурильной колонны, продляет службу долот, также снижаются энергетические затраты, ускоряются спуско-подъемные операции, достигается высокая скорость проходки, обеспечивается высокая ингибирующая способность и термостойкость. В то же время, растворы на углеводородной основе несут повышенную экологическую опасность для окружающей среды, обладают низкой выносящей способностью, характеризуются разжижением при нагреве, недостаточной тиксотропией, не возможностью снятия стандартного каротажа. Растворы обладают низкой статической и динамической фильтрацией, определяемой при температуре не ниже 49 °С.

Стоимость РУО выше стоимости растворов на водной основе, но в отличие от них РУО можно применять многократно, что в конечном итоге удешевляет данную технологию. Также при использовании РУО увеличивается дебит, сокращается время освоения скважин и существенно снижаются осложнения, связанные с затяжками и прихватами бурового

инструмента. Использование РУО показал существование дополнительных факторов, удешевляющих строительство скважин. Например, повышение устойчивости стенок скважин, сокращает время проработки ствола скважины в 2-4 раза. Перечисленные преимущества свидетельствуют о эффективности РУО при бурении скважин. Применение РУО на разведочных скважинах повышает достоверность опробований нефтяных залежей и получать приток нефти на объектах, ранее считавшихся непродуктивными.

Также существуют неводные синтетические системы растворов, для которых характерно биоразлагаемость в условиях суши и моря. В качестве основы используются синтетические продукты, выделяемые из растительного сырья, либо из синтетических углеводов. Ко всем преимуществам растворов на нефтяной основе добавляется то, что их можно утилизировать в море без ущерба для живых существ. Они имеют название «растворы на нетоксичной синтетической основе» (РНСО). Они безопасны в экологическом отношении, применимы в широком диапазоне температур и условий, отличаются хорошей удерживающей и транспортирующей способностью.

1.3 Эмульсии и теория эмульгирования

Эмульсии (лат. emulgeo – дою, выдаиваю; одной из первых изученных эмульсий было молоко) – дисперсные системы, включающие дисперсную фазу в виде мелких капель распределённых в дисперсионной жидкой среде [50].

Состав и отношение жидких фаз будет влиять на тип эмульсии, также будет сказываться применяемый эмульгатор и способ получения эмульсии [14]. Выделяют следующие типы эмульсий:

– Прямые – «масло в воде».

Эмульгаторами для данного типа служат растворимые мыла (Na^+ и K^+ соли жирных кислот). Принцип их действия заключается в адсорбировании на поверхности раздела фаз молекул эмульгатора, что снижает

поврехностное натяжение и создает плёнку, механически защищающую капли неполярной жидкости от разрушения в полярной среде.

– Обратные – типа «вода в масле» (инвертные).

Эмульгаторами выступают нерастворимые мыла (Ca^{2+} , Mg^{2+} и Al^{3+} соли жирных кислот).

– Множественные эмульсии, где в дисперсионной фазе содержатся капли дисперсионной среды.

По другому эмульсии можно разделить на [14]:

– Лиофильные – самовозникающие, обладающие устойчивостью.

Они образуются при критической температуре смешения и с некоторыми смазками.

– Лиофобные – образующиеся от механического, акустического или электрического диспергирования, и в результате конденсации капель в перенасыщенных растворах или расплавах.

Характеризуются термодинамической неустойчивостью и могут существовать только в присутствии эмульгаторов. Наилучшим образом эмульгируют поверхностно-активные, высокомолекулярные вещества, некоторые мелкодисперсные твёрдые частицы.

Для эмульсий важна дисперсность, которую можно характеризовать распределением капель по размерам. Отличие концентрированных эмульсий от разбавленных заключается в размерах капель, которые для первых могут достигать десятков мкм, а для разбавленных – только доли мкм.

Получение устойчивых эмульсий (эмульгирование) в промышленности осуществляют механическим перемешиванием ингредиентов в различных смесителях: гомогенизаторах, коллоидных мельницах. Применяют также акустическую (звуковую и ультразвуковую) технику, в частности ультразвуковой диспергатор. Реже, главным образом в лабораторных условиях, эмульсии получают электрическим диспергированием или методами конденсации, т. е. путем выделения капельно-жидкой фазы из пересыщенных паров, пересыщенных растворов или расплавов. При

достаточно низком поверхностном натяжении эмульгирование может происходить самопроизвольно (спонтанно), т. е. без интенсивного подвода энергии извне, а лишь за счет энергии теплового движения молекул и слабых конвекционных токов жидкости.

Поверхностные явления, влияющие на тип эмульсий и их стабильность (рисунок 1.2), определяются поверхностно-активными веществами (ПАВ), их концентрацией и гидрофильно-липофильным балансом (ГЛБ). Для прямых эмульсий применяют водорастворимые ПАВ с ГЛБ более 8:

- анионные;
- неионогенные;
- катионные;
- природные и синтетические высокомолекулярные ПАВ.

Стабилизация обратных эмульсий выполняется мылами переходных металлов, моноалканамидами, неионогенными ПАВ с низким ГЛБ.

Принцип действия эмульгаторов основан на снижении необходимой энергии для формирования поверхности раздела фаз. Находясь на поверхности фаз, поверхностно-активные вещества снижают поверхностное натяжение и стабилизируют капли. Со снижением поверхностного натяжения можно добиться большего измельчения дисперсной фазы и тем самым повысить стабильность эмульсии. На границе нефть-вода поверхностное натяжение достигает 50 мН/м, применение эмульгаторов позволяет его снизить до 10 мН/м [76] (рисунок 1.3).

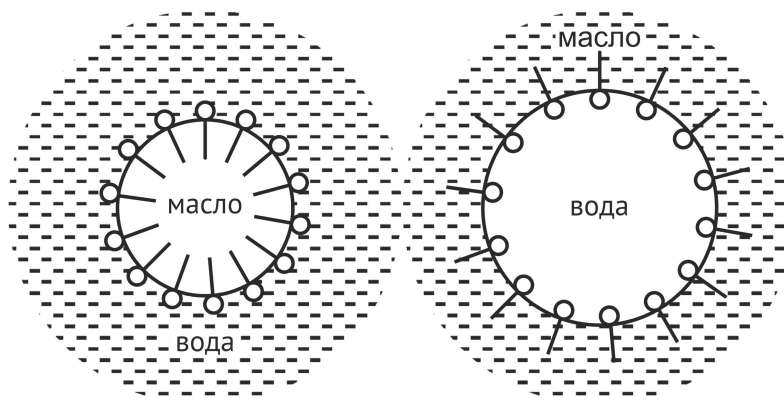


Рисунок 1.2 – Схема эмульгирования капель масла и воды

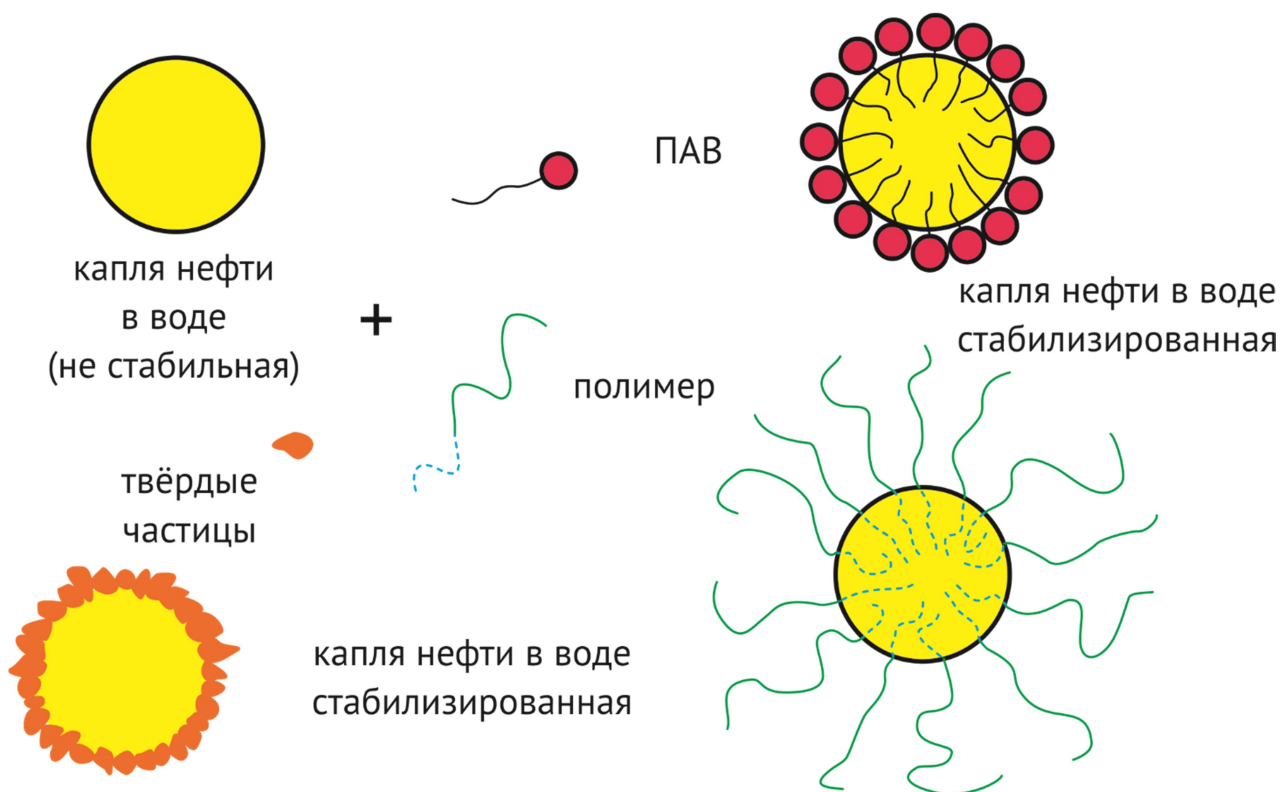


Рисунок 1.3 – Схема эмульгирования капли нефти в воде различными стабилизаторами

Поверхностно-активные вещества не только ускоряют, но и стабилизируют образующиеся эмульсии в той дисперсионной среде, где они растворяются.

1.4 Инвертные эмульсионные растворы

В бурении применяют эмульсии первого рода и второго рода. Для первых дисперсионной средой которых является полярная жидкость (вода). Основные свойства определяются дисперсионной средой, но нефтяная составляющая позволяет:

- снизить водоотдачу и придать коагуляционную устойчивость;
- изменить смачиваемость выбуриваемой породы, и стенок ствола скважины, формирование на породах и буровом инструменте смазывающих пленок, что сказывается на минимизации прихватов и затяжек, сальников на инструменте и сохранении исходного диаметра ствола;
- минимизировать крутящий момента на колонне труб, сократить трение при спуско-подъёмных операциях (СПО) и минимизировать гидравлические

сопротивления.

Первые эмульсии в бурении получали после введения нефти в раствор при роторном бурении для предупреждения и ликвидации прихватов, что снижало аварийность работ.

В то же время, после установки нефтяных ванн становилось сложнее регулировать реологические параметры буровых растворов. Это выражалось в росте вязкости, статического напряжения сдвига, снижении плотности. Изначально нефть пытались отделять, но даже её остатки давали сокращение прихватов, увеличение проходки на долото [50].

В патенте Дж. С. Свана (1923 г.) [83], предусматривалось для бурения скважин применять «неводную вязкую жидкость» (деготь, смолу или разжиженный битум). Но больше всего было уделено внимания герметизации заколонного пространства неагрессивным составом для последующего извлечения обсадных труб.

Также нефть применяли калифорнийские нефтяные компании для предупреждения загрязнения продуктивных пластов коллоидной фазой. В том числе применение нефти облегчало обратную промывку.

Буровые растворы на нефтяной основе успешно решают задачи, в которых невозможно применение водных растворов или это сопровождается существенными затратами. К особенностям РУО относятся высокая инертность, низкий показатель фильтрации, химическое родство с насыщающими коллектор флюидами, высокие смазочные и низкие коррозионные свойства.

К недостаткам водных растворов относится растворение солей, высокая коррозионная активность, способность диспергировать и разупрочнять глинистые породы, снижение фазовой проницаемости нефти при увеличении содержания воды в призабойной зоне коллектора.

Для получения эмульсионного раствора второго рода требуется углеводородная среда, коллоидный структурообразователь, стабилизированная эмульгаторами водная фаза. Дополнительно могут вводиться утяжелители,

нейтрализаторы H_2S , понизители фильтрации. Также бывают обращённые эмульсии.

Ранее в эмульсиях старались поддерживать минимальное содержание воды (не более 5%), т. к. увеличение приводило к росту вязкости. Были найдены композиции с содержанием воды от 10% до 60% получившие название «инвертные эмульсии». В настоящее время переход от одного типа к эмульсии к другому является регулируемым.

Стабильность свойств эмульсий обеспечивается хорошим эмульгированием воды и равномерным распределением органофильных частиц глины, недопущением коалесценции водной и флокуляции твёрдой фаз. Эмульгирование достигается снижением поверхностного натяжения, а предотвращение коалесценции – созданием адсорбционно-сольватных слоев на жидкой и твёрдой фазах

Перечислим достоинства РУО и способы их эффективного применения.

1. Термостойкость. Достигается за счёт применения реагентов на нефтяной основе, получаемых в результате высокотемпературного крекинга. Для этого остальные компоненты также должны обладать термостабильностью не ниже 250 °С.

2. Ингибирующая способность. Связана с инертностью углеводородов к горным породам. Неполярные жидкости не вызывают набухания глин. Водная фаза дополнительно ингибируется солями $NaCl$, $CaCl_2$, $MgCl_2$ вплоть до насыщения.

3. Низкий показатель фильтрации. Плюс фильтратом является масло. РУО обладают минимальной увлажняющей способностью, учитывающей капиллярную пропитку, диффузию, осмос, ингибирование, не достижимы для РВО.

4. Снижение плотности. Т. к. в основе РУО жидкости плотностью (760 – 840) $кг/м^3$ и подбором остальных компонентов можно обеспечить прирост плотности не более (20 – 30) $кг/м^3$.

5. Сохранение исходной проницаемости продуктивного пласта.

6. Высокая устойчивость к H_2S и CO_2 . Это достигается за счёт применения компонентов инертных к агрессивным средам.

7. Эффективные смазывающие и антикоррозионные свойства. Это достигается благодаря использованию мыл высокомолекулярных органических кислот, поверхностно-активных веществ, оргонофильных структурообразователей.

Следует рассмотреть и недостатки, присущие РУО [23]:

- отрицательное воздействие на экологию, за счет высокого содержания ароматических соединений;
- рост вязкости при попадании пластовой воды и напитавшейся водой твердой фазы;
- рост вязкости при отфильтровывании части дисперсионной среды;
- высокие значения вязкости и напряжений сдвига относительно РВО;
- существенная зависимость реологических характеристик РУО от температуры.

Кроме того, компоненты для приготовления РУО относятся к дорогостоящим и дефицитным материалам, поэтому применение данных растворов целесообразно и экономически обоснованно, когда их выбор учитывает геологические условия бурения и раскрывает потенциальные возможности РУО.

Для бурения глин эффективно применять инертные РУО. Своевременное поддержание параметров позволяет сохранять устойчивость стенок ствола до 30 сут.

1.5 Выводы по главе 1

Положительные достоинства растворов на углеводородной основе делает их наиболее подходящими для бурения пологих и горизонтальных участков скважин, интервалов продуктивных пластов. Наиболее протяжённые, в горизонтальном направлении скважины, были пробурены с применением эмульсионных буровых растворов на углеводородной основе.

С другой стороны, высокая пластическая вязкость, значительно зависящая от температуры, низкое динамическое напряжение сдвига приводят к снижению эффективности очистки ствола, по сравнению с РВО. Несмотря на ряд преимуществ, применение РУО также ограничивается экологическими требованиями (класс опасности 3 – в случае применения в качестве основы РУО дизельного топлива, класс опасности 4 – в случае применения минерального масла), технологическими трудностями приготовления и высокой стоимостью, а также, возможностями и потенциалом компаний, занимающихся строительством скважин. Таким образом, разработка новых методов приготовления РУО с подбором компонентного состава является актуальной задачей.

ГЛАВА 2 СПОСОБЫ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ЭМУЛЬСИОННЫХ РАСТВОРОВ НА УГЛЕВОДОРОДНОЙ ОСНОВЕ

2.1 Стандартная технология приготовления растворов на углеводородной основе на скважинной площадке

Современные подходы к приготовлению буровых растворов обеспечивают производительность до 100 м³/час, высокую механизацию процесса, но качество диспергирования может быть низким. Вследствие приготовленный РУО приходится либо повторно пропускать через систему приготовления, либо пускать по циклу через скважину.

Повысить дисперсность можно передав эмульсии дополнительную энергию. В настоящее время это достигается на стадии смешения водной и неводной фаз с применением гидравлического диспергатора ДГ-40 и цементирувочных агрегатов.

Принцип работы ДГ-40 заключается в соударении двух струй, развивающих скорость (80 – 120) м/с в рабочей камере, что вызывает измельчение твёрдых компонентов и эмульгирование жидких фаз. Технико-экономическая эффективность ДГ-40 достигается путём сокращения требуемого количества компонентов и времени на приготовление эмульсий.

Диспергатор гидравлический состоит (рисунок 2.1) из корпуса 1, двух соосно установленных подводящих патрубков 2 и 3, в торцах которых вмонтированы твердосплавные коноидальные насадки 4 и 5, и сливного патрубка 6.

Применение ДГ-40 повышает стабильность получаемых эмульсий, снижает расход углеводородной основы и эмульгатора. В то же время для обработки раствора требуется поддержание высокого давления (6 – 12) МПа. В качестве существенного недостатка следует отметить необходимость использования громоздкого дополнительного оборудования – цементирувочного агрегата или бурового насоса. Также для приготовления 160 м³ требуется около 3 сут.

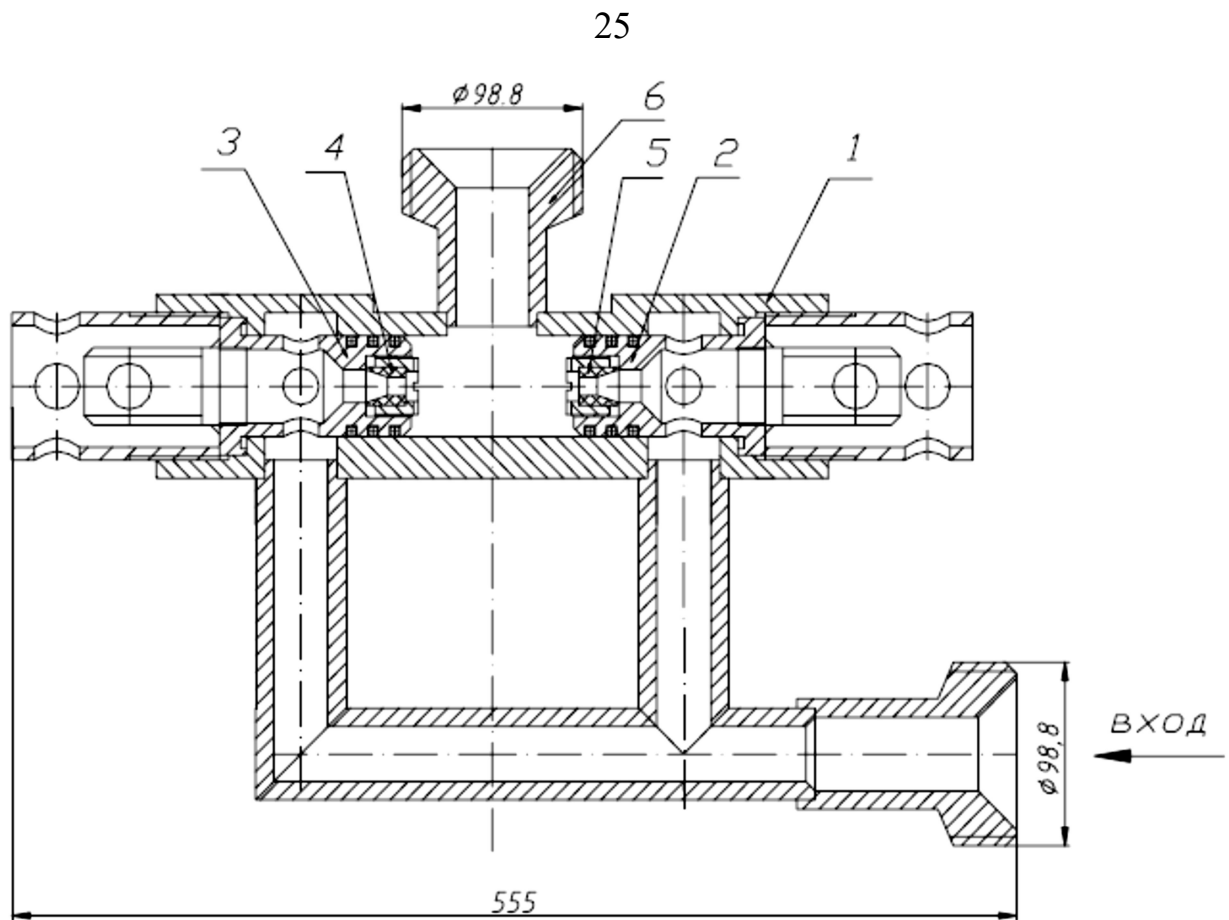


Рисунок 2.1 – Конструкция ДГ-40

Отсюда следует, что для приготовления инвертных эмульсий необходимо разрабатывать энергосберегающие технологические средства, сокращающие время приготовления РУО.

2.2 Регулирование параметров растворов на углеводородной основе

Важную роль при работе с растворами на углеводородной основе играют обработка и регулирование параметров. Для восстановления исходных свойств эмульсионных растворов требуется введение точного объёма водной фазы, т. к. при ошибке может произойти загущение системы. В условиях буровой в результате ошибочного выбора может наблюдаться:

1. рост давления на насосах;
2. забивание всасывающих и нагнетательных линий;
3. выход из строя ВЗД, роторно-управляемой системы или телесистемы из-за скачков давления.

Методы регулирования соотношения углеводородной и водной фаз:

- раздельная обработка требуемым количеством углеводородной или водной фазы;
- приготовление премикса из углеводородной и водной фаз в отдельной емкости с последующим вводом в циркуляцию.

2.3 Альтернативная технология приготовления эмульсионных растворов

В настоящее время приготовление РУО осуществляется с применением гидравлических диспергаторов, мешалок, струйных смесителей. Принцип действия данных устройств основан на механическом воздействии, часто с применением высокого давления. Особенности данного процесса является затраты большого количества энергии и низкий КПД. Рабочие узлы оборудования выдерживают дополнительные нагрузки, на преодоление которых расходуется большая часть мощности источников питания на буровой.

Затраченная энергия расходуется на измельчение компонентов и распределение их по объёму. Повышение дисперсности положительно сказывается на стабильности эмульсии и рабочих параметрах промывочной жидкости, что влияет на процесс строительства скважины. Одним из нетрадиционных подходов повышения дисперсности твердой и жидкой фаз в буровом растворе является кавитационная обработка.

Сейчас кавитационная обработка находит применение в военной сфере, пищевой промышленности, медицине, косметологии, нефтепереработке, водоочистке, металлообработке, сельском хозяйстве и других сферах деятельности. Применением кавитации оптимизирует способы воздействия на различные материалы в процессе их получения, что повышает эффективность производств и снижает затраты энергии.

В рамках данной диссертационной работы рассматривается новый способ приготовления промывочной жидкости на углеводородной основе

путём применения кавитации.

Кавитация вызывает образование в жидкости пульсирующих полостей, заполняемых парами жидкости, при схлопывании которых возникают гидродинамические возмущения интенсифицирующие процесс диспергирования компонентов бурового раствора. При реализации данного процесса:

- возрастёт дисперсность жидких и твёрдых компонентов;
- сокращается время работы оборудования (снижение расходов на персонал буровой);
- уменьшается энергозатратность приготовления бурового раствора;
- экономятся материалы, т. к. происходит их эффективное диспергирование, повышающее их более полное распределение в промывочных жидкостях.

2.4 Физические основы кавитации

Кавитация характеризуется высокой концентрацией энергии в локальных областях, выделяемой при схлопывании пузырьков. Кавитационные пузырьки, образуемые при разряжении, заполняются насыщенным паром. Последующий процесс сжатия данных пузырьков вызывает рост давления более 1000 МПа и разогрев до (8000 – 12 000) °К. Стенки пузырька при этом движутся с радиальной скоростью более 340 м/с. [69] После схлопывания каверны появляется быстро затухающая сферическая ударная волна. При создании в жидкости импульсных растягивающих напряжений, кавитационные пузырьки начинают расти из присутствующих в жидкости зародышей (устойчивых паровых и газовых пузырьков малых размеров). Форма и размер кавитационных пузырьков определяется кавитационными зародышами, создаваемым напряжением и условиями на граничащих поверхностях. [26]

В кавитационные пузырьки проникают пары, газы из жидкости, но не могут проникнуть нелетучие растворенные вещества. При схлопывании пузырька происходит ионизация и диссоциация молекул жидкости и газов.

Кавитация наблюдалась примерно во II столетии до н. э. при извлечении воды из колодцев В 1894 г. во время испытания пароходов «Дэринг» и «Турбиния» на полном ходу происходило снижение скорости и резко менялся характер работы винта.

Интенсификация процессов диспергирования протекает следующими путями:

- при схлопывании сферических пузырьков выделяются ударные волны;
- при несферическом схлопыванию образуются кумулятивные струи.

В промышленности для искусственного получения кавитации в жидкости применяют гидродинамические, электродинамические, пьезоэлектрические, магнитострикционные и механические генераторы кавитации.

Широкое распространение получили пьезоэлектрические и магнитострикционные генераторы кавитации. Принцип их действия основан на изменении геометрических размеров в переменных магнитных и электрических полях. Деформацию вызывает действие внешнего поля на элементарные заряды в ячейках кристаллов. Магнитострикционные преобразователи работают в частотах до 100 кГц, а пьезоэлектрические от 20 кГц до 1000 кГц.

Выделяют четыре стадии кавитации [69]:

1. Воздействие на жидкость ультразвуковыми (УЗ) колебаниями малой интенсивности приводит к образованию зон сжатия и зон разряжения (рисунок 2.2), меняющиеся местами в каждый полупериод волны.

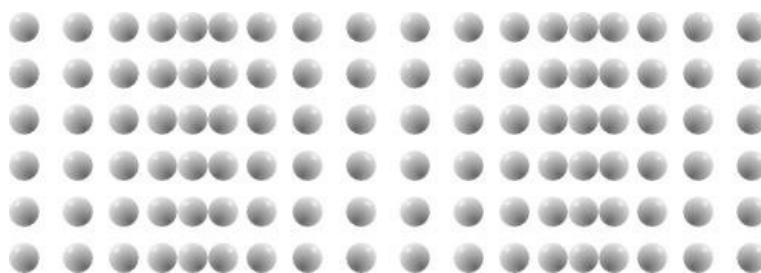


Рисунок 2.2 – Движение частиц при распространении продольной волны [69]

Между переменным звуковым давлением и смещением частиц среды,

пока не возникают нарушения сплошности среды, существует связь, при гармонических колебаниях выражающаяся формулой (2.1) [18]

$$p = \rho c \omega A \cos(\omega t - kr), \quad (2.1)$$

где A – амплитуда колебаний частиц среды, ω – угловая частота, $k = \omega/c$ – волновое число, t – время, r – расстояние от излучателя.

Амплитуда звукового давления определяется по формуле (2.2)

$$P = \rho c \omega A. \quad (2.2)$$

Связь между развиваемым в среде звуковым давлением и волновым сопротивлением среды ρc можно представить в виде колебательной скорости по формуле (2.3)

$$v = \frac{P}{\rho c} = 2\pi f A. \quad (2.3)$$

Распространение УЗ волн переносит энергию. Плотность энергии звуковой волны, приходящаяся на единицу объёма среды, определяется формулой (2.4)

$$E_s = \frac{\rho v^2}{2} = 2\pi^2 \rho f^2 A^2. \quad (2.4)$$

Энергию УЗ волн, проходящих через единицу площади за единицу времени характеризуют интенсивностью ультразвуковых колебаний. Когда волна плоска и падает перпендикулярно поверхности, то интенсивность УЗ рассчитывается по формуле (2.5)

$$I = 2\pi^2 \rho c f^2 A^2 = \frac{P^2}{2\rho c}. \quad (2.5)$$

Интенсивность выражается в Вт/см² или Вт/м².

2. Увеличение интенсивности УЗ воздействия до 1 Вт/см² приводит к нарушению однородности жидкой среды. При понижении давления выделяются растворенные газы и образуются продолжительно существующие пузырьки, окруженные слоем веществ органического состава. Стенки образовавшихся пузырей равномерно колеблются на частоте ультразвукового воздействия около равновесного диаметра.

3. Рост интенсивности УЗ воздействия до $1,5 \text{ Вт/см}^2$ ведёт к выходу из равномерных колебаний пузырей. Протекает стабильная кавитация. Пузыри становятся излучателями УЗ колебаний. По поверхностям пузырей протекают микротоки с разрядами электричества и образуются волны.

4. Продолжение роста интенсивности УЗ воздействия более $2,5 \text{ Вт/см}^2$ вызывает нестабильность процесса кавитации, отличающуюся появлением быстро возникающих парогазовых пузырей, подвергающихся мгновенному схлопыванию в фазе сжатия. Наибольшая интенсификация процессов УЗ воздействия происходит именно при захлопывании кавитационных пузырьков.

2.5 Ультразвуковые колебательные системы на основе пьезоэлементов

Ультразвуковые колебания излучаются резонансными колебательными системами (УЗКС), в состав которых входит преобразователь, усилитель механических упругих колебаний и воздействующий инструмент, конструктивно возможно совмещение нескольких преобразователей.

Пьезоэлементы изготавливают различной геометрической формы в виде стержней, пластин, дисков, частей сферы и т. п. В качестве материалов из которых производят пьезоэлементы используют цирконий, титанат бария BaTiO_3 , титанат свинца (ЦТС). Всего известно более 150 различных материалов, обладающих пьезоэффектом.

Пьезоэлектрические преобразователи, как правило являются резонансными системами, работающими на частотах основного резонанса или нечётных гармоник. Резонансная частота пластин f (прямоугольной или круглой) связана с толщиной пьезоэлемента l формулой (2.6) [18]

$$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f}, \quad (2.6)$$

где λ – длина волны в материале преобразователя, c – скорость звука.

Рассмотрим механизм возникновения резонанса в стержне длиной l [37]: «Пусть один из концов незакреплённого стержня совершает колебания под действием вынуждающей силы по гармоническому закону,

описываемому формулой (2.7)

$$a_1 = A \sin \omega t, \quad (2.7)$$

где a_1 – смещение конца, A – амплитуда, t – время и $\omega = 2\pi f$ – круговая частота.

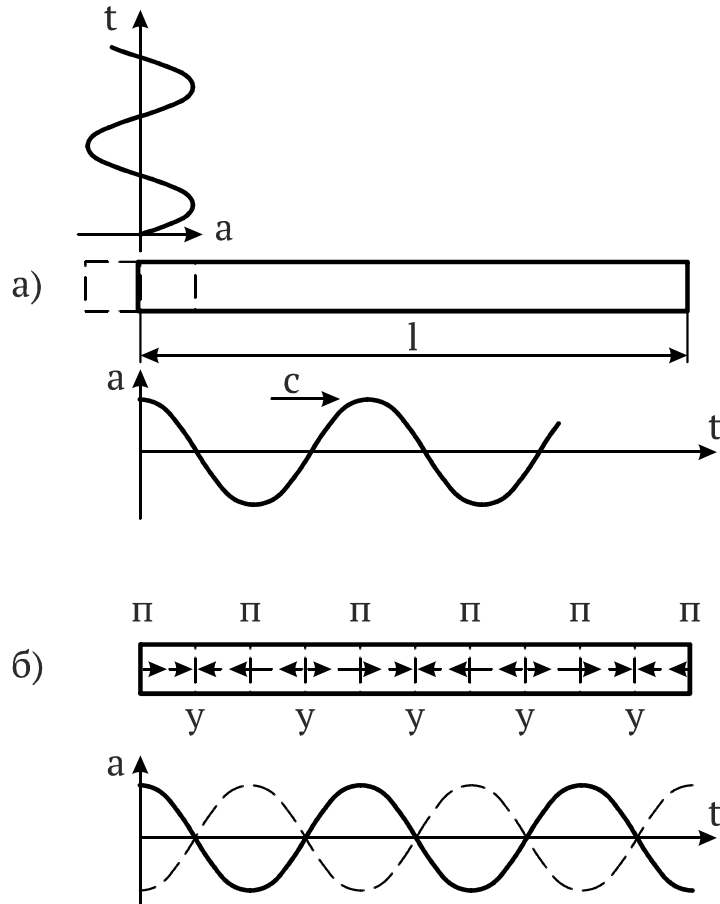


Рисунок 2.3 – Резонансное возбуждение продольных колебаний стержня

Колебание левого конца стержня приведено на рисунке 2.3 а. Положение левого торца показано в виде графика, ось времени которого направлена вверх. По стержню бежит упругая синусоидальная волна, распространяющаяся со скоростью c . Распределение смещений относительно положения равновесия в случайный момент времени приведено в виде графика, вдоль оси абсцисс (рисунок 2.3 а). Распространяющаяся упругая волна доходя до второго торца стержня отражается без изменений фазы и возвращается к первому. Если отбросить потери, то первый торец стержня под действием отражённой волны будет участвовать в колебательном движении, описываемом формулой (2.8)

$$a_2 = A \sin \omega \left(t - \frac{2l}{c} \right), \quad (2.8)$$

где c – скорость звука в стержне. Суммарное колебание этого торца стержня, возникающее от вынуждающей и развиваемой отражаемой волной силами, описывается выражением (2.9)

$$a = a_1 + a_2 = 2A \cos \frac{\omega l}{c} \sin \omega \left(t - \frac{l}{c} \right), \quad (2.9)$$

Таким образом, конец стержня совершает гармоническое колебание с амплитудой $2A \cos \frac{\omega l}{c}$. Резонанс наступает при частотах ω , когда амплитуда возникающих колебаний максимальна (рисунок 2.3 б). В результате интерференции волны, падающей на правый конце стержня, и волны, отражённой от него, устанавливается стоячая волна, узлы и пучности которой обозначены буквами «у» и «п». Стрелками показаны направления колебаний в различных участках стержня вдоль оси абсцисс для момента времени, которому соответствует сплошной график под стержнем. Также выполняется условие $\cos \frac{\omega l}{c} = 1$ или $\frac{\omega l}{c} = k\pi$, где $k = 0, 1, 2, \dots$. Учитывая, что $\omega = 2\pi f$, получаем формулу (2.10)

$$f = \frac{kc}{2l}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (2.10)$$

Частоты, определяемые этим выражением, именуют собственными. При $k = 0$ стержень в покое – частота равна нулю. При $k = 1$ получаем формулу (2.11)

$$f = \frac{c}{2l} \quad (2.11)$$

появляется основная собственная частота. Другие собственные частоты называют гармониками k порядка. Когда говорят, что возбуждение вибратора произошло на третьей гармонике, то имеют ввиду, колебания с частотой $f = 3c/(2l)$ ».

Рассчитаем по формуле (2.11) (аналогична формуле (2.6)) требуемую

толщину пьезоэлемента для получения резонанса на частоте 22 кГц. Результаты расчёта приведены в формуле (2.12)

$$l = \frac{c}{2f} = \frac{3000 \text{ м/с}}{44000} \approx 7 \text{ см} \quad (2.12)$$

Для поляризации такого пьезоэлемента потребуется 140 000 В для обеспечения напряженности 2000 В/мм, что сложно достижимо. Поэтому к пьезоэлементам добавляют накладки из металла с одной или двух сторон, это дает понижение частоты [69]. Тогда частоту резонанса зависит от длины преобразователя: $l + l_1 + l_2 = \lambda/2$.

Чтобы получить меньшие частоты применяют изгибные колебания. При склеивании пластин по граням большего размера, получается биморфный узел (рисунок 2.4). Подачу напряжения к такому биморфному узлу выполняют таким образом, чтобы один элемент расширялся, а другой сжимался. При этом резонанс будет возникать при частотах, отличающихся от резонанса каждого из элементов.

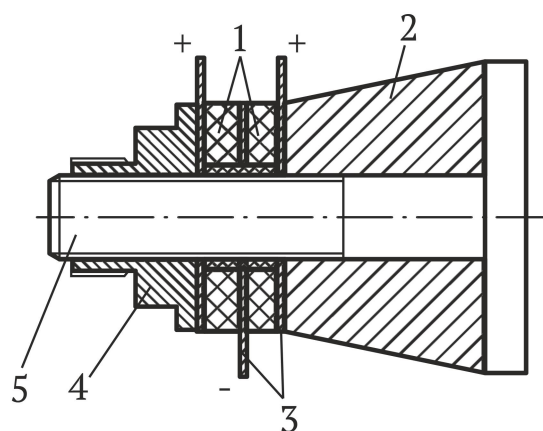


Рисунок 2.4 – Конструкция пакетных пьезокерамических преобразователей с центральным болтом [18]

1 – пьезокерамические пластины; 2 – излучающая накладка; 3 – электроды;
4 – отражающая накладка; 5 – крепежный болт

Для эффективной передачи сгенерированных колебаний среде применяются трансформирующие и согласующие устройства, представляющие собой стержни переменного сечения. Концентраторы

разделяются на конусные, экспоненциальные, катеноидальные, ступенчатые и ампульные. Применяют также сложные составные концентраторы. На практике используют концентраторы с коэффициентом усиления менее 5, т. к. большие коэффициенты усиления повышают зависимость собственной резонансной частоты от нагрузки [63]. Формы образующей концентратора и отношение размеров входного и выходного сечений определяют коэффициент усиления по формуле (2.13) [69]

$$K = \frac{V_1}{V_0}, \quad (2.13)$$

где V_1 – скорость на выходе, V_0 – на входе концентратора.

Источником ультразвуковых колебаний являются системы резонансных колебаний (УЗКС), включающие пьезокерамические элементы 4, накладку отражающую 3, концентратор 5, рабочий инструмент 6 (рисунок 2.5).

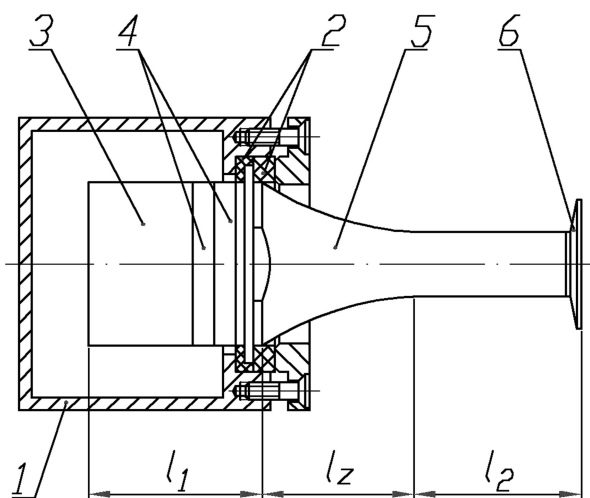


Рисунок 2.5 – Полуволновая ультразвуковая колебательная система [68]

1 – корпус; 2 – опора; 3 – отражающая металлическая накладка;
 4 – пьезоэлектрические элементы; 5 – излучающая накладка-концентратор;
 6 – рабочий инструмент; l_1 – длина цилиндрического участка отражающей
 накладки с пьезоэлементами; l_z – длина участка переменного сечения
 (радиальный переход); l_2 – длина излучающего цилиндрического участка
 концентратора

Для увеличения поверхности излучения и введение в обрабатываемую среду УЗ колебаний мощностью более 3000 Вт ультразвуковые колебания от отдельных пьезоэлементов суммируют (рисунок 2.6).

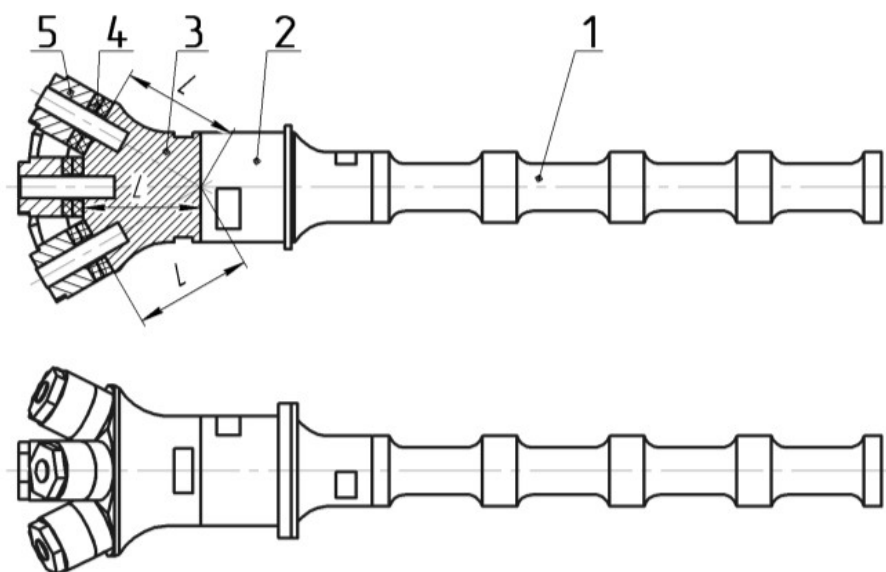


Рисунок 2.6 – Схема установок, суммирующих ультразвуковые колебания от отдельных пьезоэлементов [69]

- 1 – активный рабочий инструмент с увеличенной поверхностью излучения;
 2 – согласующий акустический трансформатор (концентратор); 3 – рабочая частотнопонижающая накладка; 4 – пьезоэлектрические элементы;
 5 – отражающие частотнопонижающие накладки

2.6 Выводы по главе 2

Время приготовления 160 м³ бурового раствора с применением струйного диспергатора ДГ-40 на скважинной площадке составляет 3 сут и требует создания избыточного давления до 10 МПа с помощью цементировочного агрегата или бурового насоса. Необходима разработка энергосберегающих технологических средств, направленных на сокращение времени приготовления РУО.

В результате анализа альтернативных способов получения эмульсий установлено, что наиболее эффективными являются технологические решения, предусматривающие кавитационное воздействие.

ГЛАВА 3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭМУЛЬСИОННЫХ РАСТВОРОВ

3.1 Методы оценки свойств

Контроль качество РУО выполняется расширенным набором параметров, по сравнению с растворами на водной основе (РВО). К таким параметрам относятся электростабильность, определение избытка извести и другие.

Плотность ($\text{кг}/\text{м}^3$) – характеристика отношения массы бурого раствора к его объёму. Измерение параметра выполняется: ареометром, рычажными весами и весами под давлением (рисунок 3.1).



а



б

Рисунок 3.1 – Рычажные весы: а) обычные; б) рычажные весы под давлением

При измерении плотности следует отличать кажущуюся и истинную плотность. Кажущаяся плотность определяется на отобранном со скважины растворе и включает газ, истинная – после разгазирования. Содержание газа в РУО требуется контролировать чаще, чем у РВО. Это связано с высокой способностью углеводородов растворять газ при высоких давлениях.

Перед каждым определением плотности следует осуществлять визуальный контроль чаши прибора, т. к. он продолжительной эксплуатации с УВ возможно изменение объёма, что скажется на достоверности измеряемых величин.

Условная вязкость (с / кварту) – параметр, измеряемый на воронке Марша, соответствует времени истекания 1 кварты = 946 см³ раствора в секундах (рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 – Воронка Марша

Эмульсионные буровые растворы отличаются высокими значениям УВ по сравнению с РВО. Это связано с тем, что вязкость базового масла выше воды, объём наполнителей в РУО выше чем в РВО, а также УВ зависит от содержания воды.

Реологические параметры РУО измеряются при 50 ± 1 °С на ротационных вискозиметрах. Пример автоматизированного вискозиметра приведён на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Вискозиметр модели 900, производитель OFITE

Вискозиметры прямого считывания – ротационные вискозиметры с ручным или электрическим приводом. Измеряемый раствор помещают между цилиндрами. Внешний вращается с заданной скоростью и через раствор создает вращающий момент на внутреннем цилиндре – бобе, который соединён с торсионной пружиной заданной жёсткости. На одной оси с внутренним цилиндром сидит лимб с делениями, с которого считывают показания. Геометрически размеры цилиндров выбраны таким образом, чтобы угол закручивания лимба соответствовал напряжению сдвига при 300 об/мин.

СНС для РУО обычно ниже РВО и сильно зависит от содержания воды, поэтому получать требуемые значения СНС можно регулированием водонефтяного отношения (OWR). Рост СНС начинается при $OWR = 65 \%$, а

при 74% теоретически достигается плотная упаковка, продолжение увеличения содержания воды будет сопровождаться деформирование глобул.

ДНС даёт представление о прочностных свойствах структуры, требующей разрушения для поддержания течения. Отклонение эмульсии от ньютоновских свойств наблюдается при содержании воды выше 10 %. Оно описывается уравнением (3.1)

$$\tau = A + B \cdot e^{KC}, \quad (3.1)$$

где A – зависит от реологии базового масла (у дизельного топлива равен 0), Па; B , K – зависят от дисперсности воды (в эмульсии с дизельным топливом $B = 1$, $K = 0,0515$); C – концентрация воды, % об.

ПВ показывает какое сопротивление возникает при течении растворов. Для эмульсий ПВ выше чем для РВО. Существенное увеличение ПВ происходит при ОWR более 50 %.

Реология эмульсий зависит от компонентного состава и температуры. С разогревом вязкость падает интенсивнее, чем вязкость базового масла.

Фильтрация НТНР (высокая температура и высокое давление) – объемом масла, отделяемого от эмульсии при фильтровании в течение 30 мин. Фильтрование может быть в статике и динамике при различных перепадах давления и различной температуре. В статических условиях при T до 200 °С и $\Delta P < 4,9$ МПа исследования проводят на фильтр-прессе, представленном на рисунке 3.4.

Появление в фильтрате воды или её капелек – прямое свидетельство расслоения эмульсии.



Рисунок 3.4 – Фильтр-пресс НТНР фирмы «OFITE»

Для регулирования показателя фильтрации следует увеличить содержание твёрдой и жидкой фаз или применять понизители фильтрации. У эмульсий, в отличие от РВО, фильтрационная корка тонка и плотная. Толщина изменяется (0,1 – 0,5) мм, для увеличения применяют набухающие под действием УВ вещества, например асфальтеры.

Электростабильность – характеризует стабильность РУО и определяется напряжением пробоя. Электростабильность является экспресс-методом оценки устойчивости РУО. Измерение осуществляется с помощью тестера, представленного на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5 – Тестер электростабильности эмульсий

На напряжение электропробоя масла влияет содержание воды. При появлении её небольшого количества напряжение пробоя резко падает. Дальнейший рост содержания воды сказывается на изменении электростабильности в меньшей мере. Электропробой происходит при выстраивании глобул воды в мост проводимости и характеризуется появлением силы, превышающей прочность защитных слоёв.

Сила взаимодействия между глобулами воды описывается формулой Пирса (3.2) [63]:

$$F = 4\pi E^2 \epsilon r^2 f \frac{r}{d}, \quad (3.2)$$

где F – сила взаимодействия глобул, Н; E – напряженность поля, В/см; ϵ – диэлектрическая постоянная; d , r – расстояние между центрами глобул и их радиус, см.

Содержание углеводородной, водной и твердой фаз – позволяет оперативно определять наличие проявлений. Прибор для проведения ретортного анализа приведён на рисунке 3.6.



Рисунок 3.6 – Комплект реторты в сборе

Большая точность определения содержания фаз достижима при применении реторты на 50 мл.

Анилиновая точка – показывает содержание в масле ароматических углеводородов. Со снижением анилиновой точки содержание ароматических углеводородов растёт, снижается вязкость, увеличивается расход эмульгатора, сильнее разрушаются резиновые уплотнения.

Анилиновая точка базового масла выше 60 °С указывает на малое содержание ароматических УВ. Важно контролировать анилиновую точку при регулировании показателя фильтрации с помощью веществ асфальто-смолистого состава.

Щелочность – показывает содержание H^- в растворе, используется для расчёта избытка извести. Контроль щёлочности позволяет сохранять эффективность работы эмульгаторов, а её снижение менее 2 мл может вызывать потерю стабильности эмульсии.

Температура вспышки – показывает пожароопасность раствора. Определяется температурой вспыхивания паров УВ с воздухом. Безопасной считается температура вспышки, превышающая температуру бурового раствора на выходе из скважины на 30 °С.

Данный параметр определяется изготовителями масляной основы или в специализированных лабораториях.

Седиментационная устойчивость – характеризует удерживающую способность РУО выбуренной породы и утяжелителя. Оборудование, применяемое для определения данного параметра приведено на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7 – Набор для определения седиментационной устойчивости

Возможно определение данного параметра в динамических условиях (HAST) на специальной установке.

Размер мицелл в эмульсиях с помощью динамического рассеяния света. Проведение измерений с помощью анализатора размера частиц (рисунок 3.8) включает следующие этапы:

а) проверку фона в измерительном канале анализатора. Проверку фона допускается проводить с помощью разбавляющей жидкости, соответствующей требованиям, установленным в разделе 8 ГОСТ Р 8.774-2011;

б) размещение испытуемого образца в измерительной ячейке и стабилизацию теплового равновесия между испытуемым образцом и измерительной ячейкой. Колебания равновесной температуры должны быть в пределах ± 1 °С;

в) регистрацию данных, необходимых для проведения измерений:

– обозначения испытуемого образца;

– длительности измерения;

– температуры, показателя преломления и коэффициента динамической вязкости испытуемого образца;

– длины волны лазерного излучения и угол рассеяния, если выбирают эти параметры;

г) предварительное измерение для проверки достаточности уровня концентрации (при необходимости);

д) измерение и обработку данных (измерение интенсивности рассеяния, вычисление среднего размера частиц d и его стандартного отклонения).



Рисунок 3.8 – Установка Microtrac Nanotrac Ultra

Отчет об измерениях должен включать в себя результаты измерений – средний размер частиц d и его стандартное отклонение, а также рекомендуется указывать следующую информацию:

- идентификационные элементы анализатора размера частиц, включая наименование изготовителя, модель и серийный номер;
- дату и время измерений;
- тип образца и его параметры (показатель преломления и коэффициент динамической вязкости дисперсионной среды: концентрацию и температуру образца и т. п.);
- условия измерений.

3.2 Анализ применяемых составов эмульсионных растворов на углеводородной основе

Компонентный состав РУО различных сервисных компаний зависит от качества применяемых реагентов. Для оценки влияния концентрации компонентов на параметры РУО выполнено сопоставление 22 составов по 9 сервисным подрядчикам, исследованных за два года в ООО «Самара-НИПИнефть» [20, 21]. Разброс концентраций в составах представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Изменение содержания компонентов [21]

Состав	Содержание, кг/м ³ (л/м ³)	
	от	до
Масляная основа	556	740
Структурообразователь	2,5	20
Понизитель фильтрации	0	15
Эмульгатор	5	30
рН, источник Ca ²⁺	6	35
Регулятор реологии	0	18
Гидрофобизатор	0	4,2
Соль	12	151
Утяжелитель, кольматант	20	355

Проверка распределений на нормальность представлена в таблице 3.2. Следует уточнить, что расчёты выполнялись в STATISTICA.

Как видим из таблицы 3.2 частотные гистограммы у «эмульгатор» и «электростабильность» отличны от нормального. Отклонение от нормальной прямой для «электростабильность» также выявляются на нормально-вероятностном графике.

Таблица 3.2 – Проверка нормальности в графическом виде [21]

	Частотная гистограмма	Ящичная диаграмма	Нормально-вероятностный график
Углеродная основа			
Структурообразователь			
Понижитель фильтрации			
Эмульгатор			
Электростабильность, В			

Применение расчетных методик оценки нормальности представлены в таблице 3.3. При анализе менее 60 значений (подходит для наших данных) рекомендуется применять критерий Шапиро-Уилка, для большего количества данных – критерий Колмогорова-Смирнова.

Таблица 3.3 – Проверка нормальности с помощью расчётных критериев [21]

Компонент или показатель	Колмогоров-Смирнов при $p < 0,2$ распределение ненормально	Шапиро-Уилка при $p < 0,05$ распределение ненормально
Масляная основа	$p > 0,2$ – норм.	$P = 0,479$ – норм.
Структурообразователь	$p > 0,2$ – норм.	$P = 0,632$ – норм.
Понизитель фильтрации	$p > 0,2$ – норм.	$P = 0,341$ – норм.
Эмульгатор	$p > 0,2$ – норм.	$P = 0,037$ – ненорм.
Электростабильность	$p > 0,2$ – норм.	$P = 0,021$ – ненорм.

Как следует из таблицы 3.3, разброс содержания эмульгатора и величин электростабильности не имеют нормального распределения.

Так как при графических и расчётных способах проверки выявлены ненормальные распределения, и мы анализируемые количественные данные, то результаты расчёта коэффициента корреляции Спирмена влияния концентрации компонентов на электростабильность представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Влияние концентрации компонентов на электростабильности

Компоненты РУО	Уровень значимости при $p < 0,05$		
	количество	коэфф. Корреляции	p-значимость
Водо-нефтяное отношение	22	0,66	0,001
Масляная основа	22	0,11	0,613
Структурообразователь	22	0,54	0,010
Понизитель фильтрации	20	0,00	0,995
Эмульгатор	22	0,91	0,000
pH, источник Ca^{2+}	22	0,80	0,000
Соль	6	0,51	0,305
Утяжелитель, кольматант	10	0,69	0,028

Как следует из таблицы 3.4 по уровню значимости ($p < 0,05$) проходят водо-нефтяное отношение (OWR), концентрация структурообразователя, эмульгатора, извести и кольматанта-утяжелятеля, но последний компонент характеризуется меньшим объёмом выборки, поэтому исключается из дальнейшего рассмотрения. По величине коэффициента корреляции видим, что электростабильность сильно зависит от концентрации эмульгатора и извести (эмульгатор, рН, источник Ca^{2+}). Умеренное влияние оказывают OWR и концентрация структурообразователя. На рисунках 3.9 – 3.12 представлены диаграммы рассеяния.

Для увеличения электростабильности надо повышать OWR и содержание эмульгатора.

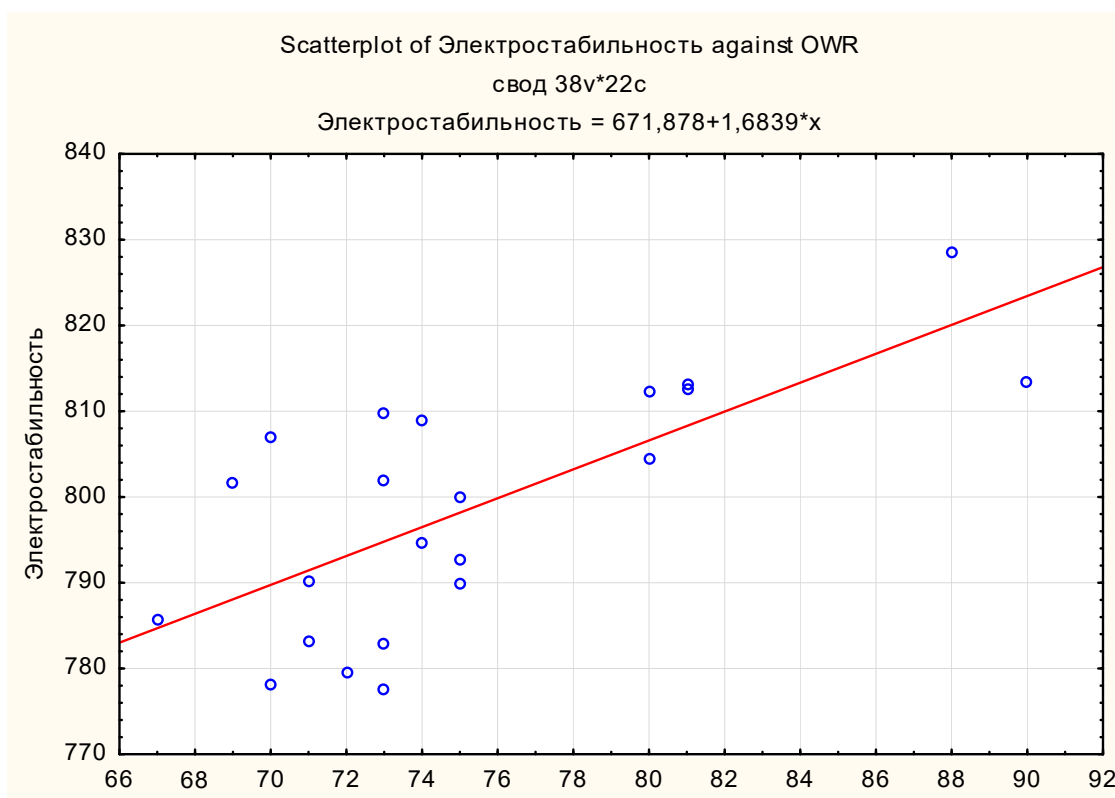


Рисунок 3.9 – Корреляция изменения электростабильности от водо-нефтяного отношения

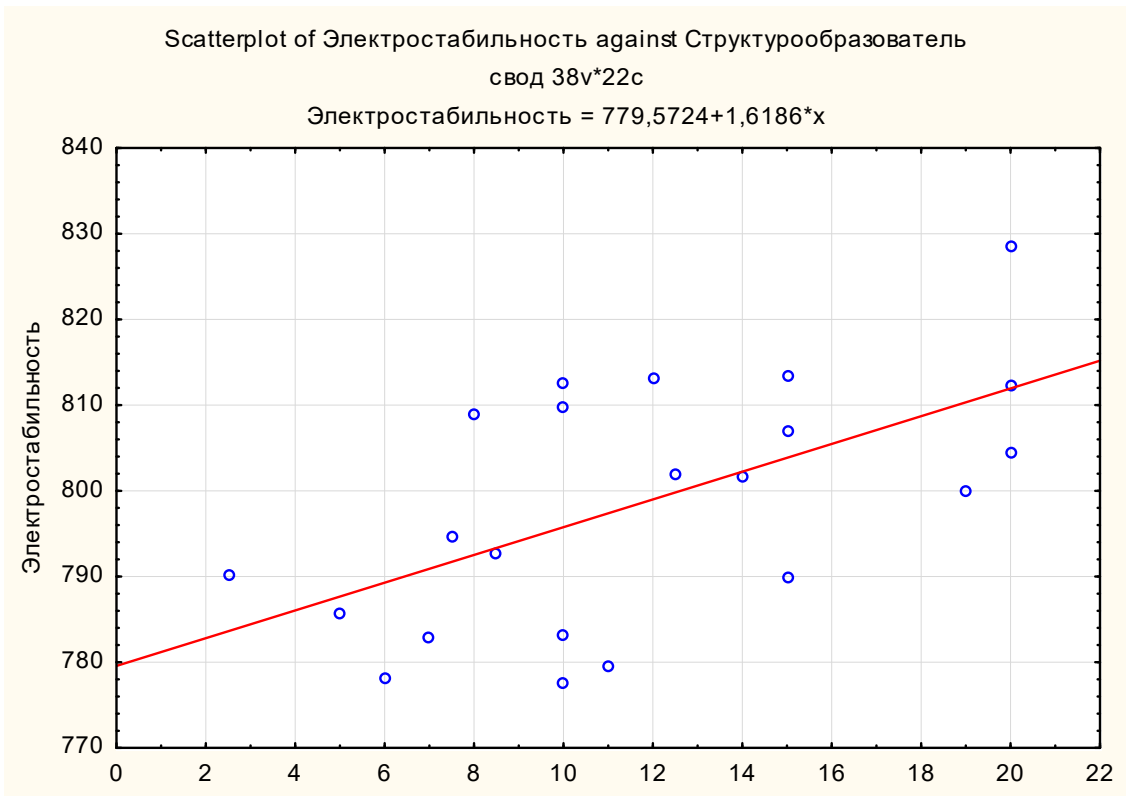


Рисунок 3.10 – Корреляция изменения электростабильности от концентрации структурообразователя

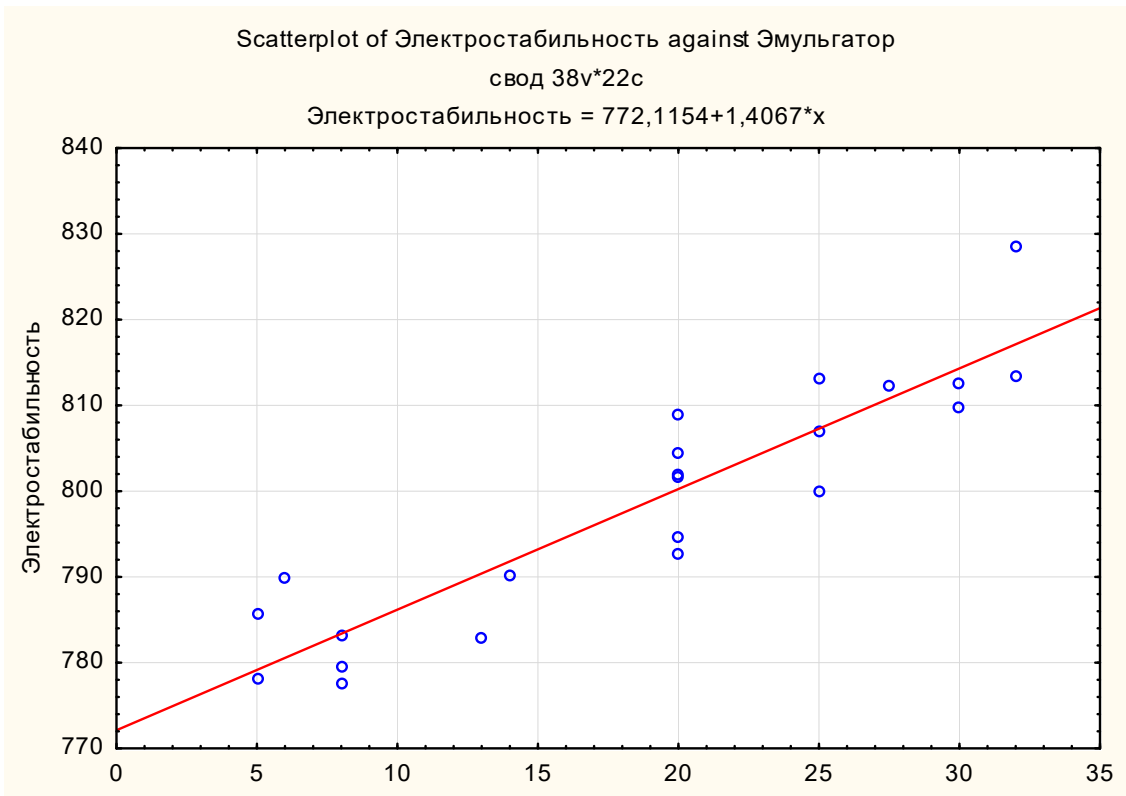


Рисунок 3.11 – Корреляция изменения электростабильности от концентрации эмульгатора

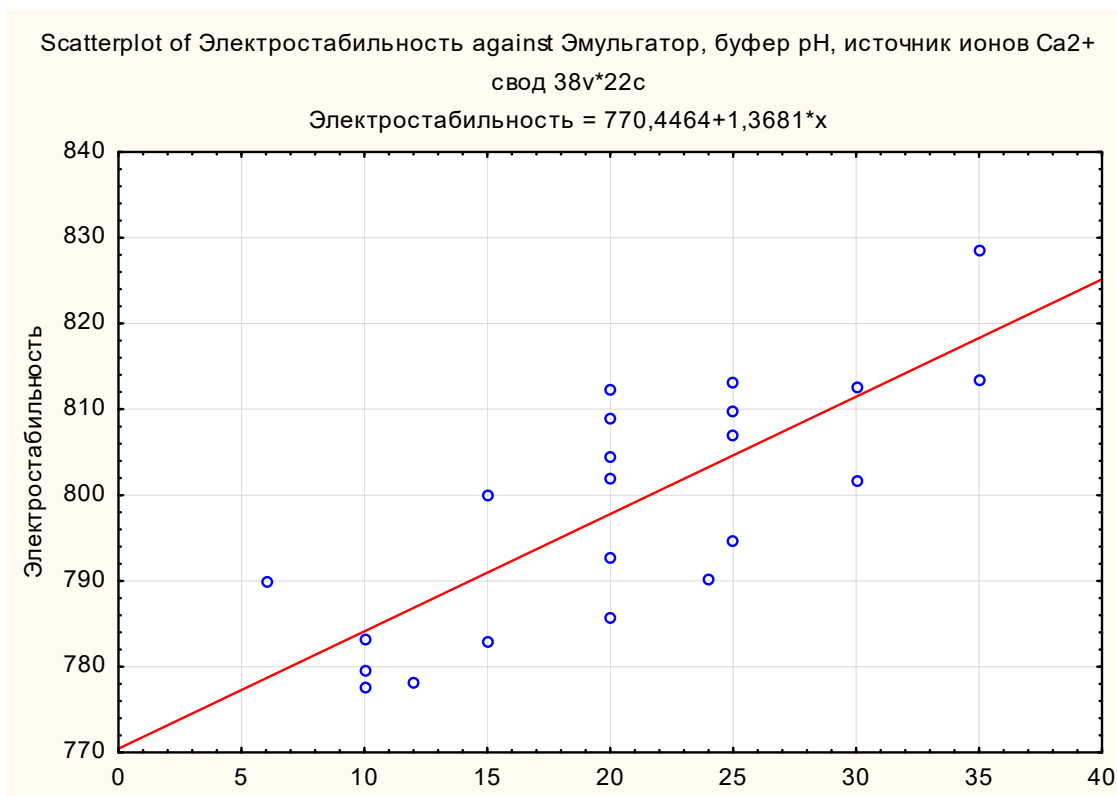


Рисунок 3.12 – Корреляция изменения электростабильности от концентрации ионов Ca²⁺

В качестве базовой рецептуры для исследований была выбрана система, компонентный состав которой приведён в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Исходный компонентный состав РУО

Реагент	Концентрация, г/л (мл/л)	Назначение
Масляная основа	569	Дисперсионная среда
Вода	244	Дисперсная фаза
CaCl ₂	70	Плотность и ингибирование
Известь	25	Щелочность, источник Ca ²⁺
МЕХ-ОВ	25	ПАВ, эмульгатор
Гильсонит	5	Контроль фильтрации
Органофильная глина	12	Структурообразователь

Предлагаемая рецептура РУО обладает достаточными технологическими характеристиками для бурения скважин с большим отходом от вертикали, протяженным горизонтальным окончанием и многозабойных (многоствольных) и характеризуется оптимальной стоимостью.

3.3 Порядок приготовления РУО

Стандартная подход приготовления РУО заключается в перемешивании на Hamilton Beach (аналог Воронеж) со скоростью 12 000 об./мин.

Последовательность:

1. Набрать масляную основу в объёме, требуемом для достижения необходимого водонефтяного отношения.
2. Вместе с перемешиванием ввести органофильную глину. Перемешивать в течение 30 мин.
3. Вместе с перемешиванием ввести эмульгатор. Перемешивать в течение 30 мин.
4. Вместе с перемешиванием ввести известь. Перемешивать в течение 30 мин.
5. Растворить в воде хлорид кальция. Вводить минерализованную воду в раствор при перемешивании как можно медленнее. Перемешивать в течение 30 мин.
8. Вместе с перемешиванием ввести понизитель фильтрации. Перемешивать в течение 30 мин.
9. При необходимости ввести утяжелитель и наполнитель.

3.4 Выводы по главе 3

На электростабильность существенно влияет содержания эмульгатора и извести. В меньшей степени влияет водонефтяное отношение и содержание структурообразователя. Если требуется повысить электростабильность, то сначала надо увеличивать содержания эмульгатора, извести, OWR и концентрацию структурообразователя.

Подобрана базовая рецептура РУО, обеспечивающая оптимальное сочетание достигаемых технологических параметров и стоимости с водонефтяным отношением 70/30, включающая 12 г/л структурообразователя, 25 мл/л эмульгатора, 70 г/л хлорида кальция и 25 г/л извести.

ГЛАВА 4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Влияние способ приготовления эмульсий на их технологические параметры

Приготовление РУО проводилось на установках, представленных на рисунке 4.1. В таблицах 4.1 и 4.2 указаны рецептуры с различным OWR (Oil Water Ratio) водонефтяным отношением. Сначала определялись параметры буровых растворов, приготовленных с помощью Hamilton Beach и Silverson. Методика приготовления соответствовала указанной в разделе 3.3. Также для сравнения выполнялось приготовление РУО с применением верхнеприводной мешалки и ультразвуковой ванны (УВ+ВМ).

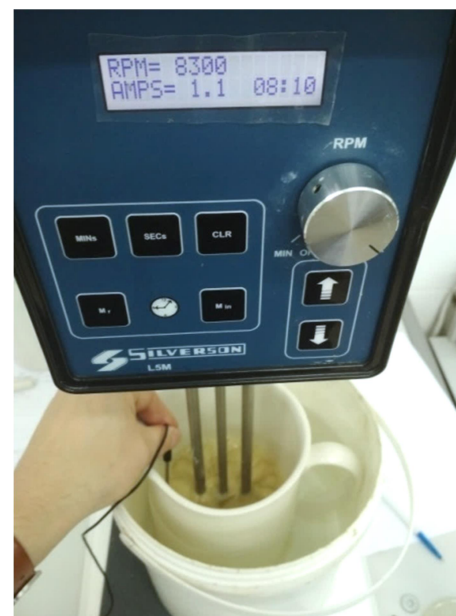
Время приготовления рецептур с водонефтяным отношением 70/30 представлено на рисунке 4.2. По причине быстрого разогрева раствора (рисунок 4.3), при воздействии ультразвука (УВ+ВМ) и отсутствие возможности охлаждать, время приготовления состава сократили. Приготовление с применением Silverson тоже давало резкое увеличение температуры, но размещение ёмкости с раствором в ведро с водой из-под крана (рисунок 4.1) позволило замедлить нагрев. При приготовлении старались не допускать увеличение температуры выше 60 °С, поэтому сократили время перемешивания на Silverson и время приготовления в ультразвуковой ванне.



Ультразвуковая ванна +
верхнеприводная мешалка



Ультразвуковая установка
ИЛ-100



Silverson L5M



Hamilton Beach HMD400-CE

Рисунок 4.1 – Устройства для приготовления РУО

Таблица 4.1 – Рецепттура РУО (OWR = 80/20) [29]

Порядок ввода реагента	Наименование	Назначение химического реагента	Концентрация, кг/м ³ (л/м ³)	Примечание
1	Масло базовое «РЕАСИН»	Основа РУО	650,0	
2	МЕХ-ВР 31	Структурообразователь РУО	12,0	
3	МЕХ-ОВ	Эмульгатор	25,0	
4	Вода	Дисперсная фаз	162,5	CaCl ₂ и Ca(OH) ₂ были растворены в воде
4	Хлорид кальция	Утяжелитель, ингибитор	70,0	
4	Известь	Источник ионов Ca ²⁺	25,0	
5	Unitrol	Понизитель фильтрации	5,0	

Таблица 4.2 – Рецепттура РУО (OWR = 70/30) [29]

Порядок ввода реагента	Наименование	Назначение химического реагента	Концентрация, кг/м ³ (л/м ³)	Примечание
1	Масло базовое «РЕАСИН»	Основа РУО	569,0	
2	МЕХ-ВР 31	Структурообразователь РУО	12,0	
3	МЕХ-ОВ	Эмульгатор	25,0	
4	Вода	Дисперсная фаза	244,0	CaCl ₂ был растворен в воде
4	Хлорид кальция	Утяжелитель, ингибитор	70,0	
5	Известь	Источник ионов Ca ²⁺	25,0	

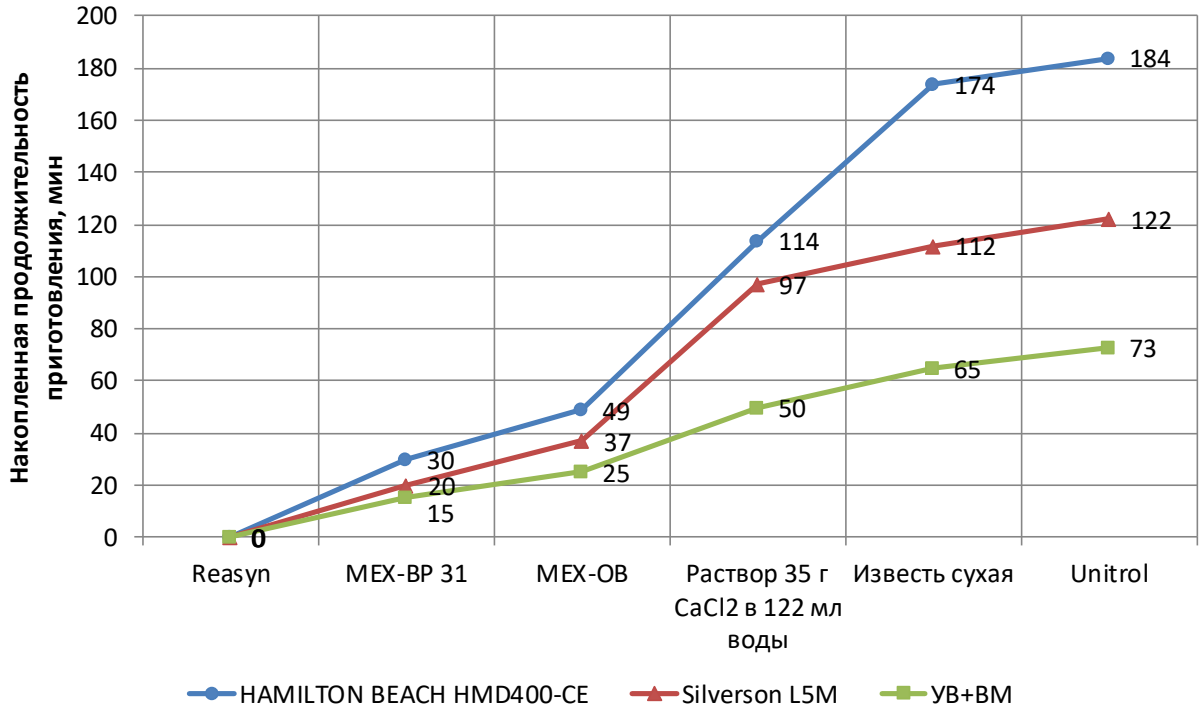


Рисунок 4.2 – Продолжительность приготовления на разных перемешивающих устройствах (OWR = 70/30) [29]

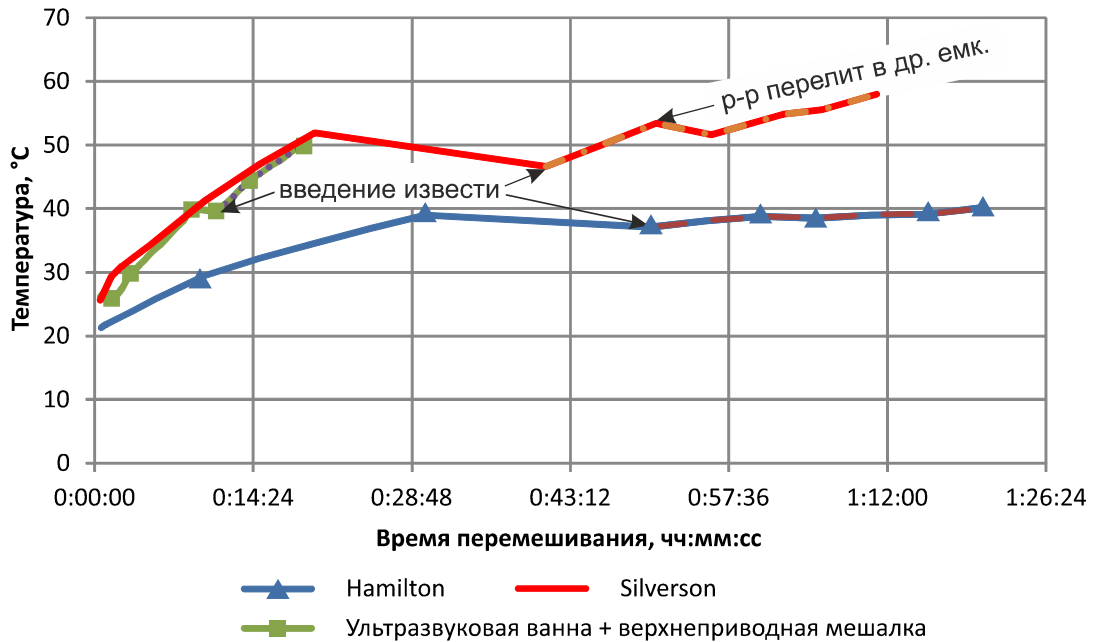


Рисунок 4.3 – Изменение температуры при приготовлении на разных устройствах [29]

Параметры растворов, приготовленных на Hamilton beach, измеренные через различные промежутки времени представлены в таблице 4.3. Первый и второй раствор различаются водонефтяным отношением. Термостарение проводилось в течение 16 ч при температуре 80 °С при скорости вращения ячейки с раствором – 25 об/мин. Из таблицы 4.3 следует, что термостарение сказывается на росте показателя фильтрации за 30 мин с 2,8 до 4,8 см³.

Таблица 4.3 – Сопоставление параметров эмульсий с различным водонефтяным отношением, приготовленных с помощью Hamilton Beach HMD400-CE [29]

Параметры	Раствор 1		Раствор 2
	через 1 сут	после термостарения	через 8 сут
Соотношение углеводородной / водной фаз, % об.	81/19	82/18	70/30
Плотность, г/см ³	1,09	1,09	0,97
Пластическая вязкость при 49 °С, мПа·с (сП)	20	20	14,4
Динамическое напряжение сдвига при 49 °С, дПа / фунт / 100 фут ²	57 / 12	53 / 11	107,8 / 22,5
Статическое напряжение сдвига за 10 с при 49 °С, дПа / фунт / 100 фут ²	57 / 12	57 / 12	76,1 / 15,9
Статическое напряжение сдвига за 10 мин при 49 °С, дПа / фунт / 100 фут ²	86 / 18	91 / 19	76,1 / 15,9
Температура при исследовании показателя фильтрации, °С	80	80	50
Объём фильтрата при ΔР = 3,5 МПа, см ³ за 30 мин через Whatman № 50 (ISO 10414)	2,8	4,8	2,7
Толщина фильтрационной корки (при высокой температуре / высоком давлении), мм	0,5	0,5	0,5
Электростабильность, В	1200	1254	682
Содержание ионов Cl ⁻ , мг/дм ³	41 000	41 000	54 000
Избыток извести, кг/м ³	14	14	10,2
Содержание CaCO ₃ , кг/м ³	180	180	–

Далее приведено сопоставление РУО, полученных различными способами приготовления. Результаты измерения электростабильности представлены на рисунке 4.4.

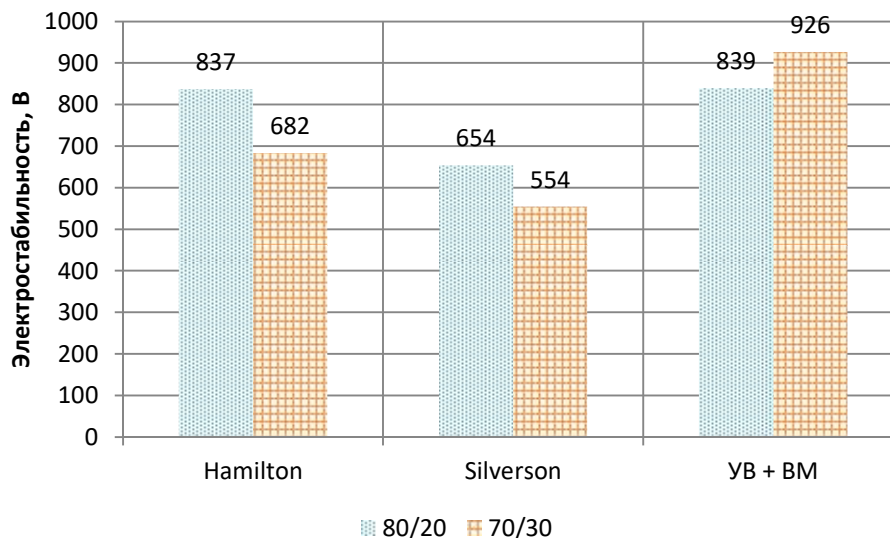


Рисунок 4.4 – Электростабильность эмульсий с различным водонефтяным отношением [29]

Анализ рисунка 4.4 показывает, что с ростом доли воды снижается электростабильность эмульсий, получаемых с помощью Hamilton Beach и Silverson. При равных условиях применение ультразвуковых волн частотой 40 кГц (потребляемая мощность от электрической сети – 50 Вт), работающих в режиме кавитации, даёт увеличение электростабильности. При водонефтяном отношении 80/20 электростабильность УВ+ВМ сопоставима с Hamilton Beach и выше, чем у Silverson. После нахождения в покое 7 и 14 сут электростабильность РУО с OWR = 80/20 принимает близкие значения (рисунок 4.5).

Для проверки наличия кавитации в ультразвуковую ванну был помещён лист фольги (рисунок 4.6). Его разрушение, наблюдаемое через 2 минуты воздействия ультразвуковых колебаний, подтверждает наличие кавитации.

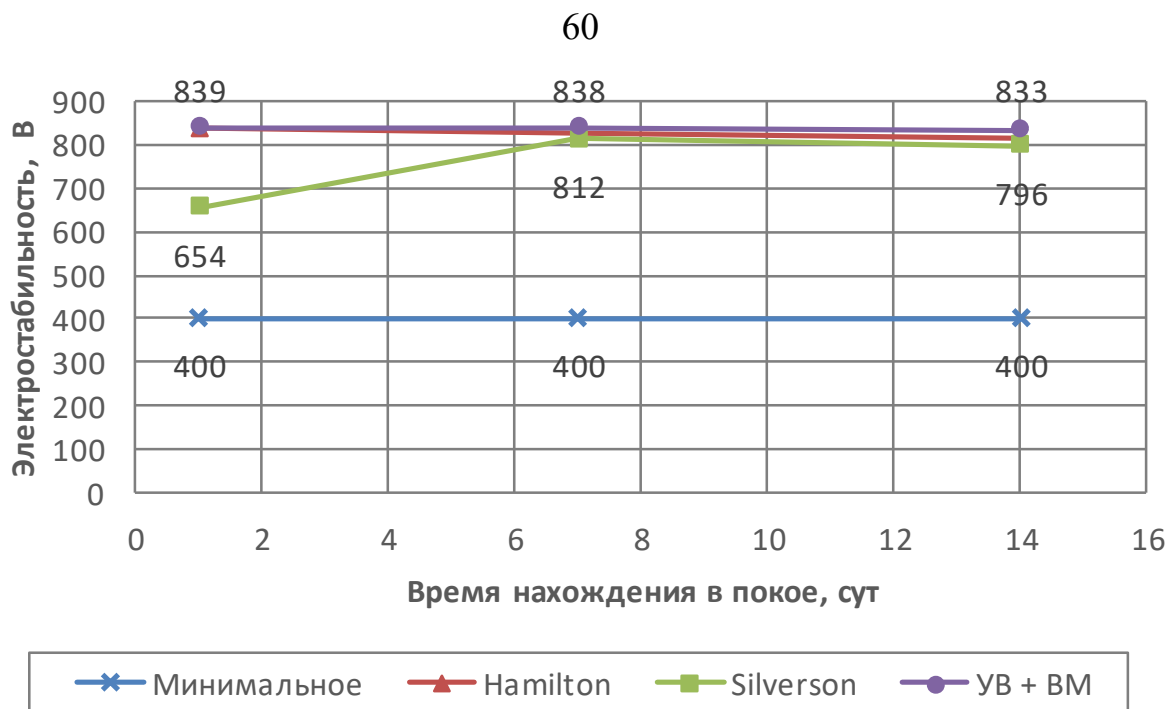


Рисунок 4.5 – Изменение электростабильность РУО с OWR = 80/20

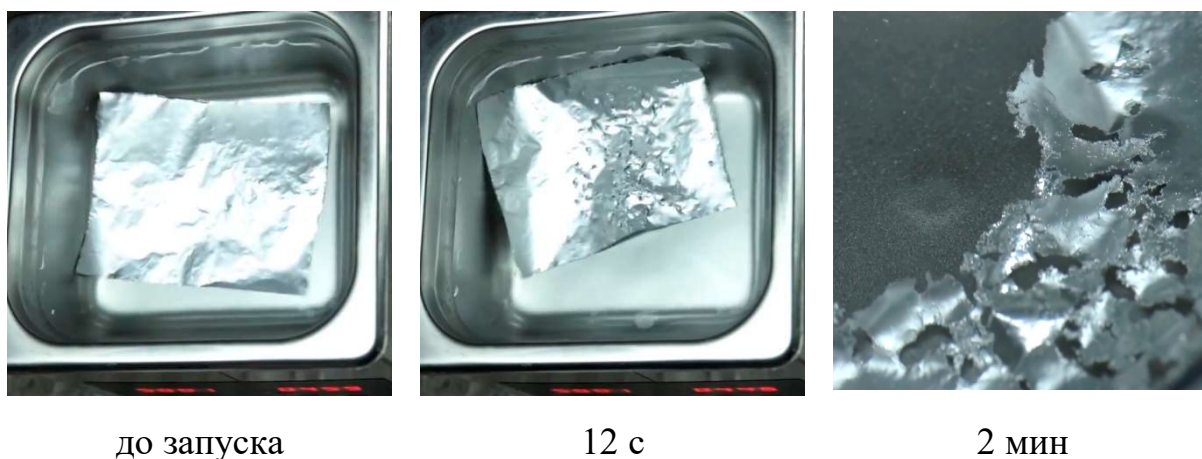


Рисунок 4.6 – Кавитационное воздействие через 12 секунд и 2 минуты

Сопоставление параметров эмульсионных растворов различного способа приготовления с водонефтяным соотношением 70/30 представлено на рисунке 4.7. Изменение углов закручивания при различных скоростях вращения наружного цилиндра ротационного вискозиметра близки для эмульсий, полученных на УВ+ВМ и Hamilton Beach. СНС минимальны для РУО, приготовленном на УВ+ВМ.

Фильтрация эмульсий близка, а минимум имеет приготовленная с помощью ультразвуковых волн частотой 40 кГц (50 Вт), работающих в

режиме кавитации. Некоторое уменьшение извести эмульсии, полученной с Hamilton Beach, свидетельствует о её плохом растворении, что могло сыграть роль в выявленном различии параметров.

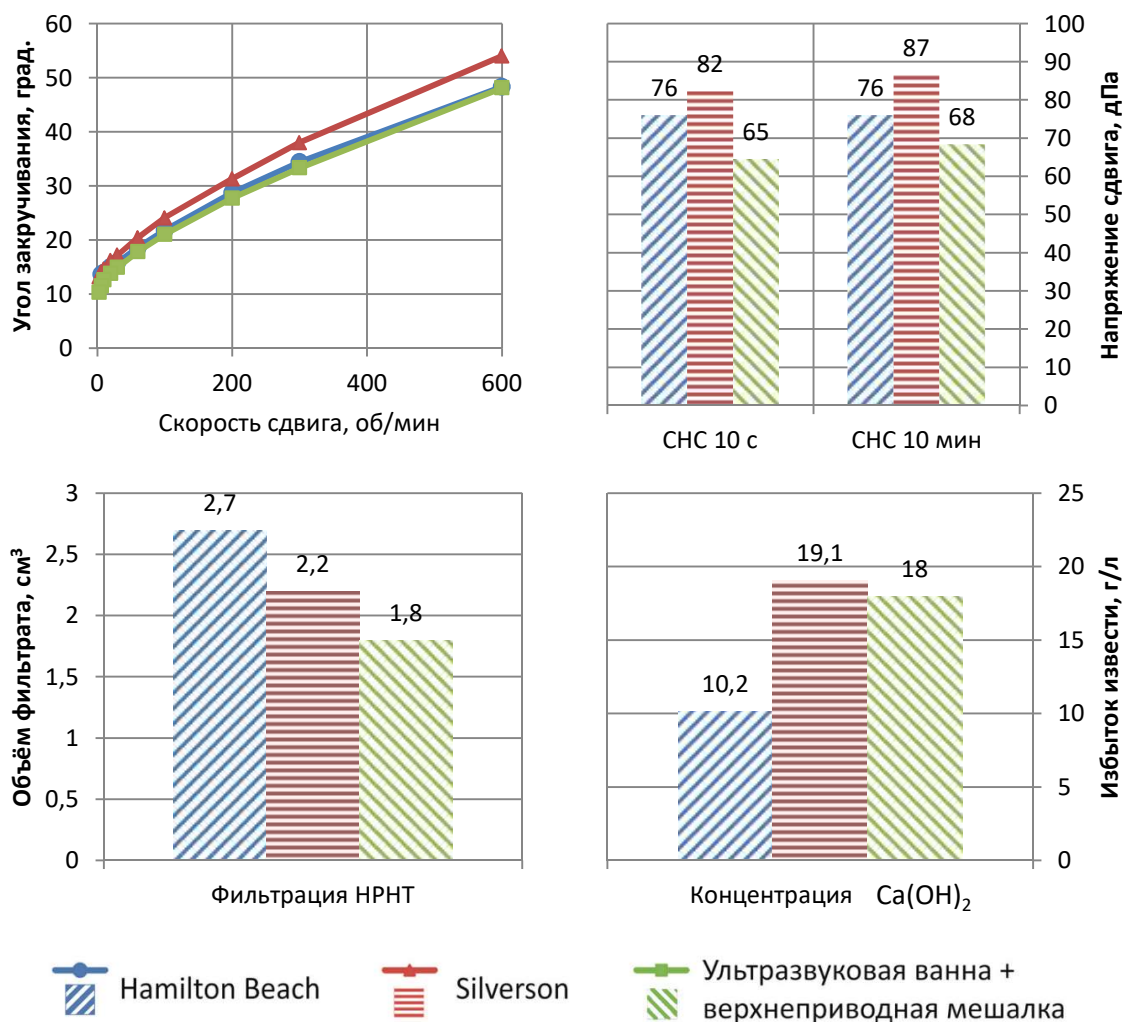


Рисунок 4.7 – Сопоставление параметров эмульсий (OWR = 70/30) [29]

На микроскопе Альтами сделаны фотографии приготовленных эмульсий (рисунок 4.8). В программном обеспечении «Altami Studio» посчитаны размеры капель воды, распределение которых представлено на рисунке 4.9.

При OWR = 80/20 тёмными пятнами является не диспергированный гильсонит. Распределения по размерам близки и имеют тенденцию роста для частиц 10 мкм и менее, что свидетельствует о необходимости применения приборов с большей разрешающей способностью.

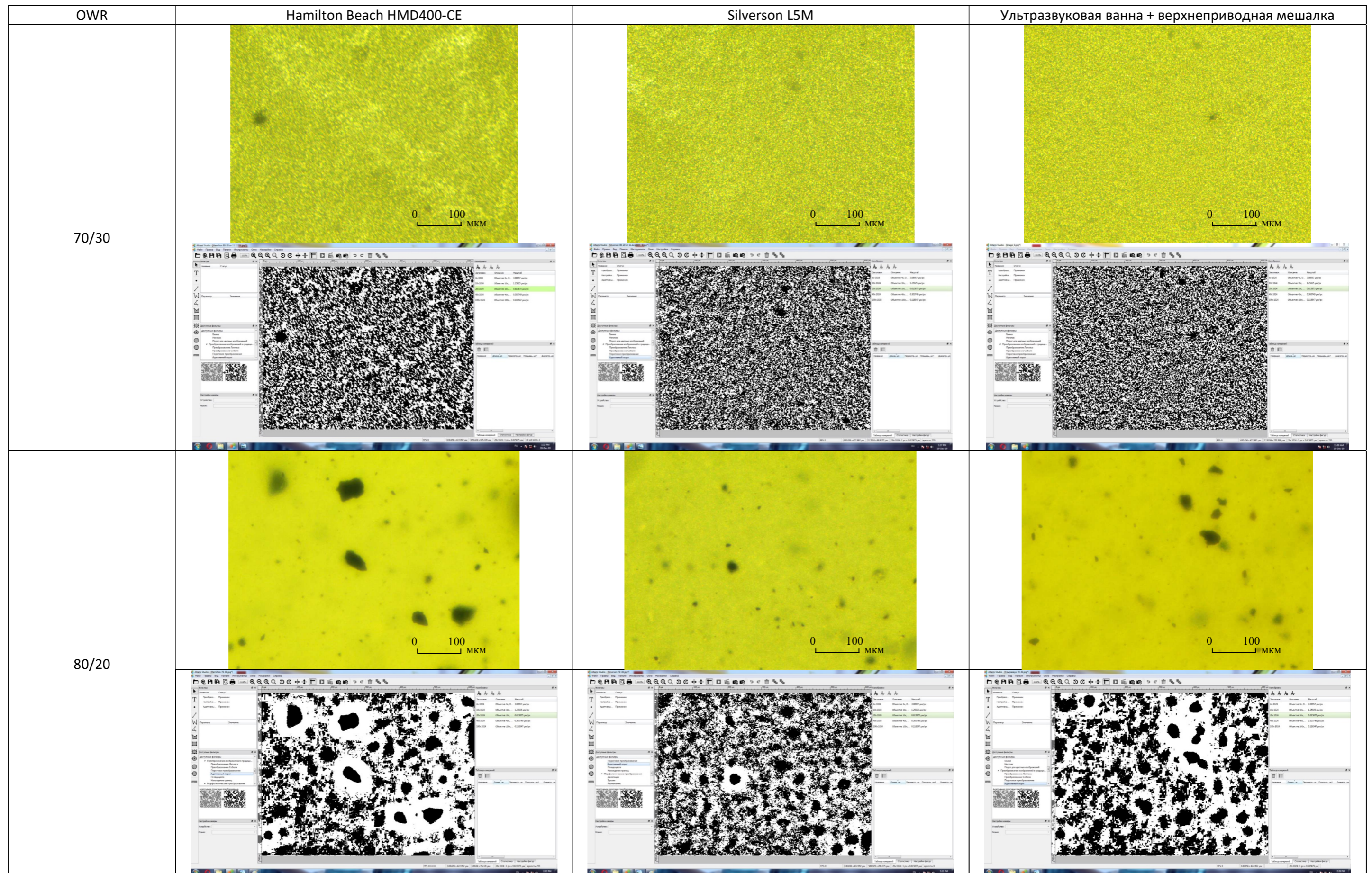


Рисунок 4.8 – Обработка эмульсий в программном обеспечении «Altami Studio»

Схожесть параметров эмульсий и близость распределений размеров частиц подтверждают, что воздействие ультразвуковых волн частотой 40 кГц (50 Вт), работающих в режиме кавитации, можно использовать для приготовления буровых растворов на углеводородной основе, а достигаемые параметры соответствуют применяемым диспергирующим установкам.

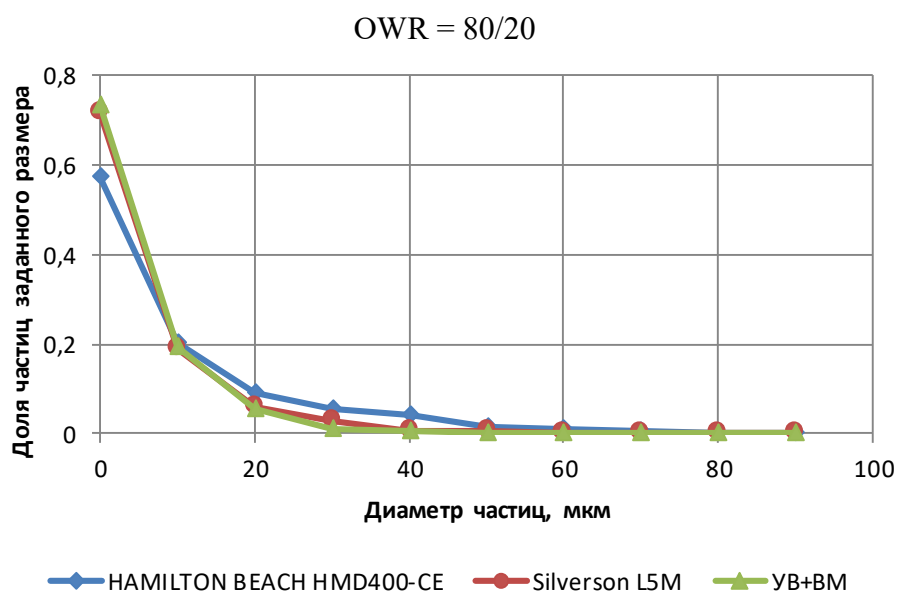
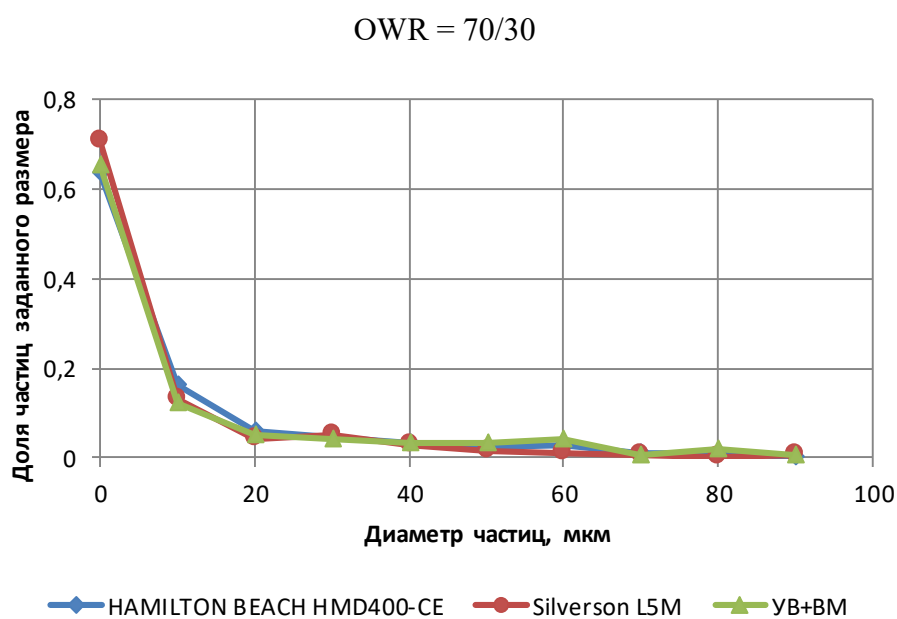


Рисунок 4.9 – Удельный размер капель водной фазы эмульсий с различным OWR [29]

4.2 Влияние частоты ультразвуковых волн на кавитацию

Влияние частоты колебаний давления в жидкости на динамику кавитационного пузырька изучалось в работе [34]. Авторами выполнены расчёты изменения радиуса одиночного сферического пузырька с помощью дифференциального уравнения Рейля-Плессета для несжимаемой жидкости, учитывающее вязкость, поверхностное натяжение жидкости и адиабатическое сжатие газа. Результаты расчётов приведены на рисунке 4.10.

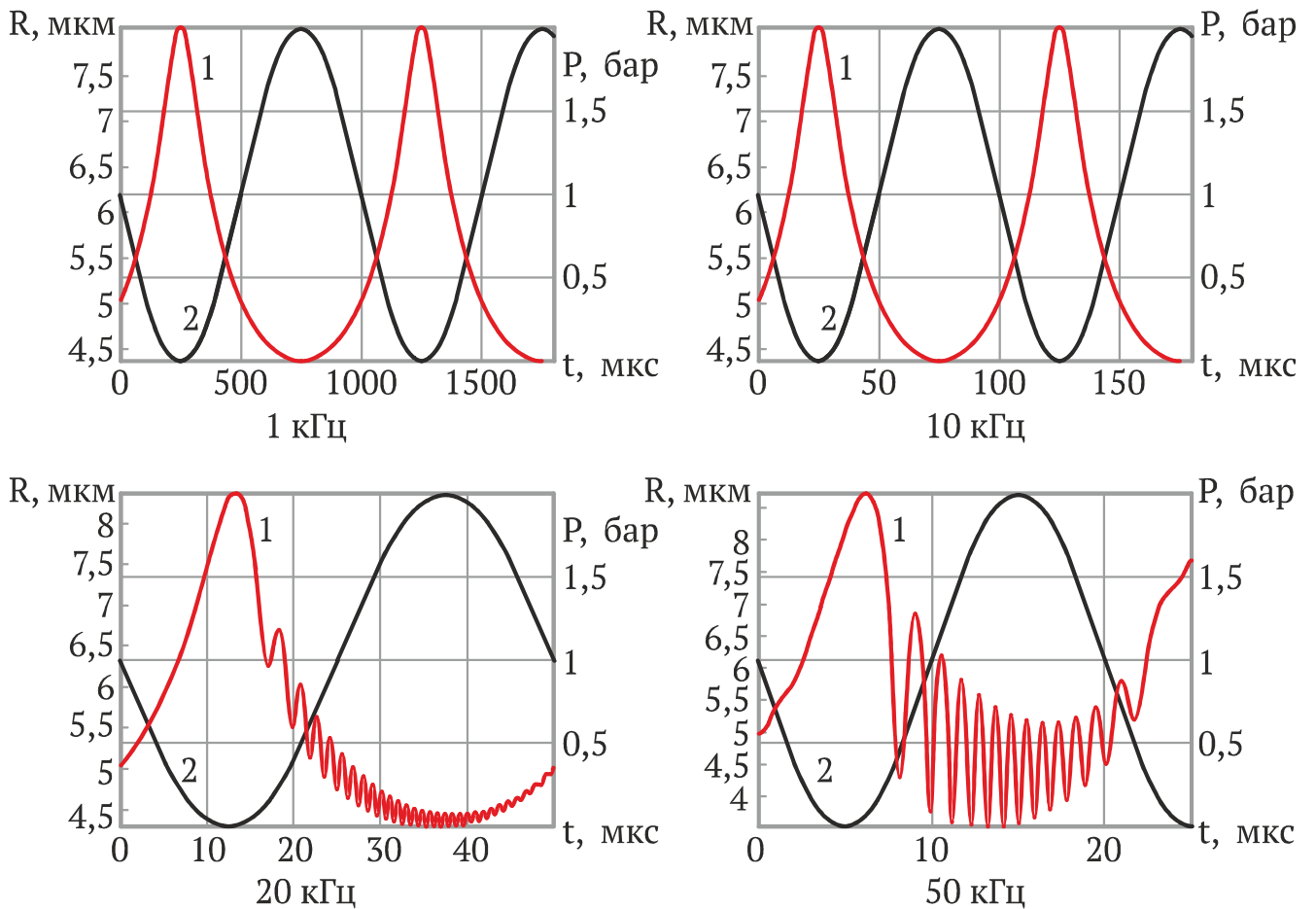


Рисунок 4.10 – Пульсации паровоздушного пузырька в воде при различных частотах колебания звукового давления

Обобщение результатов расчётов с данными по энергии схлопывания [67], приведено на рисунке 4.11.

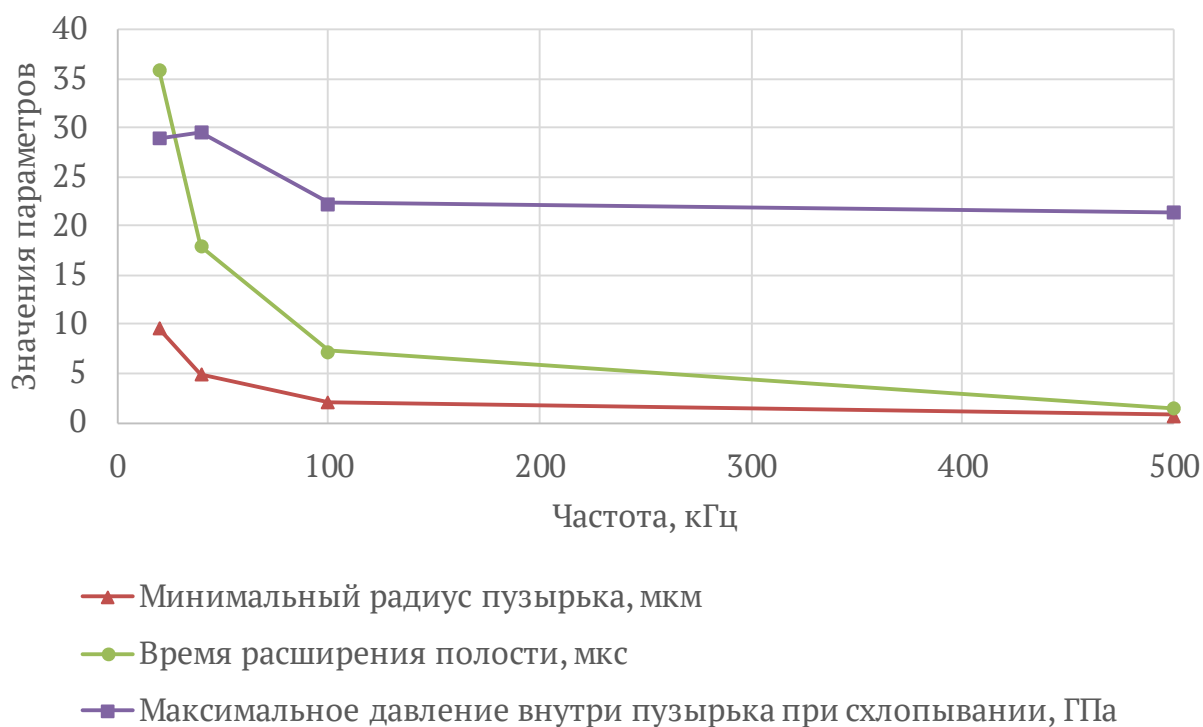


Рисунок 4.11 – Влияние частоты ультразвуковых волн на кавитационные пузырьки

Увеличение частоты колебаний ведёт к уменьшению максимального радиуса кавитационного пузырька и ускорению цикла роста-схлопывания. Это снижает эффект экранировки на границе излучатель-обрабатываемая среда и способствует более глубокому проникновению кавитационного воздействия в среду. Но на частотах выше 40 кГц снижается максимальное давление схлопывания кавитационного пузырька. Поэтому для эффективного воздействия кавитации оптимальными являются частоты в диапазоне (20 – 40) кГц.

4.3 Влияние продолжительности воздействия ультразвуковых волн, работающих в режиме кавитации, на параметры эмульсий

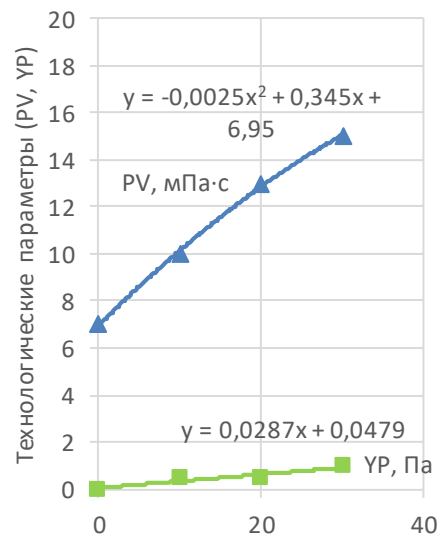
Для нахождения времени, требуемого для приготовления стабильного РУО с применением воздействия ультразвуковых волн, работающих в режиме кавитации, была исследована зависимость времени воздействия ультразвуковых волн с частотами 22 кГц и 40 кГц, работающих в режиме кавитации, на пластическую вязкость и динамическое напряжение сдвига. Порядок

приготовления был следующим: в ёмкость для воздействия ультразвуком набирались жидкие составляющие, после включения ультразвуковой установки вводились все сухие компоненты.

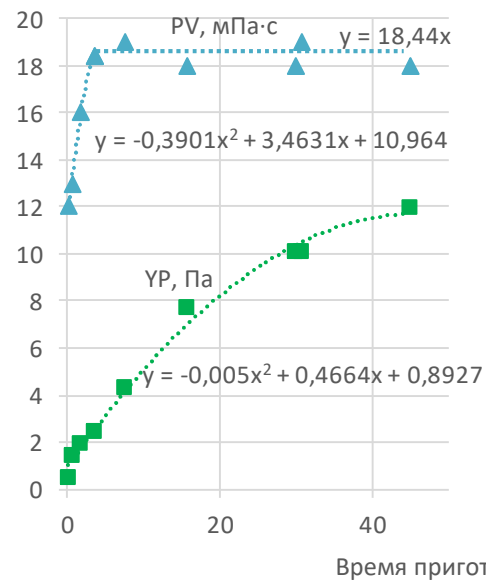
На рисунке 4.12 приведены изменения реологических параметров при различных способах приготовления РУО. На всех графиках выделяются две области. В начальной области изменение параметров происходит по квадратичной зависимости. Затем параметры стабилизируются: пластическая вязкость достигает (19 – 20) мПа·с, а динамическое напряжение сдвига стремится к 12 Па. Исключением явились параметры, достигнутые при воздействии на компоненты эмульсии верхнеприводной мешалки. Через 30 мин перемешивания при 700 об/мин, PV составила только 15 мПа·с, а YP оставалось на уровне 1 Па. Данный факт свидетельствует об отсутствии эмульсии.

Далее будем анализировать графики изменения параметров под воздействием ультразвука. Не зависимо от частоты и мощности подводимых ультразвуковых колебаний пластическая вязкость достигала стабилизированного значения через (3 – 4) минуты воздействия. Динамическое напряжение сдвига, наоборот на всех графиках имеет различное время стабилизации. При потребляемой мощности от электрической сети – 50 Вт время стабилизации составляет – 45 мин. С увеличением потребляемой от сети мощности время выхода на фиксированную величину сокращается до 3 минут. Зависимость времени достижения стабилизированной величины динамического напряжения сдвига (ДНС) от потребляемой генератором мощности приведено на рисунке 4.13.

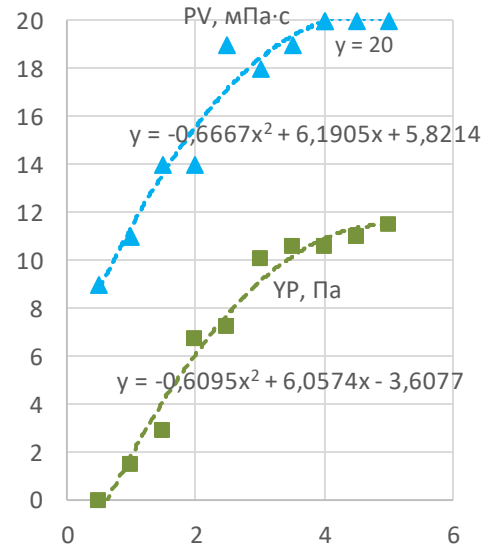
При обзоре литературы было показано, что наиболее эффективным для получения эмульсии является режим кавитации. Причём в процессе образования и ликвидации полостей, наибольшее воздействие оказывается при схлопывании кавитационных пузырьков. Данная стадия сопровождается локальным скачком давлениями и выделением тепла. На поверхности пузырьков возникают волны, микротоки, электрические разряды.



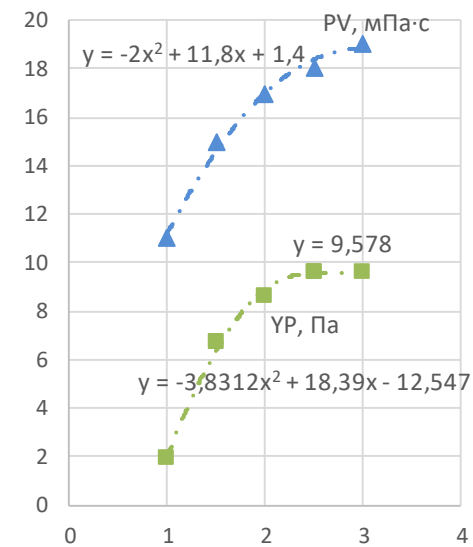
верхнеприводная мешалка



ультразвуковая ванна +
верхнеприводная мешалка
40 кГц, 50 Вт



ультразвуковая установка
ИЛ-100
22 кГц, 1000 Вт



ультразвуковая установка
ИЛ-100
22 кГц, 2000 Вт

Рисунок 4.12 – Зависимости изменение реологических параметров от продолжительности приготовления

По результатам исследований продолжительности ультразвукового воздействия с частотой 40 кГц и потребляемой генератором мощности от электрической сети – 50 Вт разработаны математические модели (4.1 – 4.3), позволяющие определять параметры эмульсионных буровых растворов.

Средний размер капель водной фазы рассчитывается по формулам (4.1)

$$\begin{cases} y = 688,3e^{-0,386x}, \text{ при } x < 7,5 \\ y = 493,51x^{-1,313}, \text{ при } x \geq 7,5 \end{cases} \quad (4.1)$$

где x – продолжительность ультразвукового воздействия, мин.

Пластическая вязкость рассчитывается по формулам (4.2)

$$\begin{cases} y = -0,3901x^2 + 3,4631x + 10,964, \text{ при } x < 3,75 \\ y = 18,44x, \text{ при } x \geq 3,75 \end{cases} \quad (4.2)$$

Динамическое напряжение сдвига рассчитывается по формулам (4.3)

$$\begin{cases} y = -0,005x^2 + 0,4664x + 0,8927, \text{ при } x < 45 \\ y = 12x, \text{ при } x \geq 45 \end{cases} \quad (4.3)$$

В таблице 4.4 приведены результаты расчёта по формулам (4.1 – 4.3).

Таблица 4.4 – Изменение параметров эмульсии при воздействии ультразвуковых волн частотой 40 кГц, работающих в режиме кавитации

Продолжительность воздействия УЗ, мин	Средний размер частиц, мкм	Пластическая вязкость, мПа·с	Динамическое напряжение сдвига, Па
1	468	14,0	1,4
3	216	17,8	2,2
5	100	18,4	3,1
10	24,0	18,4	5,1
15	14,1	18,4	6,8
20	9,7	18,4	8,2
25	7,2	18,4	9,4
30	5,7	18,4	10,4
40	3,9	18,4	11,5
45	3,3	18,4	12,0

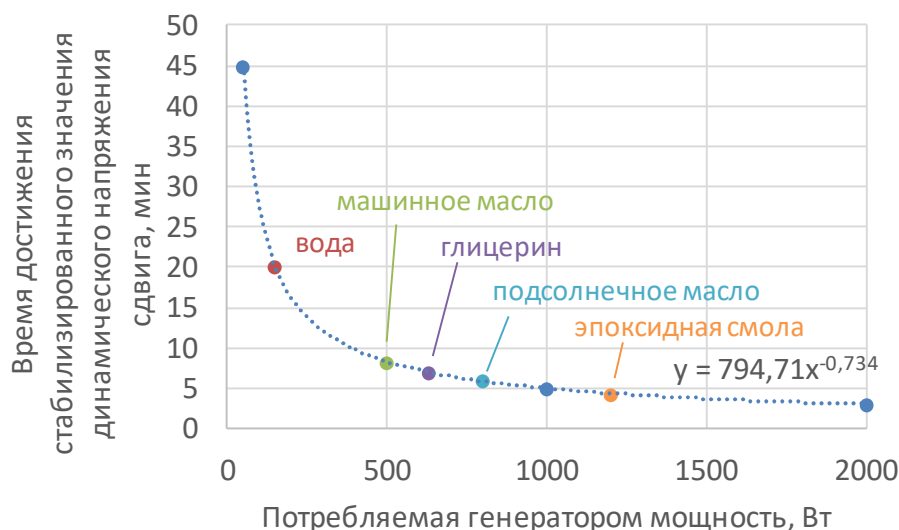


Рисунок 4.13 – Зависимость времени стабилизации ДНС от подводимой генератором мощности

Область, в которой возникает кавитация зависит от плотности и вязкости среды, свойств эмульгируемой фазы, интенсивности ультразвуковых колебаний. По оценке исследователей [52] размеры данной области, называемой кавитационным облаком, для эпоксидной смолы через 9 с после начала воздействия ультразвука не превышает 20 мм. Для масла эта область оценена в 8 см. Ограничение области распространения кавитации связано с высокой поглощающей способностью кавитационных пузырьков. Также на размер кавитационного облака будет сказываться частота ультразвука: с ростом частоты проникающая способность будет увеличиваться, но снизится давление схлопывания (см. раздел 4.2). На рисунке 4.13 указаны оптимальные подводимые мощности для достижения наибольших размеров облака кавитации в различных жидких средах [52].

С целью оценки качества эмульсии, полученной при воздействии ультразвуковых волн частотой 40 кГц (50 Вт), работающих в режиме кавитации, по стандарту ISO 22412 (ГОСТ 8.774-2011) были определены среднестатистические размеры капель воды на Microtrac Nanotracs Ultra (рисунок 4.14).

На рисунке 4.14 сопоставлены размеры частиц воды, считанные Microtrac Nanotracs Ultra для эмульсий. Перемешивание в течение 30 мин на ВМ при

700 об/мин дало капли воды среднего размера 361 мкм. При воздействии ультразвуковых волн частотой 40 кГц, работающих в режиме кавитации, примерно через 8 мин дало капли воды средним размером менее 50 мкм, а через 30 мин – около 5 мкм.

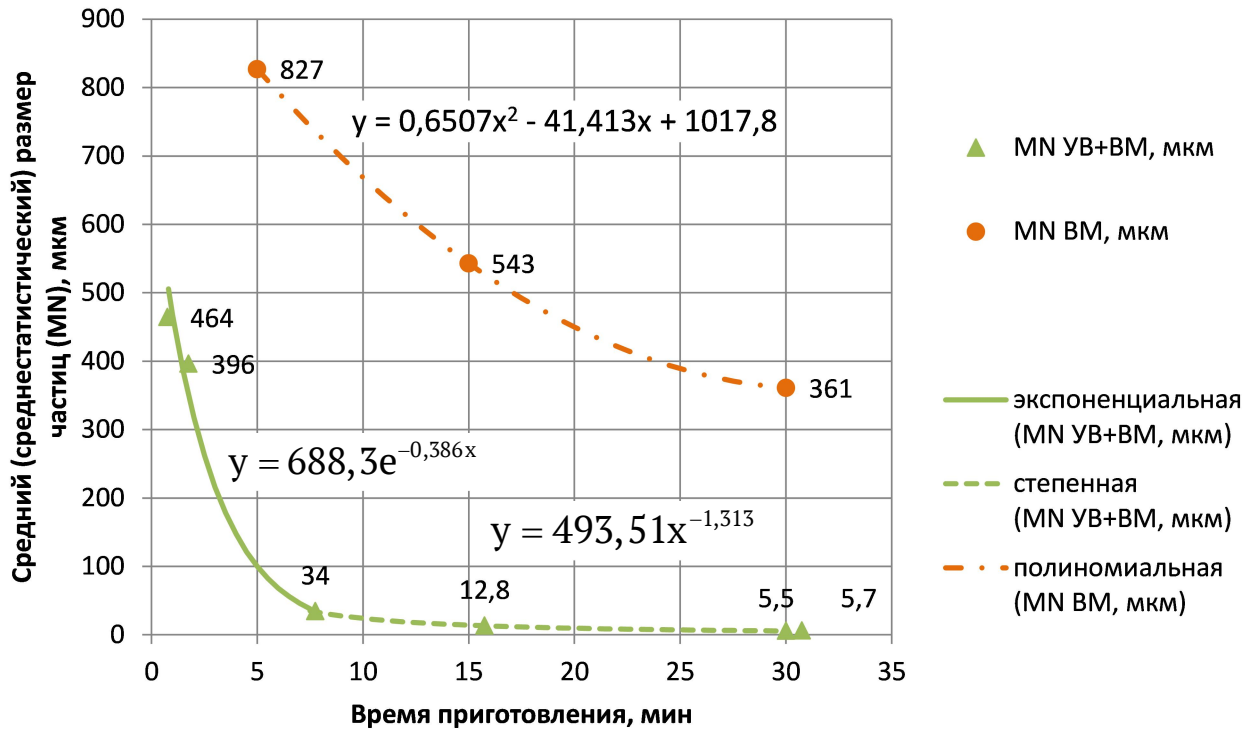


Рисунок 4.14 – Зависимость изменения среднего размера капель воды от времени приготовления

С помощью Microtrac Nanotrac Ultra также были получены распределения размеров частиц водной фазы эмульсии, приведённые на рисунках 4.15 – 4.16.

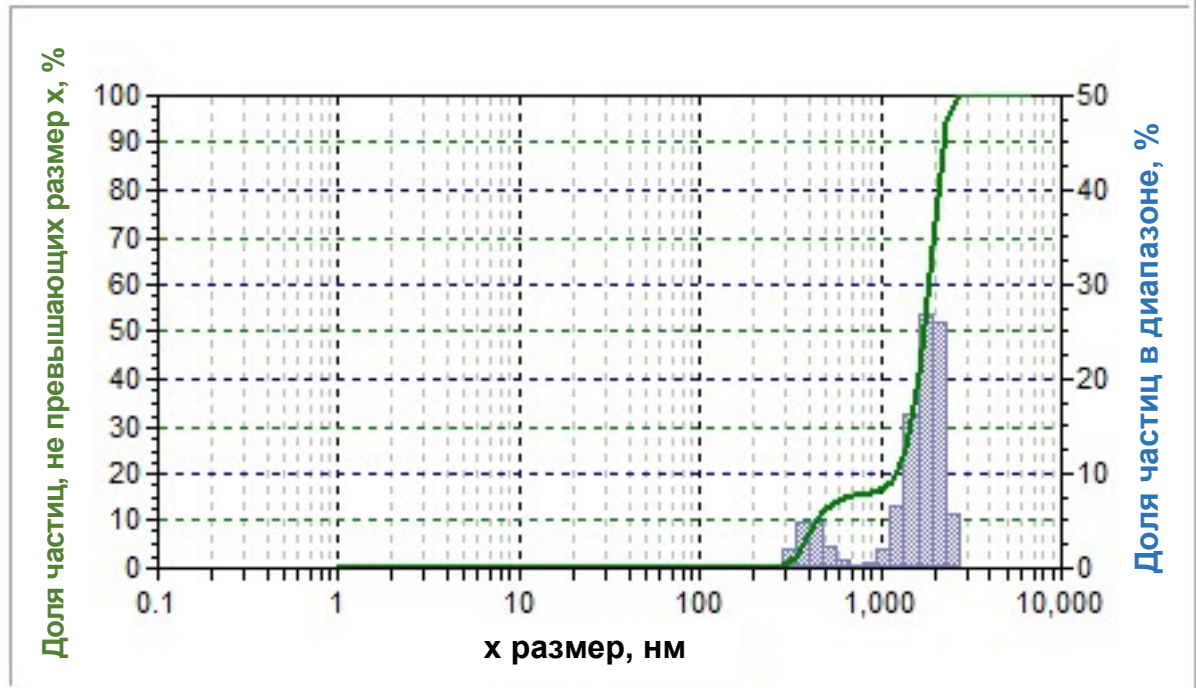


Рисунок 4.15 – Распределение размеров частиц водной фазы эмульсии после воздействия на эмульсионный буровой раствор в течение 0,75 мин

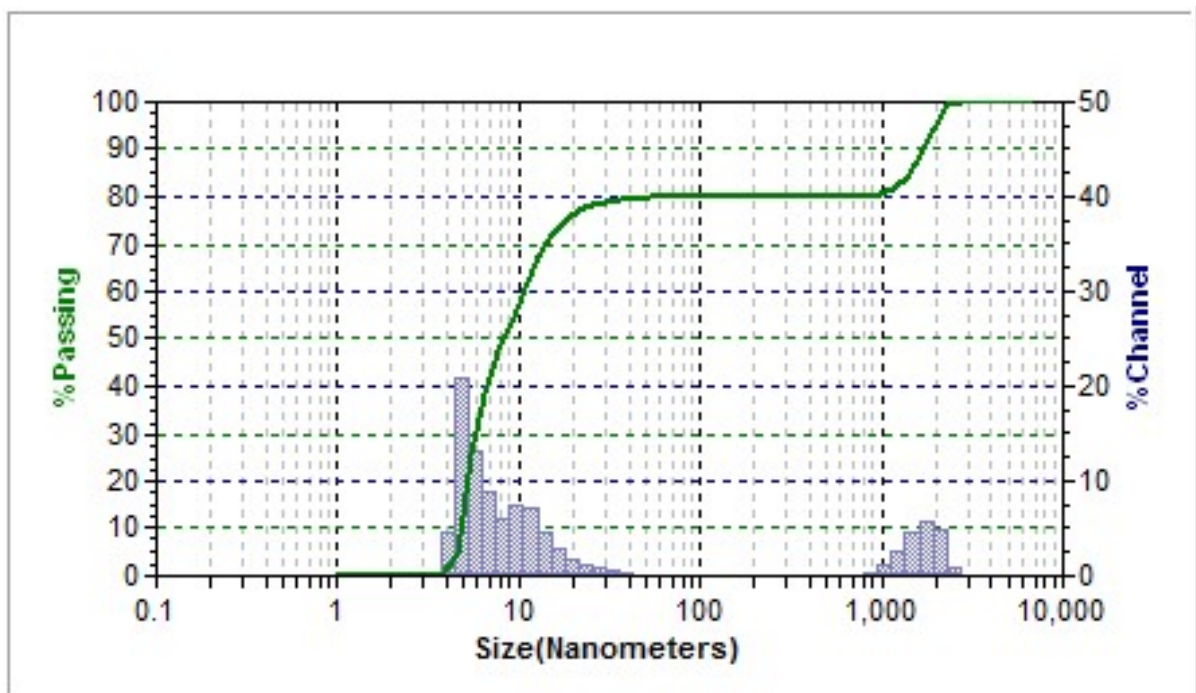


Рисунок 4.16 – Зависимость изменения среднего размера капель воды от времени приготовления

Т. о. воздействие ультразвуковых волн частотой 40 кГц (50 Вт), работающих в режиме кавитации, даёт изменение размера капель воды от (400 – 500) мкм к размеру менее 50 мкм за 8 мин ультразвукового воздействия. Это выражается в стабилизации пластической вязкости на уровне (18 – 19) мПа·с. Напротив, при отсутствии воздействия ультразвуковых волн частотой 40 кГц, работающих в режиме кавитации, после 30 мин воздействия только одной мешалки при 700 об/мин диаметр капель воды остаётся равен 361 мкм, что при воздействии ультразвуковых волн частотой 40 кГц, работающих в режиме кавитации, достигается через 4 мин.

Параметры эмульсии через 10 мин воздействия ультразвуковых волн частотой 40 кГц, работающих в режиме кавитации, приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Параметры эмульсии через 10 мин воздействия ультразвуковых волн частотой 40 кГц, работающих в режиме кавитации [29]

Параметры	Через 1 сут	После термо- старения	Через 14 сут
Соотношение углеводородной / водной фаз, % об.	70/30	71/29	69/31
Плотность, г/см ³	1,1	1,1	1,1
Пластическая вязкость при 49 °С, мПа·с (сП)	19	19	17
Динамическое напряжение сдвига при 49 °С, Па / фунт / 100 фут ²	5,1/19	8,1/17	9,5/22
Статическое напряжение сдвига за 10 с при 49 °С, Па / фунт / 100 фут ²	6,2/13	6,7/14	7,7/16
Статическое напряжение сдвига за 10 мин при 49 °С, Па / фунт / 100 фут ²	6,7/14	7,2/15	7,7/16
Объём фильтрата при ΔР = 3,5 МПа и Т = 80 °С через керамический диск с проницаемостью по воздуху 60 мкм ² , см ³ за 30 мин	3,2	4,6	3,7
Толщина фильтрационной корки (при высокой температуре / высоком давлении), мм	0,5	0,5	0,5
Электростабильность, В	880	884	867
Содержание ионов Cl ⁻ , мг/дм ³	43 000	43 000	42 000
Избыток извести, кг/м ³	13	13	12
Содержание CaCO ₃ , кг/м ³	190	190	180

Параметры эмульсий, получаемых воздействием ультразвуковых волн частотой 40 кГц (50 Вт), работающих в режиме кавитации остаются стабильными и после термостарения и при отстое на протяжении 14 сут.

4.4 Выводы по главе 4

Воздействие ультразвуковых волн частотой 40 кГц (50 Вт), работающих в режиме кавитации, применимо для получения эмульсионных буровых растворов. Параметры РУО соответствуют получаемым на Hamilton Beach и Silverson. Показатель фильтрации через фильтровальную бумагу по ISO 10414 менее 3 см³.

Капли воды от 400 мкм уменьшаются менее 50 мкм через 8 минут ультразвукового воздействия в режиме кавитации при частоте 40 кГц и подводимой мощности от генератора 50 Вт. Через 20 мин размер капель водной фазы уменьшится до 5 мкм.

РУО получаемые после 10 мин воздействия ультразвука 40 кГц (50 Вт) в режиме кавитации, не расслаиваются как после термостарения, так и при отстое на протяжении 14 сут. Это подтверждает стабильность буровых растворов и возможность повторного применения при бурении скважин.

ГЛАВА 5 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

5.1 Существующие установки для очистки металлических деталей от ржавчины и масла

В настоящее время на рынке существуют промышленные установки для очистки деталей с применением ультразвука высокой интенсивности мощностью 1,5 кВт и более. Отечественные разработки проводятся в г. Бийск Алтайского края, организация ООО «Центр ультразвуковых технологий». Технические характеристики одной из моделей, приведённых на сайте <http://u-sonic.ru/>, представлены в таблице 5.1. Внешний вид ультразвукового технологического аппарата серии «Булава» (модель УЗТА-10/18–ОПг) приведён на рисунке 5.1. Длина соединительного кабеля до 50 метров.

Таблица 5.1 – Основные технические характеристики ультразвукового технологического аппарата серии «Булава»

Мощность, ВА, не более	10 000
Частота ультразвуковых колебаний, кГц	18±1,65
Питание от трехфазной сети переменного тока напряжением, В	380±38
Интенсивность излучения Вт/см ² , не менее	10
Время непрерывной работы, ч	8
Габаритные размеры: электронный генератор, мм	230x550x800
Колебательная система, мм	Ø300x1250
Диаметр рабочего инструмента (max/min), мм	70/50
Длина излучателя, мм, не менее	880



Рисунок 5.1 – Ультразвуковой технологический аппарат серии «Булава»

Также существуют готовые батареи ультразвуковых излучателей, которые можно приобрести на сайте <https://aliexpress.ru/>. Примеры подобных установок приведены на рисунке 5.2 и таблице 5.2.



Рисунок 5.2 – Ультразвуковые установки с сайта <https://aliexpress.ru/>

Таблица 5.2 – Технические характеристики ультразвуковых установок
производителя <https://www.ultra-piezo.com/>

Тип	Размер, мм	Частота, кГц	Мощность, Вт	Количество излучателей
UCE-UITP300W	300*190*100	25; 28; 33; 40; 80; 130	300	6
UCE-UITP600W	360*275*100	25; 28; 33; 40; 80; 130	600	12
UCE-UITP1000W	450*350*100	25; 28; 33; 40; 80; 130	1000	20
UCE-UITP1200W	470*380*100	25; 28; 33; 40; 80; 130	1200	24
UCE-UITP1500W	520*450*100	25; 28; 33; 40; 80; 130	1500	30
UCE-UITP1800W	560*450*100	25; 28; 33; 40; 80; 130	1800	36
UCE-UITP2000W	650*450*100	25; 28; 33; 40; 80; 130	2000	40
UCE-UITP2400W	740*520*100	25; 28; 33; 40; 80; 130	2400	48
UCE-UITP3000W	820*540*100	25; 28; 33; 40; 80; 130	3000	60
UCE-UITP5000W	1200*590*100	25; 28; 33; 40; 80; 130	5000	100

Стоимость перечисленных выше установок приведена в таблице 5.3. Для сопоставления стоимости 1 Вт выполнено определение удельной мощности, приведённое в таблице 5.4. Как видим из таблицы, наименьшая стоимость получения 1 Вт ультразвука высокой интенсивности имеет ультразвуковой технологический аппарат серии «Булава». Дальнейшие расчёты будем проводить исходя из укомплектования технологической схемы данными установками.

Таблица 5.3 – Стоимость промышленных установок для получения ультразвука высокой интенсивности по состоянию на 01.04.2020 г.

Модель	Источник	Стоимость (курс доллара принят 1 \$ = 100 р.)	
Ультразвуковой технологический аппарат серии «Булава» (модель УЗТА-10/18–ОПг)	http://u-sonic.ru/catalog/apparaty_dlya_uskoreniya_protsesov_v_zhidkikh_sredakh/bulava10pg1/	750 000 р.	
Погружной ультразвуковой очиститель 3000 Вт 28 кГц	https://aliexpress.ru/item/32999695535.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.3e6544ffT5XpJN&algo_pvid=987faf4e-3ede-4fe0-be77-150ae2397a4f&algo_expid=987faf4e-3ede-4fe0-be77-150ae2397a4f-23&btsid=0ab6f81615849366735691740e4259&ws_ab_test=searchweb0_0,searchweb201602_,searchweb201603_ Сайт производителя: https://www.ultra-piezo.com/	1750 \$ + 805,54 \$ (доставка)	255 554 р.
GENENG GZ-1036 промышленный ультразвуковой очиститель ржавчины, масла (обезжиривание) для объёма 180 л, 1800 Вт	https://aliexpress.ru/item/32850357695.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.3a81559cOShKHh&algo_pvid=5e2a4a5e-6dbc-4d30-8be3-db0938c4bd86&algo_expid=5e2a4a5e-6dbc-4d30-8be3-db0938c4bd86-17&btsid=0ab6fa8115849431516513922e8602&ws_ab_test=searchweb0_0,searchweb201602_,searchweb201603_ Сайт производителя: http://www.szgeneng.com/gz-1036.html	2200 \$ + 157,89 \$ (доставка)	235 789 р.

Таблица 5.4 – Удельная стоимость получения 1 Вт

Стоимость одной установки, р.	Мощность одной установки, Вт	Удельная стоимость 1 Вт, р.
255 554	3000	85,2
235 789	1800	131,0
750 000	10 000	75,0

5.2 Сценарные условия и результаты расчёта экономической эффективности

Исходные данные для проведения экономических расчётов приведены в таблице 5.5. Кумулятивный дисконтированный денежный поток, полученный при применении различного количества установок «Булава» приведён на рисунке 5.3.

Таблица 5.5 – Исходные данные для проведения экономических расчетов

№ п/п	Наименование	Единица измерения	Количество установок «Булава»		
			1	5	10
1	Инвестиции на закупку установок «Булава» по годам расчетного периода (по инвестиционному плану осуществляются в 1-м базисном году)	млн р.	0,75	3,8	7,5
2	Затраты на проведение опытно-промысловых работ (работы выполняются во 2-м базисном году на 5 скважинах)	млн р.	2,5	2,5	2,5
3	Срок службы нового типа оборудования (по инвестиционному плану начинается со 2-го года расчетного периода)	лет	10		
4	Количество скважин с применением установок «Булава»	ед.	от 3 до 5		

Продолжение таблицы 5.5

№ п/п	Наименование	Единица измерения	Количество установок «Булава»		
			1	5	10
5	Суточная ставка буровой бригады и сервиса по буровым растворам	млн р.	1,5		
6	Продолжительность работ по приготовлению 160 м ³ РУО с применением ДГ-40	сут	3,0	3,0	3,0
7	Продолжительность работ по приготовлению 160 м ³ РУО с применением установок «Булава»	сут	2,8	2,0	1,0

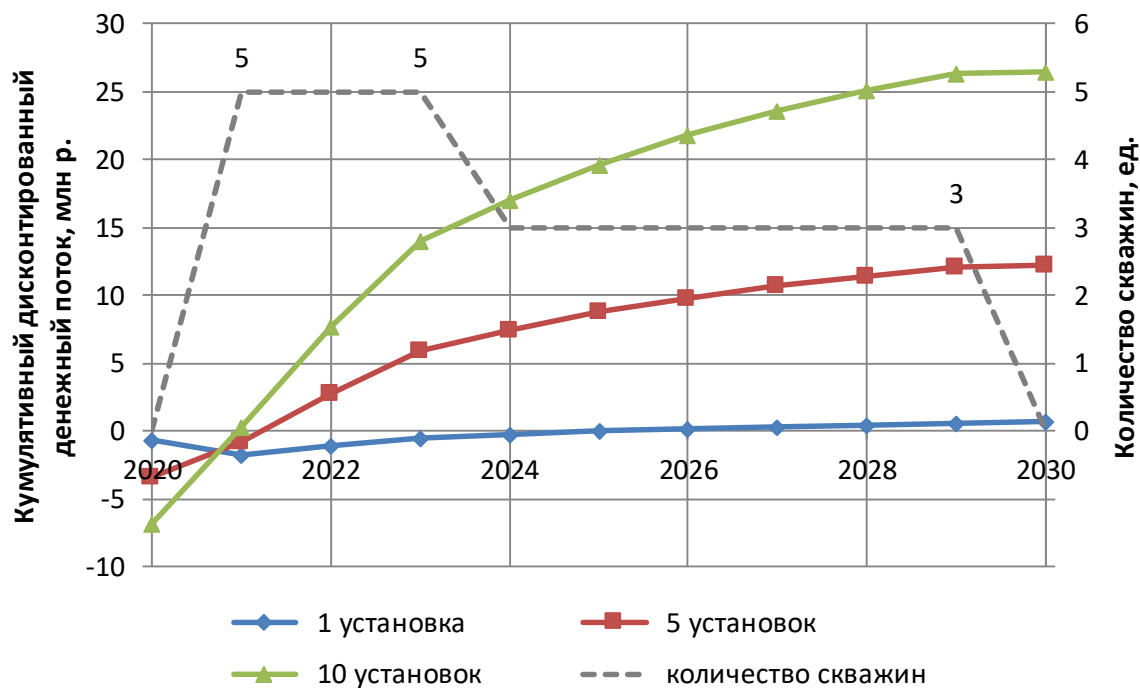


Рисунок 5.3 – Экономический расчёт применения 1; 5 и 10 установок «Булава»

Как видим из рисунка укомплектование буровой 10 установками «Булава», при сокращении продолжительности приготовления 160 м³ РУО с 3 до 1 сут, по сравнению с использованием диспергатора ДГ-40, окупится через 1 год после начала применения, в то время как при укомплектовании 1 установкой окупится через 5 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основе выполненных исследований изложены научно обоснованные методики и разработки, имеющей важное значение в области технологии бурения и освоения скважин.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

1. Анализ применяемых при бурении горизонтальных участков промысловых жидкостей показал, что по совокупности положительных достоинств, растворы на углеводородной основе являются наиболее подходящими для проходки наклонно-направленных скважин и горизонтальных участков, интервалов продуктивных пластов. Несмотря на ряд преимуществ, применение РУО ограничивается экологическими требованиями (класс опасности 3 – в случае применения в качестве основы дизельного топлива, класс опасности 4 – в случае применения минерального масла), технологическими трудностями приготовления и высокой стоимостью, а также, возможностями и потенциалом компаний, занимающихся строительством скважин.

2. Выполненный анализ существующих способов приготовления эмульсионных растворов на углеводородной основе показал, что время приготовления 160 м³ бурового раствора с применением струйного диспергатора на скважинной площадке составляет 3 сут и требует создания избыточного давления до 10 МПа с помощью цементирующего агрегата или бурового насоса. Необходима разработка энергосберегающих технологических средств, направленных на сокращение времени приготовления РУО.

3. По результатам статистического анализа выявлено, что на электростабильность существенно влияет содержания эмульгатора и извести. В меньшей степени влияет водонефтяное отношение и содержание структурообразователя. Если требуется повысить электростабильность, то сначала надо увеличивать содержания эмульгатора, извести, OWR и концентрацию структурообразователя.

4. Экспериментально установлено, что воздействие ультразвуковых волн частотой 40 кГц, работающих в режиме кавитации, применимо для получения эмульсионных буровых растворов. РУО получаемые после 10 мин воздействия ультразвука 40 кГц в режиме кавитации, не расслаиваются как после термостарения, так и при отстое на протяжении 14 сут. Это подтверждает стабильность буровых растворов и возможность повторного применения при бурении скважин. Предложенные технологические решения являются перспективной альтернативой существующим решениям в бурении и рекомендуются для дальнейших разработок в области приготовления буровых растворов на углеводородной основе.

5. Укомплектование буровой 10 установками «Булава», при сокращении продолжительности приготовления 160 м³ РУО с 3 до 1 сут, по сравнению с использованием гидравлического диспергатора, окупится через 1 год после начала применения, в то время как при укомплектовании 1 установкой окупится через 5 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуллаева, З. А. К оценке дисперсности эмульсии масляных реагентов расчетным и экспериментальным методами / З. А. Абдуллаева, Т. Е. Вахонина // VIII Всероссийская научно-практическая конференция «Россия молодая»: Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева 19 – 22 апреля 2016 г. – Кемерово, 2016. – С. 53.
2. Акимов, С. С. Расчет объема выборки эксперимента в условиях отсутствия нормальности данных / С. С. Акимов // Известия оренбургского государственного аграрного университета. – 2015. – №5 – С. 235 – 237.
3. Ангелопуло, О. К. Буровые растворы для осложненных условий / О. К. Ангелопуло. – М.: Недра, 1988. – 116 с.
4. Ахназарова, С. Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: учеб. пособие для хим.-технол. спец. вузов // С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. – 2-е изд., переаб. и доп. – М.: Высш. шк., 1985. – 327 с.
5. Банникова, О. Ю. Совершенствование технологии приготовления и применения буровых растворов на основе сухих полимерных смесей: дисс. канд. техн. наук: 25.00.15 / Банникова Олеся Юрьевна. – Уфа, 2015. – 210 с.
6. Бойко, А. Ф. Надежный метод обеспечения требуемой точности эксперимента в машиностроении / А. Ф. Бойко, М. Н. Воронкова // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – № 9. – С. 10 – 16.
7. Булатов, А. И. Буровые промывочные и тампонажные растворы: учеб. пособие для вузов / А. И. Булатов, П. П. Макаренко, Ю. М. Проселков – М.: ОАО "Издательство "Недра", 1999. – 424 с.
8. Булатов, А. И. Справочник по промывке скважин / А. И. Булатов, А. И. Пеньков, Ю. М. Проселков. – М.: Недра, 1984. – 317 с.
9. Бурение горизонтальных скважин. – Оренбург: 1998. – 480 с.
10. Бурение наклонных и горизонтальных скважин: справочник / А. Г.

- Калинин [и др.]; под ред. А. Г. Калинина. – М.: Недра, 1997. – 648 с.
11. Воюцкий, С. С. Курс коллоидной химии / С. С. Воюцкий. – 2 изд. – М., 1975. – 367 с.
 12. Вскрытие продуктивных пластов растворами на углеводородной основе: доклад на конф. по бурению сверхглубоких скважин / В. Г. Матюшков [и др.]. – Ярославль, 2001. – С. 138 – 149.
 13. Ганиев, С. Р. Исследование и разработка энергосберегающих технологий приготовления и гомогенизации буровых и тампонажных растворов, основанных на эффектах волновой механики: дисс. канд. техн. наук: 25.00.15, 05.02.13 / Ганиев Станислав Ривнерович. – Москва, 2010. – 196 с.
 14. Грей, Д. Р. Состав и свойства буровых агентов (промывочных жидкостей): пер. с англ. / Д. Р. Грей, Г. С. Г. Дарли – М.: Недра, 1985. – 509 с.
 15. Демьяненко, Н. А. Причины осложнений при вскрытии высокопроницаемых продуктивных пластов с направленной кольматацией околоствольной зоны / Н. А. Демьяненко // Нефтяное хозяйство. – 1992. – №6. – С. 14-16.
 16. Дианов, В. Н. Перспективные направления повышения надёжности вычислительной техники и систем управления / В. Н. Дианов // Надёжность. – 2004. – № 3. – С. 33 – 47.
 17. Дмитриев, А. Ю. Основы технологии бурения скважин: уч. пособие / А. Ю. Дмитриев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 216 с.
 18. Донской, А. В. Ультразвуковые электротехнологические установки / А. В. Донской, О. К. Келлер, Г. С. Кратыш. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. Отделение, 1982. – 208 с.
 19. Ермолаева, Л. В. Механика буровых растворов: уч. пособ. / Л. В. Ермолаева. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2012. – 47 с.
 20. Живаева, В. В. Статистический анализ влияния компонентного состава на электростабильность РУО / В. В. Живаева, М. Е. Коваль, В. А. Капитонов // Ашировские чтения : сб. трудов Междунар. науч.-практ. конференции. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2019. – С. 157 – 161.
 21. Живаева, В. В. Установление зависимости электростабильности от

- концентрации компонентов РУО / В. В. Живаева, М. Е. Коваль, В. А. Капитонов // Нефть. Газ. Новации / ООО "Портал Инноваций". – 2020. – № 1. – С. 26 – 28.
22. Заливин, В. Г. Осложнения при бурении нефтегазовых скважин: учеб. пособие / В. Г. Заливин. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. – 247 с.
23. Ильясов, С. Е. Эмульсионные буровые растворы – тенденции развития технологии / С. Е. Ильясов [и др.] // Территория нефтегаз. – 2011. – № 11. – С. 14 – 17.
24. Карташов, Л. П. Перспективы применения энергосберегающей кавитационной обработки материалов в технологических процессах АПК [Электронный ресурс] / Л. П. Карташов, А. В. Колпаков. – URL: <http://shidnaftapostach.ru/techologic> (дата обращения 16.05.2019).
25. Кистер, Э. Г. Химическая обработка буровых растворов / Э. Г. Кистер. – М.: Недра, 1972. – 392 с.
26. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. – М.: Мир, 1974 – 668 с.
27. Коваль, М. Е. Анализ причин негерметичности цементной крепи и методы их предупреждения на месторождениях самарской области / М. Е. Коваль, А. А. Воронин, А. С. Жаркенов // Научно-технический ежемесячный журнал «Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море». – 2019. – № 7. – С. 26 – 29.
28. Коваль, М. Е. Бурение скважин с большим отходом от вертикали на блоке "Хунин-Б" / М. Е. Коваль [и др.] // Научно-технический ежемесячный журнал «Нефтяное хозяйство». – 2019. – № 9. – С. 68 – 70.
29. Коваль, М. Е. Влияние способов приготовления растворов на углеводородной основе на их основные параметры / М. Е. Коваль // Научно-технический ежемесячный журнал «Нефть. Газ. Новации». – 2020. – № 3. – С. 30 – 36.
30. Коваль, М. Е. Исследование влияния концентрации смазывающей добавки в рецептуре бурового раствора на коэффициенты трения / М. Е. Коваль [и др.] // Научно-технический ежемесячный журнал «Нефть. Газ. Новации».

– 2018. – № 10. – С.32 – 35.

31. Коваль, М. Е. Оценка возможности использования выбуренной породы для ликвидации поглощений / М. Е. Коваль [и др.] // Нефть. Газ. Новации / ООО "Портал Инноваций". – 2019. – № 11. – С. 52 – 60.
32. Коваль, М. Е. Практическое применение методов подбора кольматантов для предупреждения осложнений при бурении скважин на месторождениях Самарской области / М. Е. Коваль [и др.] // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2017. – № 7. – С. 9 – 15.
33. Коновалов, Е. А. Совершенствование технологии приготовления буровых растворов / Е. А. Коновалов, В. В. Маслов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2007. – № 1. С. 37-43.
34. Королева, М. Р. Влияние частоты колебаний давления в жидкости на динамику кавитационного пузырька // М. Р. Королева, Д. А. Загвозкин, А. М. Алим // Проблемы механики и материаловедения, 2014. – С. 85 – 88.
35. Крюгер, Р. Ф. Обзор проблемы загрязнения продуктивного пласта и продуктивности скважин // Journal of Petroleum Technology. – 1986. – № 2. – С. 131 – 152.
36. Леонтьев, М. В. Технологические решения по предотвращению деформации обсадных колонн в скважинах / М. В. Леонтьев, М. Е. Коваль [и др.] // Научно-технический ежемесячный журнал «Нефтяное хозяйство». – 2019. – № 5. – С. 22 – 25.
37. Майер, В. В. Простые опыты с ультразвуком / В. В. Майер // – М.: Главная редакция физико-математической литературы, 1978. – 160 с.
38. Маковей, Н. Гидравлика бурения / Н. Маковей; пер. с рум. – М.: Недра, 1986. – 536 с.
39. Мамаджанов, У. Д. Динамическая характеристика промывочных растворов и осложнения в бурении / У. Д. Мамаджанов. – М.: Недра, 1972. – 191 с.
40. Маслов, В. В. Кавитационное диспергирование дисперсной фазы буровых растворов / В. В. Маслов, Р. Ю. Кузнецов // Известия высших учебных

- заведений. Нефть и газ. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет. – 2006. – С. 42 – 45.
41. Маслов, В. В. Совершенствование технологии, разработка и выбор химических реагентов для приготовления буровых растворов с целью повышения эффективности и экологической безопасности бурения скважин: дисс. канд. техн. наук: 25.00.15 / Маслов Валентин Владимирович. – Тюмень, 2006. – 183 с.
42. Михеев, В. Л. Технологические свойства буровых растворов / В. Л. Михеев. – М.: «Недра», 1979. – 239 с.
43. Мицеллообразование, солюбилизация и микроэмульсии / Под ред. К. Миттела. – М.: Мир, 1980. – 597 с.
44. Никитин, В. И. Повышение качества вскрытия продуктивных пластов путём применения расчётного критерия к выбору промывочной жидкости: дисс. канд. техн. наук: 25.00.15 / Никитин Василий Игоревич. – Самара, 2018. – 117 с.
45. Николаев, Н. И. Буровые промывочные жидкости: учеб.пособ. / Н. И. Николаев, Ю. А. Нифонтов, П. А. Блинов. – СПб: Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г. В. Плеханова, 2002. – 20 с.
46. Обзор нефтесервисного рынка России – 2018. – М.: Исследовательский центр компании «Делойт» в СНГ. – 2019. – 24 с.
47. Овчинников, В. П. Буровые промывочные жидкости / В. П. Овчинников, Н. А. Аксенова. – Тюмень: изд-во «Нефтегазовый университет», 2008. – 309 с.
48. Омелянюк, М. В. Кавитационные технологии в нефтегазовом деле / М. В. Омелянюк // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2010. – №1. – С. 29 – 33.
49. Осипов, Л. В. Ультразвуковые диагностические приборы / Л. В. Осипов. – М.: Видар, 1999. – 256 с.
50. Паус, К. Ф. Буровые растворы / К. Ф. Паус. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1973. – 304 с.

51. Пеньков, А. И. Основные факторы, влияющие на изменение нефтепроницаемости коллекторов под действием буровых растворов / А. И. Пеньков, В. Н. Кошелев // Вопросы промывки скважин с горизонтальными участками ствола: сб. науч. трудов / ОАО НПО «Бурение» – Краснодар, 1998. – С. 102 – 113.
52. Повышение эффективности ультразвуковых технологических аппаратов для кавитационной обработки жидких сред высокой вязкости [Электронный ресурс]. – URL: https://u-sonic.ru/upload/ultrasonic_treatment_of_high_viscosity_liquids.pdf (дата обращения 16.05.2019).
53. Промтов, М. А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов / М. А. Промтов // Вестник ТГТУ. – 2008. – №4 (Т. 14). – С. 861 – 868.
54. Растворы на углеводородной основе РУО [Электронный ресурс]. – URL: <http://vseoburenii.com> (дата обращения 16.05.2019).
55. Регенерация бурового раствора при бурении скважин с оптимизированной конструкцией / А. Арестов [и др.] // Oil&Gas Journal Russia. – 2017. – № 10. – С. 24 – 29.
56. Резниченко, И. Н. Приготовление, обработка и очистка буровых растворов / И. Н. Резниченко. – М.: Недра, 1982. – 230 с.
57. Решение проблем утилизации шламов при применении растворов на углеводородной основе / Н. Н. Алхасов [и др.] // Новые технологии – нефтегазовому региону: материалы всероссийской науч.-практ. конф. – 2011. – С. 111 – 113.
58. Руководство по буровым растворам для инженеров-технологов. – Ред. 2.1. – Mi Swaco, 2009. – 992 с.
59. Рынок бурения горизонтальных скважин и зарезки горизонтальных боковых стволов: текущее состояние и прогноз развития до 2027 года [Электронный ресурс]. – URL: <http://rpi-consult.ru> (дата обращения 16.05.2019).

- 60.Рябокоть, С. А. Технологические жидкости для заканчивания и ремонта скважин / С. А. Рябокоть. – Краснодар, 2009. – 337 с.
- 61.Рязанов, Я. А. Энциклопедия по буровым растворам / Я. А. Рязанов. – Оренбург: Летопись, 2005. – 664 с.
- 62.Скворцов, Ю. Бурение бурению рознь / Ю. Скворцов // «Нефтегазовая вертикаль». – 2001. – №14. – С. 14 – 17
- 63.Тирон, Д. В. Совершенствование технологии эмульсионных растворов для бурения скважин в условиях повышенных забойных температур: дис. канд. тех. наук: 25.00.15 / Тирон Денис Вячеславович; Ухтинский государственный технический университет; науч. рук. Уляшева Н. М. – Ухта, 2017. – 114 с.
- 64.Третьяк, А. А. Буровые технологические жидкости для бурения и крепления горизонтальных скважин / А. А. Третьяк, М. О. Кокарев // Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2016. – 22 с.
- 65.Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности». Серия 08. Выпуск 19. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2015. – 316 с.
- 66.Федоткин, И. М. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности / И. М. Федоткин. – Киев: ОКО, 2000. – 204 с.
- 67.Физика и техника мощного ультразвука : в 3 кн. – Москва : Наука, 1967-1970. – Кн. 2 : Мощные ультразвуковые поля / авт. К. А. Наугольных, З. А. Гольдберг, Л. К. Зарембо [и др.]. – 1968. – 267 с.
- 68.Хмелев, В. Н. Полуволновые пьезоэлектрические ультразвуковые колебательные системы [Электронный ресурс] / В. Н. Хмелев [и др.] // Электронный журнал «Техническая акустика». – 2005. – 26. – 12 с. – URL: <http://www.ejta.org/ru/khmelev2> (дата обращения: 16.05.2019).
- 69.Хмелев, В. Н. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В. Н. Хмелев [и др.] // – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн.

ун-та, 2010. – 203 с.

70. Хмелев, В. Н. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве / В. Н. Хмелев. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2007. – 400 с.
71. Цивинский, Д. Н. Применение статистического метода анализа в нефтегазовом деле: учеб. пособие / Д. Н. Цивинский. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. – 377 с.
72. Червяков, В. М. Гидродинамические и кавитационные явления в роторных аппаратах / В. М. Червяков. – М.: Машиностроение, 2007. – 128 с.
73. Чеславский, Я. В. Анализ современного состояния технологии промывки горизонтальных скважин / Я. В. Чеславский // Материалы XI международной молодежной конференции «Севергеоэкотех – 2010» (19 марта 2010 г., Ухта): в 5 ч. – Ухта: УГТУ, 2010. – Ч. 4. – С. 102 – 104.
74. Чеславский, Я. В. Исследование влияния химических реагентов на фильтрационные процессы в горизонтальной скважине / Я. В. Чеславский, Н. Г. Деминская // Научные исследования и инновации: материалы IV Всероссийской конференции «Нефтегазовое и горное дело», г. Пермь, ПНИПУ, 16-18 ноября 2011 г. – Пермь, 2011. – Т. 5; № 4-ПТУ. – С. 18-21.
75. Чеславский, Я. В. Особенности фильтрационных процессов в горизонтальной скважине / Я. В. Чеславский // Материалы XII международной молодежной конференции «Севергеоэкотех – 2011» (16-18 марта 2011 г., Ухта): в 5 ч. – Ухта: УГТУ, 2011. – Ч. 2. – С. 57 – 62.
76. Чубик, П. С. Квалитетрия буровых промывочных жидкостей / П. С. Чубик. – Томск: НТЛ, 1999. – 300 с.
77. Шиповский, К. А. Прогнозирование и предупреждение поглощений в серпуховском ярусе при бурении скважин на месторождениях самарской области / К. А. Шиповский, В.С. Циркова, М.Е. Коваль // Научно-технический ежемесячный журнал «Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море». – 2019. – № 9. – С. 35 – 39.

78. Шиповский, К. А. Прогнозирование полных и катастрофических поглощений при бурении скважин на месторождениях Камско-Кинельской системы прогибов в Самарской области / К. А. Шиповский, М. Е. Коваль, В.С. Циркова // Научно-технический ежемесячный журнал «Нефть. Газ. Новации». – № 10 / 2018. – С. 14 – 18.
79. Щукин, Е. Д. Коллоидная химия: 3-е изд., перераб. и доп. / Е. Д. Щукин, А. В. Перцов, Е. А. Амелина – М.: Высшая школа, 2004. – 445 с.
80. Щукин, Е. Д. Коллоидная химия: учеб. для университетов и химико-технолог. вузов / Е. Д. Щукин, А. В. Перцов, Е. А. Амелина. – М.: Высш. шк., 2004. – 445 с.
81. Юн, Ш. Новые промывочные жидкости для восстановления коллекторских свойств пластов / Ш. Юн, Я. Джиниан // Oil and Gas journal. – 2008. – №8. – С. 61 – 66.
82. Becher, P. Emulsions: theory and practice / P. Becher. – 2 ed. – N. Y., 1965. – 363 p.
83. Swan, J., 1923. Method of drilling wells. US Patent 1455010, May. – 7 p.

