

На правах рукописи



Лысакова Евгения Игоревна

**ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НАНОЧАСТИЦ НА ТЕЧЕНИЯ
БУРОВЫХ РАСТВОРОВ**

Специальность 1.1.9

«Механика жидкости, газа и плазмы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Красноярск — 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Научный руководитель

Минаков Андрей Викторович
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты:

Перминов Анатолий Викторович
доктор физико-математических наук,
доцент, заведующий кафедрой общей
физики ФГАОУ ВО «Пермский
национальный исследовательский
политехнический университет»

Борзенко Евгений Иванович
доктор физико-математических наук,
доцент, профессор кафедры прикладной
газовой динамики и горения ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский
Томский государственный университет»

Ведущая организация:

**ФГБОУ ВО Алтайский
государственный технический
университет им. И.И. Ползунова**

Защита состоится «**16**» **03** **2023** г. в **14:00** на заседании диссертационного совета Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (филиал – Институт механики сплошных сред УрО РАН) по адресу: 614013, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; тел: (342) 237-84-61; факс: (342) 237-84-87; сайт: www.icmm.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте «Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук».

Автореферат разослан « ___ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

/А.Л. Зуев

Общая характеристика работы

Актуальность темы, степень ее разработанности.

Активный интерес к суспензиям с наночастицами (наножидкостям) появился четверть века тому назад и с тех пор непрерывно растет. Число публикаций, посвященных исследованию свойств и применений наножидкостей, увеличивается экспоненциально. Наночастицы в силу своих малых размеров имеют ряд необычных свойств, которые отсутствуют у макроскопических дисперсных частиц. Необычные свойства наночастиц делают нестандартными и свойства наножидкостей, в которых они являются составной частью. Это обусловило широчайший спектр их применения.

В технологиях разработки и эксплуатации нефтегазовых месторождений наножидкости стали применяться существенно позднее. Однако в настоящее время области применения наножидкостей очень активно исследуются. В России вопросами применения нанотехнологий в добыче нефти и газа занимались Хавкин А.Я., Лосев А.П. и др. Подробный обзор работ по применению наночастиц в технологиях нефтедобычи представлен Евдокимовым И.Н. в своей монографии (2016). Перспективы применения углеродных наноматериалов в нефтегазовой отрасли и влияние наночастиц на интенсификацию добычи нефти также подробно исследовал Шамилов В.М. За рубежом исследованием влияния наночастиц на некоторые свойства буровых растворов занимались Belayneh, Jung, Taraghikhah, Salih, Taha и др.

Современные буровые растворы имеют много различных свойств, на которые в той или иной степени могут влиять добавки наночастиц. Так в ряде работ отмечалось, что добавка наночастиц может использоваться для управления реологическими свойствами и контроля процесса фильтрации бурового раствора, для снижения коэффициента трения буровой трубы и стенок скважины и предотвращения таких явлений, как прихват бурильной колонны. Большинство исследователей сходятся во мнении, что наночастицы оказывают гораздо более сильное влияние на свойства буровых растворов, чем микроскопические частицы. Однако имеющиеся исследования по влиянию добавок наночастиц на свойства буровых растворов нельзя назвать системными. Многие исследования имеют достаточно противоречивые результаты и не позволяют ответить на вопрос относительно влияния концентрации, размера и вида наночастиц на основные свойства буровых растворов. Здесь ситуация подобна той, которая ранее наблюдалась в изучении наножидкостей, где также долгое время, несмотря на большое количество исследований, отсутствовали ответы на многие важные вопросы. При этом буровой раствор является гораздо более сложной системой по сравнению с традиционной наножидкостью, поскольку содержит помимо наночастиц и базовой жидкости еще и микрокоагулянты, добавки различных ПАВ и полимеров, другие функциональные присадки. Поэтому дальнейшее изучение свойств буровых растворов с добавками наночастицами является очень

актуальной задачей как для фундаментальной науки, так и с практической точки зрения.

Цель работы – систематическое исследование влияния добавок наночастиц различного размера, концентрации и материала на свойства буровых растворов на водной основе и характеристики их течений.

Задачи, решенные для достижения поставленной цели:

1. Исследование влияния добавок наночастиц на коэффициенты вязкости и реологические свойства буровых растворов.

2. Исследование влияния добавок наночастиц на фильтрацию буровых растворов на водной основе.

3. Разработка методики численного моделирования многофазных течений буровых растворов с добавками наночастиц в скважинах.

4. Расчетное исследование влияния добавки наночастиц на характеристики течения буровых растворов и эффективности выноса ими шлама в скважинах.

Положения, выносимые на защиту:

1. Реологические характеристики буровых растворов на водной основе значительно улучшаются даже при введении низких концентраций наночастиц. Добавка наночастиц изменяет не только вязкие, но и упругие свойства буровых растворов и делает эти характеристики более стабильными в зависимости от температуры. При этом, как впервые было показано, влияние добавки зависит не только от концентрации, но и от размеров и материала наночастиц.

2. Добавки наночастиц значительно снижают фильтрационные потери буровых растворов на водной основе. Действие наночастиц на фильтрационные потери буровых растворов зависит от соотношения концентрации микрочастиц и наночастиц, а также от соотношения между размерами микро- и наночастиц и порами фильтра и, как впервые было показано с помощью электронной микроскопии высокого разрешения, обусловлено коагуляцией наночастицами пор в фильтрационной корке.

3. Разработанная методика численного моделирования многофазных течений буровых растворов в скважинах, основанная на использовании эйлеровой модели гранулированных сред и экспериментально измеренных реологических характеристиках модифицированных наночастицами буровых растворов, позволила показать, что добавка наночастиц в буровой раствор приводит к существенному улучшению эффективности транспорта шлама, которая возрастает с уменьшением размера наночастиц и увеличением угла наклона скважины.

4. Механизм влияния добавки наночастиц на эффективность выноса частиц шлама при течении буровых растворов в скважине обусловлен изменением формы профиля скорости и концентрации частиц в скважине, вызванный изменениями в реологии раствора при добавлении в него наночастиц.

Научная новизна работы определяется следующими положениями:

1. Экспериментально показано, что реологические параметры буровых растворов, модифицированных наночастицами, зависят не только от концентрации, но и от размеров и материала наночастиц.

2. Впервые показано, что добавка наночастиц изменяет не только вязкие, но и упругие свойства буровых растворов.

3. С помощью электронной микроскопии высокого разрешения было показано, что основной причиной снижения фильтрационных потерь буровых растворов при добавке наночастиц является коагулирование наночастицами пор в фильтрационной корке.

4. Впервые установлено, что действие наночастиц на фильтрационные потери буровых растворов зависит от соотношения концентрации микрочастиц и наночастиц, а также от соотношения между размерами микро- и наночастиц и порами фильтра.

5. Впервые с помощью численного моделирования установлены механизмы влияния добавки наночастиц на эффективность выноса частиц шлама при течении модифицированных наночастицами буровых растворов в скважине.

Практическая значимость работы состоит в том, что впервые экспериментально обосновано применение наночастиц для совершенствования свойств буровых растворов на водной основе. Показано, что с помощью добавок наночастиц можно управлять функциональными свойствами буровых растворов в очень широких пределах. Установлено, что свойства буровых растворов значительно зависят от концентрации, размера и сорта наночастиц, что не свойственно классическим суспензиям с микрочастицами. При этом значительные изменения наступают уже при очень низкой концентрации наночастиц, что не влияет на плотность бурового раствора и является положительным фактором при применении промысловой жидкости с практической точки зрения. Результаты исследований могут найти применение при разработке рецептур буровых растворов, составлении программ бурения, при проектировании скважин специалистами таких крупных нефтяных компаний, занимающихся вопросами строительства скважин, как ООО «РН-Бурение», ООО «РН-КрасноярскНИПИ-нефть», ОАО «Восточно-Сибирская нефтегазовая компания», ПАО «НГК «Славнефть» и ряда других организаций.

Основные результаты работы вошли в научно-технические отчеты по гранту РНФ (№ 17-79-20218).

Теоретическая значимость работы заключается в установленных зависимостях реологических параметров, фильтрационных свойств, характеристик и режимов течения буровых растворов, модифицированных наночастицами, в скважинах от концентрации, размера, материала наночастиц и температуры. Помимо этого, теоретическая значимость работы заключается в разработке новой методики для описания течения буровых растворов на

водной основе с добавкой наночастиц в скважинах с различным углом наклона, с помощью которой было показано, что наночастицы способны увеличить эффективность выноса шлама и таким образом улучшить промывку скважины.

Степень достоверности результатов обеспечивается использованием проверенных измерительных приборов, современных аппаратных и программных средств для обработки данных, сопоставлением и согласованием полученных результатов с известными в литературе данными, использованием физически обоснованных математических моделей и результатами их систематического тестирования и сопоставления с эталонными решениями и экспериментами.

Апробация результатов работы. Материалы диссертационной работы обсуждались более чем на 17 всероссийских и международных конференциях, наиболее значимые из которых: Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых (2017, 2019, 2021); Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодых ученых «Сибирский теплофизический семинар» (2018, 2019, 2020, 2021); Первый международный молодежный научно-практический форум «Нефтяная столица» под эгидой Комиссии Российской Федерации по делам ЮНЕСКО (2018); XXII Международный научный симпозиум студентов и молодых ученых имени академика М. А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (2018); XXI Всероссийская научная конференция с международным участием «Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии» (2018); Международная конференция «Рассохинские чтения» (2019); VIII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы (VIII Ставеровские чтения)» (2019); Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектив» (2020, 2021); XVI Минский международный форум по теплообмену (2022), VIII Всероссийская конференция «Пермские гидродинамические научные чтения» (2022).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 15 статей в журналах, включенных в Перечень ВАК, из них 11 статей – в зарубежных научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus.

Личный вклад автора заключается в приготовлении буровых растворов с добавками наночастиц и проведении экспериментальных исследований их свойств; проведении обработки и анализа результатов экспериментов; проведении численного моделирования течения модифицированных наночастицами буровых растворов на основе полученных в эксперименте данных; формулировке выводов; написании научных статей. Разработка и тестирование методики и математическое моделирование течения буровых растворов с наночастицами в скважине проводилась совместно с научным руководителем А. В. Минаковым. Совместно с

Неверовым А. Л. проводилась разработка рецептур буровых растворов и постановка лабораторных экспериментов по исследованию их свойств.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 134 наименований. Материал изложен на 148 страницах, содержит 86 рисунков и 5 таблиц.

Краткое содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность и разработанность темы исследования, формулируются цели и задачи диссертации, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы, основные положения, выносимые на защиту.

В **Первой главе** приводится анализ современного состояния исследований влияния наночастиц на свойства буровых растворов. В данной главе показано, что изучение свойств буровых растворов с наночастицами является очень перспективной и актуальной задачей для разработки экономически эффективного и экологически устойчивого бурового раствора.

В большинстве работ, посвященных изучению влияния добавки наночастиц на вязкость и реологию буровых растворов, отмечается, что нанодобавки в буровых растворах приводят к значительному увеличению вязкости и изменению их реологических свойств. Например, в работе Jung (2011) исследованы реологические свойства бентонитовых растворов, содержащих различные концентрации наночастиц (от 0.5 и до 5 мас.%) оксида железа размером 3 и 30 нм, при различной температуре и давлении. Полученные результаты показали, что с увеличением концентрации наночастиц Fe_2O_3 в растворе на водной основе повышается предел текучести и вязкость. Максимальное значение получено при концентрации 5 мас.%. Напряжение сдвига выросло почти в 30 раз, вязкость – в 10 раз. В работе Belayneh и Aadnou (2016) показано, что добавка наночастиц TiO_2 дает увеличение пластической вязкости бурового раствора на водной основе в 13 раз и увеличение предельного напряжения сдвига в 2.9 раз. В работе Rajat и др. (2015) 10%-ная концентрация наночастиц SiO_2 в буровом растворе на водной основе увеличила пластическую вязкость в 2.9 раз, а предельное напряжение сдвига в 5 раз.

Также в последнее время появились исследования, в которых суспензии наноразмерных частиц исследуются в качестве понизителей фильтрации. В работе Hoelscher и др. (2012) изучено применение буровых растворов на водной основе с использованием наночастиц для минимизации проницаемости сланцев. Начальная проницаемость образца сланца составляла 0.153 нД. Добавка наночастиц привела к уменьшению этого параметра до 0.0042 нД, что на 98% снизило проницаемость и, соответственно, уменьшило фильтрационные потери. В работе Medh и др. (2020) использование наночастиц в буровых растворах на водной основе снизило фильтрационные потери до 68%, а проницаемость до 97% по сравнению с базовым раствором. Для наночастиц размером 35 нм фильтрационные характеристики оказались

лучше, чем для наночастиц 50 нм. В работе Vryzas и др. (2016) исследовали водные бентонитовые суспензии, содержащие наночастицы оксида железа (Fe_3O_4) концентрацией 0.5 мас.% и размером 7-50 нм. Результаты фильтрации при низком давлении и температуре при использовании наночастиц размером 7-8 нм показали уменьшение конечного объема фильтрата на 25.7% и увеличение толщины фильтрационной корки на 5.5% по сравнению с базовой жидкостью. Фильтрационное поведение в условиях высокого давления и температуры показало более высокое снижение потерь жидкости: для наночастиц меньшего размера уменьшение фильтрационных потерь составило 34.3%, а для частиц 50 нм - 40% по сравнению с базовой жидкостью.

Таким образом, несмотря на большое количество исследований в данной области, окончательного понимания в вопросе влияния наночастиц на свойства и течение буровых растворов еще нет. Поэтому нужны дополнительные систематические исследования, которые должны носить комплексный экспериментально-теоретический характер и включать в себя изучение влияния нанодобавок на процессы вязкости и реологии, фильтрационных свойств и термостабильности буровых растворов, а также на течение бурового раствора в скважине.

Во **Второй главе** приведено описание методики приготовления бурового раствора, модифицированного наночастицами. Для проведения систематических лабораторных исследований по созданию рецептур новых буровых растворов на водной основе с добавкой наночастиц и исследования их физико-химических свойств использовано современное оборудование высокого качества, соответствующее международным стандартам.

В работе для приготовления бурового раствора частицы глины добавлялись в дистиллированную воду (или в раствор дистиллированной воды с добавлением полимера ГАММАКСАН в случае глино-полимерного бурового раствора) и суспензия интенсивно перемешивалась в течение 30 мин на высокоскоростной мешалке (OFITE 152-18 - Prince Castle) на 20000 об/мин. Массовая концентрация частиц глины в экспериментах составляла 5%. Далее в глинистую суспензию вводилось необходимое количество заранее приготовленных наносуспензий. Чтобы разрушить конгломераты наночастиц, наносуспензии подвергались обработке в ультразвуковом технологическом аппарате серии «Волна» УЗТА-0.4/22-ОМ.

В качестве наночастиц рассмотрены частицы оксидов кремния, алюминия и титана. Концентрация частиц в растворах варьировалась от 0.25 до 4 мас.%, а их размер от 5 до 190 нм. Для определения размера наночастиц использовался совмещенный акустический и электроакустический спектрометр DT-1200. Для контроля размера наночастиц также использовали данные просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) высокого разрешения JEM-2100 (JEOL, Япония), оснащенного энергодисперсионным спектрометром Oxford Inca x-sight.

В качестве микрокольматанта в буровой раствор добавлялся химически инертный порошок нитрида алюминия AlN, изготовленный ООО "ПЛАТИНА". Средний размер микрочастиц варьировался от 1 до 10 мкм, массовая концентрация – от 0.5 до 4 мас.%. Также в качестве утяжелителя в глино-полимерных растворах использовался баритовый микропорошок (соответствует ГОСТ 4682-84, марка Б-5 и Б-6) со средним размером частиц 70 мкм. Концентрация барита варьировалась от 10 до 39%, что соответствовало изменению плотности раствора от 1.06 до 1.55 г/см³.

Для изучения вязкости и реологии эмульсий использованы вискозиметры Ofite 900 и 1100. Вискозиметр в процессе исследований позволяет изменять диапазон измерений от 0.0006 до 1000 об/мин. Он позволяет измерять скорость сдвига, напряжение сдвига, вязкость и температуру. Погрешность измерений составляет 3%. Для исследования микрореологии образцов использован Rheolaser MASTER™. Технология, используемая в Rheolaser MASTER™, основана на одном из методов динамического светорассеяния Diffusive Wave Spectroscopy (DWS).

Фильтрационные свойства бурового раствора исследованы при помощи 6- ячеечного фильтр-пресса, OFITE 12BL-6 низкого давления/низкой температуры. Измерение проводилось по стандарту Американского нефтяного института API. Погрешность измерения не превышала 2%.

Для исследования кольматирующих свойств буровых растворов проведена серия измерений фильтрации раствора через керамический диск, имитирующий горную породу. Для этого использован фильтр-пресс OFITE 171-01 высокого давления/высокой температуры. Используются следующие керамические диски: диаметр 63.5 мм, высота 6.4 мм, средний размер пор 3 - 35 мкм, проницаемость 1.35 – 14.97 Дарси. Каждый эксперимент повторялся по три раза. Разброс данных по трем измерениям не превышал 5%.

В **Третьей главе** изучено влияние наночастиц на реологические свойства буровых растворов на водной основе. Вязкость и реология буровых растворов играют важнейшее значение для их применения, поскольку от них зависят потери давления при промывке, эффективность выноса шлама, устойчивость ствола скважины и многие другие факторы при бурении.

В **разделах 3.1-3.3** приведены результаты экспериментального изучения реологии буровых растворов в зависимости от концентрации, размера и материала наночастиц. В результате систематического изучения вязкости более чем 40 различных буровых растворов с наночастицами было установлено, что добавка наночастиц в буровые растворы может значительно улучшить их реологические характеристики. Результаты показали, что с увеличением концентрации и уменьшением размера наночастиц эффективная вязкость возрастает. Влияние наночастиц начинается с очень малых концентраций (см. рисунок 1). Такие низкие концентрации практически не влияют на плотность бурового раствора. Было показано, что эффективная вязкость буровых растворов возрастает и с уменьшением размера наночастиц

(см. рисунок 2). При этом было установлено, что наночастицы размером более 100 нм (при разумных для наночастиц концентрациях 2-4 мас.%) практически не оказывают заметного влияния на эффективную вязкость суспензий.

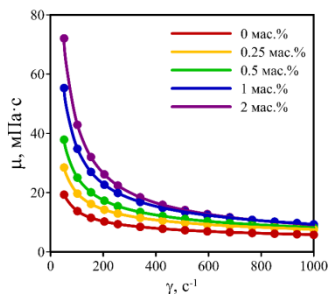


Рисунок 1 – Влияние концентрации частиц Al_2O_3 (43 нм) на вязкость глинистого бурового раствора.

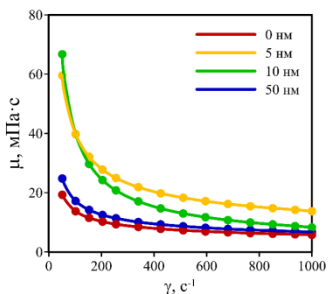


Рисунок 2 – Влияние размера частиц SiO_2 (2 мас.%) на вязкость глинистого бурового раствора.

Для аппроксимации реологических параметров модифицированных наночастицами растворов использовались степенная модель $\mu_f = K\dot{\gamma}^n$, модель Бингама $\mu_f = (\tau_0 + k_v\dot{\gamma})\dot{\gamma}^{-1}$, модель Хершели–Балкли $\mu_f = (\tau_0 + k_v\dot{\gamma}^n)\dot{\gamma}^{-1}$ (K – мера консистенции, $\text{Па}\cdot\text{с}^n$, $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, с^{-1} , n – показатель нелинейности, τ_0 – начальное напряжение сдвига вязкопластической жидкости, Па , k_v – пластическая вязкость, $\text{Па}\cdot\text{с}$).

Установлено, что с увеличением концентрации и уменьшением размера наночастиц может меняться реологическая модель бурового раствора, также значительно снижается показатель нелинейности, а мера консистенции и предельное напряжение сдвига, напротив, возрастают (см. рисунок 3).

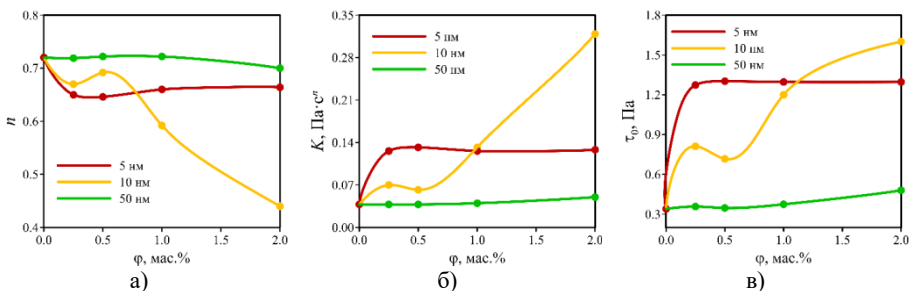


Рисунок 3 – Показатель нелинейности (а), мера консистенции (б), предельное напряжение сдвига (в) буровой суспензии от концентрации и размера наночастиц SiO_2 .

Было показано, что, несмотря на близкий средний размер, наночастицы оксидов кремния, титана и алюминия при одинаковой

концентрации оказывают разное влияние на реологию буровых растворов. Наиболее значительное влияние на вязкость при прочих равных условиях оказывают наночастицы оксида алюминия (см. рисунок 4).

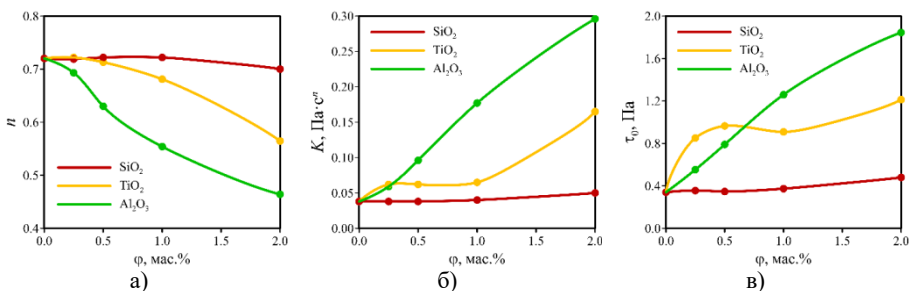


Рисунок 4 – Показатель нелинейности (а), мера консистенции (б) и предельное напряжение сдвига (в) бурового раствора в зависимости от концентрации различных наночастиц с размером близким к 50 нм.

Таким образом, было установлено, что добавка наночастиц значительно влияет на эффективную вязкость и реологию буровых растворов. При этом показано, что вязкость зависит от размера и материала наночастиц. Такое поведение не свойственно классическим суспензиям и является отличительной характеристикой наносуспензий.

В разделе 3.5 приведены экспериментальные данные температурной зависимости вязкости, реологии и микрореологии буровых растворов на водной основе, модифицированных наночастицами. Измерения вязкости проведены в диапазоне температур от 25 до 80 °С.

Анализ температурной зависимости показал, что с увеличением температуры, несмотря на то, что вязкость дисперсионной среды снижается, вязкость глинистых суспензий значительно возрастает. Это связано с уменьшением толщины сольватной оболочки гидратированных частиц бентонита, что облегчает их коагуляцию и флокуляцию и ведет к повышению эффективной вязкости. Установлено, что повышение температуры с 25 до 80 градусов приводит к повышению эффективной вязкости глинистой суспензии более чем в 10 раз. У модифицированных наночастицами глинистых растворов с увеличением температуры вязкость также повышается, однако не столь существенно, как для базовой глинистой суспензии. Так, для бурового раствора с 3 мас.% 10 нм частиц SiO_2 при повышении температуры с 25 до 80 градусов эффективная вязкость увеличивается в 2.5 раза (см. рисунок 5).

Далее было исследовано влияние размера наночастиц (2 мас.%) на термическую стабильность вязкости буровых растворов. Размер частиц варьировался от 43 до 150 нм. Показано, что с уменьшением размера наночастиц эффективная вязкость буровых растворов возрастает при всех рассмотренных температурах. Также показано, что с уменьшением размера

наночастиц действие температуры на вязкость глинистой суспензии возрастает (см. рисунок 6). Так, при повышении температуры до 55°C вязкость раствора с частицами Al_2O_3 150 нм возрастает в 1.4 раза, а с размером 50 нм – в 1.7 раза.

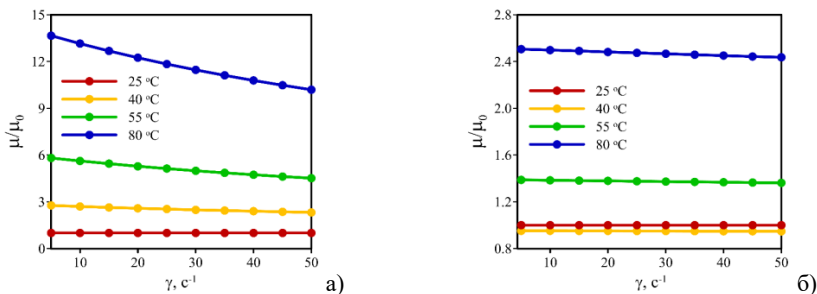


Рисунок 5 – Зависимость относительной вязкости бурового раствора (отнесенная к вязкости раствора при комнатной температуре) от скорости сдвига при различных температурах без добавки наночастиц (а) и с добавкой 3 мас. % 10 нм частиц SiO_2 (б)

При анализе влияния частиц различного материала показано, что при одинаковой концентрации и близком размере частиц добавка Al_2O_3 оказывает значительно большее влияние на рост вязкости бурового раствора. Это видно при анализе изменения вязкости буровых растворов с наночастицами в сравнении с базовым раствором (см. рисунок 7). Таким образом, показано, что наночастицы делают реологические свойства глинистых буровых растворов более стабильными в зависимости от температуры.

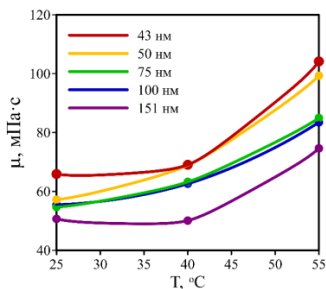


Рисунок 6 – Влияние размера наночастиц Al_2O_3 на вязкость глинистого бурового раствора при различной температуре и скорости сдвига 170 1/с.

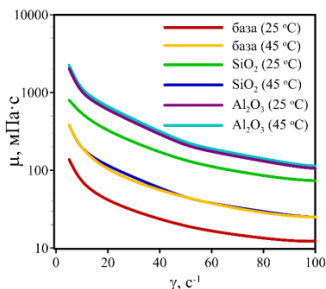


Рисунок 7 – Влияние материала наночастиц размером около 40 нм на вязкость глинистого бурового раствора при различных температурах

Далее было проанализировано влияние наночастиц на микрореологию буровых растворов. Rheolaser MASTER™ позволяет рассчитывать параметры, качественно характеризующие микрореологию образца. Например, индекс упругости EI, который пропорционален модулю упругости G (см. рисунок 8).

Показано, что с увеличением концентрации наночастиц индекс упругости раствора увеличивается почти на порядок. Это соответствует данным по увеличению предельного напряжения сдвига, полученным на ротационном вискозиметре. Следующий параметр - соотношение «твёрдое-жидкое» SLB, которое пропорционально вязкоупругим свойствам образца и дает возможность наблюдать за изменением образца со временем (см. рисунок 9). Глинистая суспензия без наночастиц приобретает упругие свойства, соответствующие началу образования структуры, через 90 секунд. Добавление всего 0.25 мас.% наночастиц Al_2O_3 уменьшает время перехода к упругим свойствам до 50 секунд. При высоких концентрациях наночастиц растворы приобретают упругие свойства практически сразу после перемешивания.

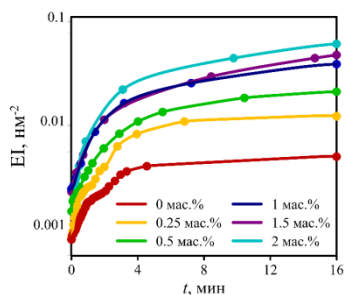


Рисунок 8 – Индекс упругости EI для раствора с различным содержанием Al_2O_3 (43нм) при температуре 30° С.

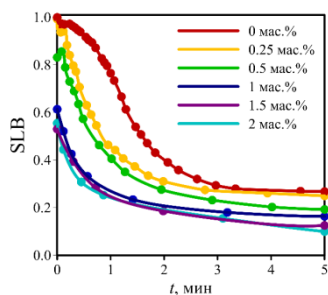


Рисунок 9 – Соотношение твёрдое-жидкое SLB для раствора с различным содержанием Al_2O_3 (43нм) при 30° С

Далее были исследованы микрореологические характеристики растворов с наночастицами при различной температуре (см. рисунок 10). Было показано, что с увеличением температуры значительно сокращается время, за которое частицы раствора образуют гелевую структуру.

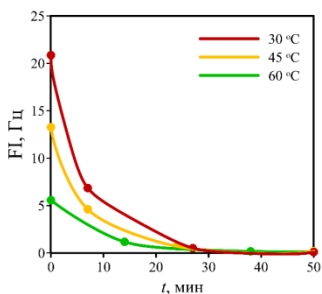


Рисунок 10 – Индекс текучести для бурового раствора с 2 мас. % SiO_2 (40нм) при различных температурах.

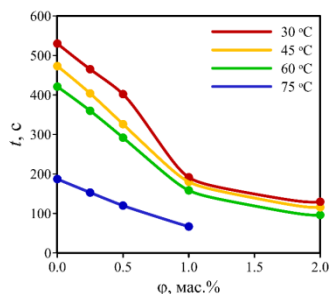


Рисунок 11 – Время гелеобразования БР в зависимости от концентрации SiO_2 (40нм) при различных температурах.

При высоких температурах химически активные частицы глины и наночастицы более интенсивно флокулируют и образуют гель, что вызывает повышение вязкости раствора и его более быстрое загустевание. В результате было показано, что с увеличением концентрации наночастиц в буровом растворе в разы сокращается время образования гелевой структуры (см. рисунок 11). При высоких концентрациях наночастиц влияние температуры на время гелеобразования уменьшается.

В Четвертой главе изложены результаты систематического экспериментального исследования влияния наночастиц на фильтрационные свойства буровых растворов на водной основе. Проанализирована зависимость фильтрационных характеристик от концентрации и размера нано- и микрочастиц, а также от проницаемости керна.

В процессе бурения нефтегазовых скважин буровой раствор может уходить в породу через стенки скважины. Это явление называют фильтрационными потерями. Для ликвидации этих явлений, как правило, используют дисперсные ($1 \div 100$ мкм) наполнители, которые проникают в породу и закупоривают ее. Однако использование микрочастиц оказывается не эффективным в породах с низкой проницаемостью, где размеры пор $0.1 \div 1$ мкм. Поэтому исследования, в которых в качестве понизителей фильтрации используются наноразмерные частицы, являются очень актуальными в вопросах бурения низкопроницаемых и слабоустойчивых пород.

Вначале было исследовано влияние концентрации наночастиц оксида кремния на фильтрационные свойства буровых растворов с добавкой микрочастиц AlN размером 1 мкм. Максимальное снижение фильтрационных потерь в 1.7 раз наблюдается для массовой концентрации наночастиц 1%. Дальнейшее увеличение содержания нанодисперсных добавок в промысловой жидкости ведет к увеличению фильтрационных потерь, но, тем не менее, даже при максимальной концентрации наночастиц 4 мас.% буровой раствор теряет на 40% меньше фильтрата в сравнении с базовой суспензией (см. рисунок 12).

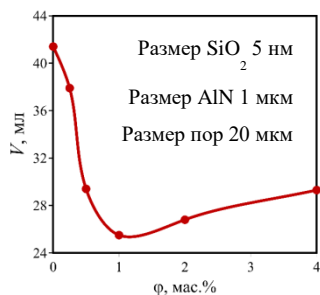


Рисунок 12 – Зависимость фильтрационных потерь бурового раствора от концентрации частиц SiO₂.

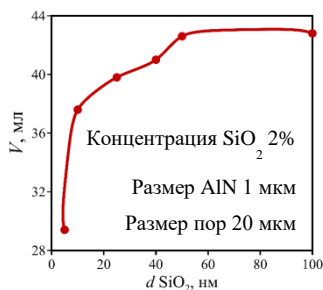


Рисунок 13 – Зависимость фильтрационных потерь БР от среднего размера наночастиц SiO₂.

Установлено, что с уменьшением размера наночастиц фильтрационные потери бурового раствора также монотонно снижаются (см. рисунок 13). При этом видно, что частицы размером крупнее 50 нм не оказывают заметного влияния на фильтрацию раствора. Данные электронной микроскопии показывают, что при таком большом размере наночастицы не могут проникать в поры между частицами глины. При этом добавка наночастиц сказывается на структуре и толщине образующейся на поверхности фильтра корки (см. рисунок 14). Для раствора без нанодобавок на поверхности фильтра остается рыхлая глинистая масса толщиной около 1 см. Добавление наночастиц приводит к образованию довольно плотной и однородной корки толщиной 2-3 мм. Адгезия корки к фильтру очень высокая.

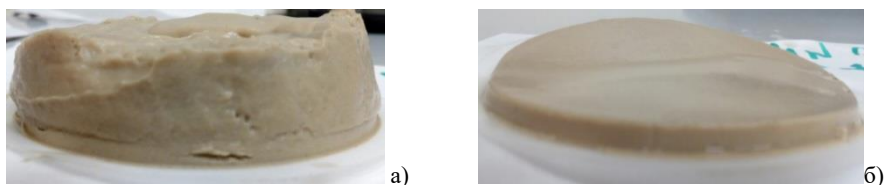


Рисунок 14 – Фотографии фильтрационных корок для базового раствора (а) и раствора с наночастицами (б).

Данные ПЭМ показывают, что в случае отсутствия наночастиц глинистая корка на поверхности фильтра образована чешуйками глины. Добавка микрочастиц, которые неизбежно присутствуют в любом буровом растворе, делают эту корку рыхлой. Микрочастицы укладываются между пластинок глины, делая корку более проницаемой. Наночастицы заполняют поры между чешуйками глины и микрочастицами, уменьшая тем самым проницаемость фильтрационных корок. При 5000 - кратном увеличении видно, что наночастицы образуют скопления, которые закрывают поры между частицами глины и микрочастицами AlN (см. рисунок 15).

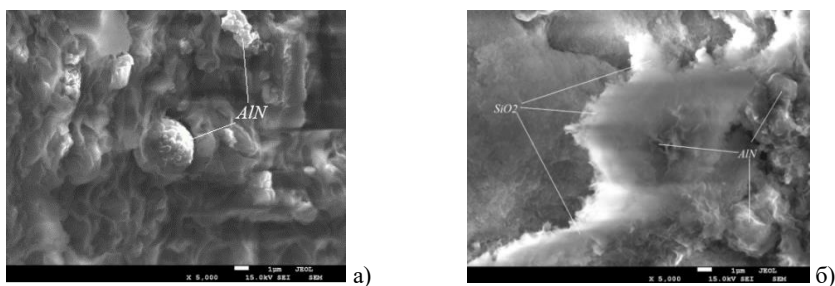


Рисунок 15 – ПЭМ - изображение фильтрационной корки бурового раствора с добавкой 2% микрочастиц AlN размером 1 мкм без добавления наночастиц (а) и с добавлением наночастиц SiO₂ (б) при увеличении в 5000 раз

Впервые установлено, что действие наночастиц на фильтрационные потери буровых растворов зависит от соотношения концентрации микрочастиц и размеров пор фильтра. Для этого была проведена серия измерений на керамических фильтрах размером пор от 3 до 35 мкм при различной концентрации микрочастиц AlN размером 1 мкм. С увеличением размера пор фильтра закономерно возрастают фильтрационные потери как для стандартного, так и для модифицированного наночастицами растворов. При этом при малой концентрации микрочастиц (см. рисунок 16 (а)) добавка наночастиц приводит к снижению фильтрационных потерь только для фильтров с размерами пор меньших 20 мкм. С увеличением концентрации микрочастиц размер пор фильтра, при котором добавка наночастиц уменьшает потери раствора, увеличивается. Так, при концентрации микрочастиц 2 мас.% добавка 2 мас.% наночастиц приводит к снижению объема фильтрата для всех рассмотренных размеров пор (см. рисунок 16 (б)). Особенно эффективно наночастицы работают для плохо проницаемых кернов с размерами пор меньше 10 мкм. Здесь было получено практически трехкратное уменьшение скорости фильтрации по сравнению с базовым раствором. На поверхности таких фильтров образуется плотная корка толщиной 1-2 мм. С увеличением размера пор эффективность нанодобавки снижается. Таким образом, впервые было установлено, что действие наночастиц на фильтрационные потери буровых растворов зависит от соотношения концентрации микрочастиц и размеров пор фильтра. Чем более крупные поры, тем при более высоких концентрациях микрочастиц начинает эффективно работать нанодобавка.

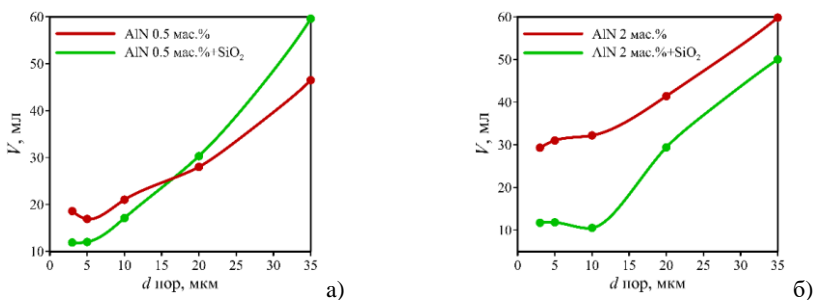


Рисунок 16 – Зависимость фильтрационных потерь от размера пор керамических фильтров. При концентрациях микрочастиц размером 1 мкм 0.5 мас.% (а) и 2 мас.% (б) с добавлением 2 мас.% наночастиц SiO₂ размером 5 нм.

Анализируя все полученные факты, можно утверждать, что для буровых растворов, в которых присутствуют микрочастицы (глина, микрокольмантанты), основной механизм снижения фильтрационных потерь при добавке наночастиц связан в основном со снижением проницаемости фильтрационной корки, вызванным заполнением пор между микрочастицами

наночастицами. Показано, что добавка наночастиц приводит к снижению объема фильтрата независимо от отношения размеров микрочастиц к размерам пор фильтра. Таким образом, добавка в раствор наночастиц позволит существенно облегчить работу по подбору фракционного состава кольматантов, поскольку нанодобавки уменьшают зависимость объема фильтрата от соотношения размеров частиц кольматанта и размера пор керна.

В **Пятой главе** получены и изложены результаты расчетно-экспериментальных исследований течений буровых растворов в скважине с различным углом наклона, а также результаты исследования влияния нанодобавок на эффективность выноса шлама полученными растворами.

В расчётном исследовании рассмотрены наночастицы Al_2O_3 , SiO_2 и TiO_2 плотностью 3950 кг/м^3 , 2650 кг/м^3 и 4230 кг/м^3 соответственно. Частицы были стабильны и химически инертны. Концентрацию частиц в растворе варьировали от 0.25 до 2 мас.%, размер частиц от 5 до 50 нм. Для моделирования были рассмотрены стандартные параметры нефтегазовой скважины ($D_1=0.08895 \text{ м}$, $D_2=0.1463 \text{ м}$). Плотность бурового раствора была равна 1050 кг/м^3 . Реология буровых растворов задавалась из полученных ранее экспериментальных данных. В качестве частиц шлама рассмотрены сферические частицы размером 3 мкм плотностью 2600 кг/м^3 . Концентрация шлама на входе в канал задавалась равной 3 об.%, профиль концентрации задавался однородным. Скорость частиц шлама и скорость бурового раствора на входе в скважину были равны. Длина расчетной области кольцевого канала задавалась равной 10 м. Этой длины было достаточно для установления течения и концентрации шлама по длине канала.

При моделировании течения бурового раствора в вертикальной скважине скорость вращения бурильной трубы задавалась 60 об/мин, расход бурового раствора $G=11.61 \text{ кг/с}$. Для расчета течений раствора в процессе бурения наклонно-направленных скважин скорость вращения бурильной трубы варьировалась от 120 до 480 об/мин, расход бурового раствора от 10 до 40 кг/с. Для численного моделирования использовалась расчетная сетка, состоящая из $40 \times 140 \times 120$ (40 по радиусу, 140 по окружности и 120 по длине канала) расчетных узлов. Угол наклона скважины к горизонту варьировался от 0 до 90 градусов. Рассматривалось турбулентное течение. Для моделирования турбулентности использовалась двухпараметрическая $k-\omega$ SST модель.

В **разделе 5.1** приведена математическая модель, используемая при расчетах течения бурового раствора с наночастицами в скважине. В работе рассматривалось изотермическое, полностью развитое течение несжимаемой жидкости с постоянной плотностью. Для изучения поведения шлама и бурового раствора в затрубном пространстве использовалась модель двухфазного потока Эйлера для гранулированной среды. Предполагается, что поток бурового раствора состоит из твердой «s» (частицы шлама) и жидкой «f» (модифицированный наночастицами буровой раствор) фаз, которые являются отдельными друг от друга, но образуют взаимопроникающие континуумы:

$\alpha_f + \alpha_s = 1$, где α_f и α_s – объемные концентрации жидкой и твердой фаз соответственно. Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla P_f - P_s + \nabla \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + \sum_{s=1}^n (K_{fs} (\vec{v}_f - \vec{v}_s) + m_{fs} \vec{v}_{fs} - m_{sf} \vec{v}_{sf}) + (\vec{F}_s + \vec{F}_{lift,s} + \vec{F}_{vm,s} + \vec{F}_{td,s})$$

где ρ_s – плотность твердой фазы, P_s – давление твёрдых частиц, P_f – давление жидкости, K_{fs} – коэффициент обмена импульсом между жидкой фазой f и твердой фазой s , $K_{fs} (\vec{v}_f - \vec{v}_s)$ – межфазная сила, действующая на единицу объема, \vec{F}_s – сила сопротивления, $\vec{F}_{lift,s}$ – подъемная сила, $\vec{F}_{vm,s}$ – сила добавленной массы, $\vec{F}_{td,s}$ – сила турбулентной дисперсии.

После успешного тестирования описанной расчетной методики было промоделировано течение бурового раствора, модифицированного наночастицами, в вертикальной скважине (**раздел 5.3.1**). Было показано, что добавка наночастиц в буровой раствор существенно сказывается на качестве промывки скважины от шлама. Увеличение эффективности выноса шлама при добавке наночастиц при заданном расходе бурового раствора обусловлено в основном уширением формы профиля скорости в канале (см. рисунок 17). Это уширение связано с уменьшением показателя нелинейности n при увеличении концентрации частиц и уменьшении размера наночастиц. Реологией также объясняется и влияние материала наночастиц эффективность выноса шлама.

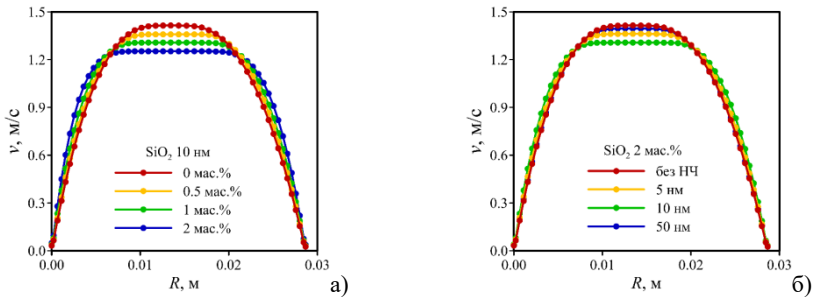


Рисунок 17 – Профили осевой компоненты скорости в зависимости от концентрации (а) и размера (б) наночастиц оксида кремния.

На рисунке 18 показаны установившиеся профили концентрации и скорости проскальзывания частиц шлама в кольцевом канале. Шлам хорошо транспортируется по центру канала, где профиль скорости плоский. Скорость проскальзывания частиц имеет максимумы у стенок скважины. Из-за этого концентрация частиц максимальна вблизи внешней стенки канала, где она увеличивается на 6-7% за счет центробежной силы, действующей на частицы.

Анализ результатов моделирования показывает, что нанодобавка приводит к значительному снижению скорости проскальзывания как в ядре потока, так и в области пограничных слоев. С увеличением концентрации наночастиц этот эффект усиливается. Кроме концентрации наночастиц существенное влияние на скорость проскальзывания оказывает размер наночастиц: с уменьшением размера происходит уменьшение скорости проскальзывания частиц шлама по всему сечению канала (см. рисунок 18).

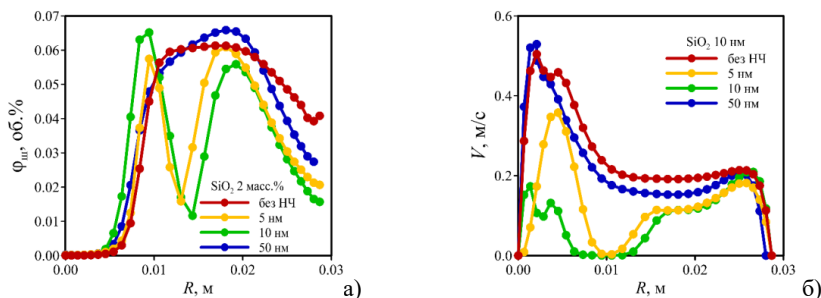


Рисунок 18 – Профили концентрации частиц шлама (а) и скорости проскальзывания (б) в кольцевом пространстве в зависимости от размеров наночастиц $\text{SiO}_2, 2 \text{ масс.}\%$.

Далее в **разделе 5.3.2** приведено моделирование течения базового бурового раствора и изучено влияние параметров промывки скважины на эффективность выноса шлама в наклонной и горизонтальной скважинах. В качестве базового использовался буровой раствор со следующими реологическими характеристиками: $n = 0.72, K = 0.038 \text{ Па}\cdot\text{с}^n, \tau_0 = 0.34 \text{ Па}$. Было показано, что процессы выноса шлама в горизонтальных скважинах существенно отличаются от вертикальных. В вертикальных скважинах транспорт частиц преимущественно осуществляется в режиме гомогенной суспензии, в горизонтальных – в виде гранулированного слоя (см. рисунок 19).

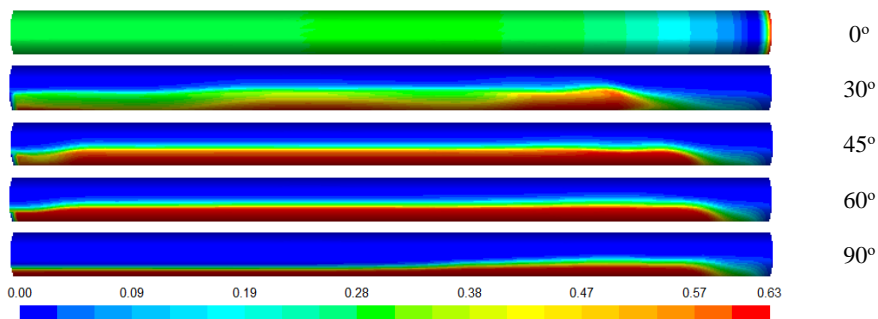


Рисунок 19 – Объемная концентрация частиц шлама на стенках скважины при различных значениях угла наклона скважины от вертикали.

Установлено, что угол наклона скважины оказывается наиболее существенным фактором, влияющим на эффективность промывки. С ростом угла наклона концентрация шлама у нижней стенки скважины увеличивается и при угле наклона около 45 градусов достигает плотной упаковки. Для горизонтальной скважины большая часть частиц шлама осаждается в плотноупакованный слой, который движется со средней скоростью примерно 0.2 м/с, при средней скорости потока около 1 м/с. Эффективность выноса шлама при переходе от вертикального к горизонтальному участку падает более чем в три раза. Процесс движения шлама при углах наклона больше 45° является существенно нестационарным.

В разделе 5.3.3 проведено исследование влияния нанодобавок на эффективность выноса шлама из горизонтальной скважины и показано существенное улучшение промывки наклонно-направленных скважин.

Вначале исследовано влияние концентрации наночастиц SiO₂ со средним размером 10 нм на эффективность очистки. Показано, что добавка наночастиц приводит к более однородному распределению концентрации частиц шлама (см. рисунок 20). Увеличивается толщина слоя отложений, но при этом концентрация шлама в слое с увеличением концентрации нанодобавок уменьшается. Также нанодобавка приводит к значительному снижению скорости проскальзывания как в области гранулированного слоя, так и в областях, занятых концентрированной и разбавленной суспензией. С увеличением концентрации наночастиц этот эффект усиливается.

В качестве количественного параметра, определяющего эффективность выноса шлама, рассмотрена величина СТР (cutting transport performance), которая определялась как отношение средней по объему скважины вертикальной скорости частиц шлама к средней по объему скважины вертикальной скорости бурового раствора. При этом СТР=1 означает, что шлам в среднем движется со скоростью бурового раствора, и эффективность очистки скважины максимальна.

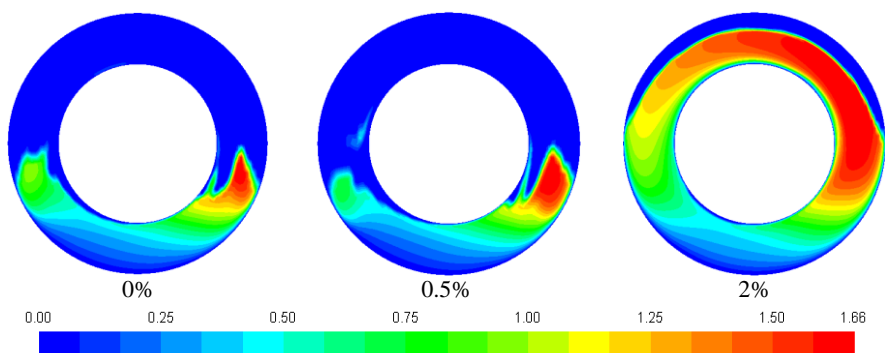


Рисунок 20 – Осевая скорость частиц шлама на выходе из горизонтальной скважины при различных концентрациях наночастиц SiO₂ размером 10 нм.

Установлено, что для горизонтальных скважин 2 мас.% концентрация наночастиц SiO_2 в буровом растворе приводит к повышению эффективности выноса шлама в 2.7 раз, в то время как для вертикальных скважин это повышение составляет всего 10-15%. Кроме того, данные моделирования показывают, что нанодобавка делает процесс выноса шлама менее чувствительным к углу наклона скважины. Так, для базового бурового раствора переход от вертикальной к горизонтальной скважине снижает эффективность очистки практически в три раза, а для модифицированного наночастицами (2 мас.%) раствора снижение составляет 22% (см. рисунок 21).

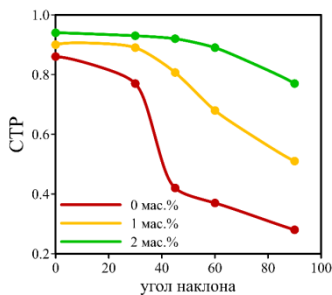


Рисунок 21 – Зависимость среднего по времени коэффициента эффективности выноса шлама от угла наклона скважины для различных концентраций наночастиц.

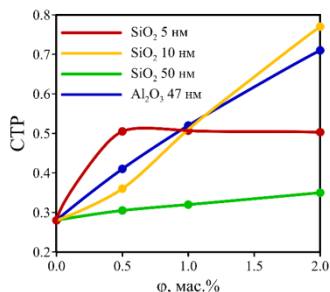


Рисунок 22 – Зависимость среднего по времени коэффициента эффективности выноса шлама от концентрации наночастиц различного материала и размера.

На рисунке 22 приведены данные по влиянию размера и материала наночастиц на эффективность промывки. Показано, что с уменьшением размера наночастиц в общем случае происходит уменьшение скорости проскальзывания частиц шлама по всему сечению канала и, соответственно, повышается эффективность выноса частиц шлама. Причиной такого влияния является изменение реологии бурового раствора. Было показано, что при прочих равных условиях использование наночастиц оксида алюминия более существенно сказывается на транспорте шлама в горизонтальных скважинах. Таким образом, было установлено, что добавка наночастиц в буровой раствор будет наиболее эффективна для горизонтально-направленных скважин.

В Заключение сформулированы основные результаты работы.

1. Проведено экспериментальное исследование влияния добавок наночастиц на коэффициенты вязкости и реологические свойства буровых растворов на водной основе. Показано, что даже малые добавки наночастиц значительно улучшают реологические характеристики буровых растворов, а влияние добавки зависит не только от концентрации, но и от размеров и материала наночастиц. При этом добавка наночастиц изменяет не только вязкие, но и упругие свойства буровых растворов и делает эти характеристики более стабильными в зависимости от температуры

2. Проведено экспериментальное исследование влияния добавок наночастиц на фильтрацию буровых растворов на водной основе. Установлено, что добавки наночастиц значительно снижают фильтрационные потери буровых растворов. С помощью электронной микроскопии высокого разрешения впервые было показано, что основной причиной снижения фильтрационных потерь буровых растворов при добавке наночастиц является снижение проницаемости фильтрационной корки, вызванное заполнением пор в фильтрационной корке наночастицами.

3. Разработана и протестирована методика численного моделирования многофазных течений буровых растворов с добавками наночастиц в скважинах. Методика моделирования основана на использовании эйлеровой модели гранулированных сред и экспериментально измеренных реологических характеристик модифицированных наночастицами буровых растворов. Тестирование методики показало хорошее согласие с результатами известных экспериментов по течениям гранулированных сред.

4. Проведено расчетное исследование влияния нанодобавок на характеристики течения модифицированных буровых растворов и эффективность выноса ими шлама. Показано, что добавка наночастиц в буровой раствор приводит к существенному улучшению транспорта шлама. С уменьшением размера наночастиц и увеличением угла наклона скважины положительный эффект от добавки усиливается. Установлено, что добавка наночастиц приводит к значительному изменению формы профилей скорости и концентрации частиц в скважине. Это обусловлено изменениями в реологии раствора при добавлении в него наночастиц.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы

Логичным и обоснованным продолжением данной работы будут исследования по влиянию добавок наночастиц на свойства буровых растворов на углеводородной основе. Которые, по сути, представляют собой эмульсии углеводородной и водной фазы, с большим количеством различных добавок (эмульгаторы, ПАВ, частицы). В качестве дисперсионной среды в этих буровых растворах используются минеральное масло, дизельное топливо, нефть. Их основное достоинство – минимальное воздействие на пласт в процессе бурения. Однако растворы на углеводородной основе имеют и существенные недостатки: негативное воздействие на окружающую среду из-за применения токсичных компонентов, низкую термостойкость (до 90°C), невысокие структурообразующие свойства. Поэтому совершенствование свойств буровых растворов на углеводородной основе с помощью наночастиц также представляется актуальной задачей.

Кроме того, перспективным направлением развития научной проблематики, поднятой в рамках данной диссертационной работы, представляется использование углеродных нанотрубок для совершенствования свойств буровых растворов на водной и углеводородной основах. Углеродные трубки благодаря своему непревзойденному аспектному соотношению

являются уникальным наноматериалом. Влияние добавок углеродных нанотрубок на реологию наносuspензий является значительно более существенным по сравнению со сферическими наночастицами, изученными в данной работе. Это делает их применение для совершенствования буровых растворов очень привлекательным.

Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Minakov A.V., Pryazhnikov M.I., Mikhienkova E.I., Voronenkova Y.O. Systematic experimental study of the temperature dependence of viscosity and rheological behavior of water-based drilling fluids with nano-additives [Electronic resource] // *Petroleum*. – 2022. – <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2022.03.001>;
2. Minakov A.V., Mikhienkova E.I., Neverov A.L., Rudyak V.Y. Comprehensive numerical study of the effect of nanoparticle additives on the cutting transport performance in horizontal boreholes // *Journal of Computational Design and Engineering*. – 2021. – V. 8, I. 1. – P. 283–297;
3. Pryazhnikov, M.I., Mikhienkova E.I., Minakov A.V., Litvinenko V. Rheological and microrheological study of microsuspension with nanodiamonds // *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources*. – 2019. – V. 2 – P. 883–887;
4. Минаков А.В., Михиенкова Е.И., Неверов А.Л., Матвеев А.В. Экспериментальное исследование антифрикционных свойств буровых растворов с наночастицами // *Трение и износ*. 2019. – Т. 40, № 5. – С. 545–552;
5. Minakov A.V., Mikhienkova E.I., Voronenkova Y.O., Neverov A.L., Zeer G.M., Zharkov S.M. Systematic experimental investigation of filtration losses of drilling fluids containing silicon oxide nanoparticles // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2019. – V. 71. – P. 102984;
6. Minakov A.V., Zhigarev V.A., Mikhienkova E.I., Neverov A.L., Buryukin F.A., Guzei D.V. The effect of nanoparticles additives in the drilling fluid on pressure loss and cutting transport efficiency in the vertical boreholes // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2018. – V. 171. – P. 1149–1158;
7. Минаков А.В., Михиенкова Е.И., Неверов А.Л., Бурюкин Ф.А. Экспериментальное исследование влияния добавки наночастиц на реологические свойства суспензии // *Письма в журнал технической физики*. – 2018. – Т. 44, №9. – С. 3–11;
8. Минаков А.В., Михиенкова Е.И., Жигарев В.А., Неверов А.Л. Экспериментальное исследование влияния добавки наночастиц на фильтрационные свойства микросуспензии // *Письма в журнал технической физики*. – 2018. – Т. 44, №12. – С. 62–67;
9. Минаков А.В., Михиенкова Е.И., Жигарев В.А., Неверов А.Л., Рудяк В.Я. Исследование влияния добавки наночастиц на свойства буровых растворов // *Коллоидный журнал*. – 2018. – Т. 80, № 4. – С. 435–444.
10. Mikhienkova E.I., Minakov A.V., Matveev A.V., Pryazhnikov, M.I. Experimental study of temperature dependence of drilling fluids viscosity with nanoparticle // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – V. 1359. – P. 012110;

11. Pryazhnikov M.I., Mikhienkova E.I., Minakov A.V., Rudyak V.Y. Investigation of temperature dependence of drilling mud viscosity with silica nanoparticles addition // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – V. 1385, I. 1. – P. 12038;
12. Mikhienkova E.I., Minakov A.V., Neverov A.V. The effect of nanoparticles addition on the properties of polymer weighted drilling fluid // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – V. 272. – P. 022208;
13. Mikhienkova E.I., Minakov A.V., Zhigarev V.A. The effect of nanoparticles additives on filtration properties of drilling muds with microparticles // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – P. 012127;
14. Zhigarev V.A., Minakov A.V., Guzei D.V., Mikhienkova E.I. The effect of the nanoparticles addition on the pressure drop in the annular channel // *Journal of Physics: Conference Series*. – 1105. – 2018. – P. 012077;
15. Mikhienkova E.I., Neverov A.L., Matveev A.V., Zhigarev V.A., Kudryavcev I.V. Investigation of the additive effect of nanoparticles on the hydrodynamic characteristics of drilling fluids // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – V. 899. – P. 17426588.

В других научных изданиях:

1. Минаков А.В., Лобасов А.С., Михиенкова Е.И., Рудяк В.Я. Результаты экспериментальных исследований влияния добавок наночастиц на свойства буровых растворов // *Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии*. – 2018. – С. 55–59;
2. Михиенкова, Е.И. Исследование особенностей фильтрации буровых растворов с добавками наночастиц // *Проблемы геологии и освоения недр*. – 2018. – №2. – С. 509–510;
3. Жигарев В.А., Минаков А.В., Михиенкова Е.И. Расчетно-экспериментальное исследование использования наночастиц для улучшения свойств бурового раствора // *Проблемы геологии и освоения недр* – 2018. – №2. – С. 499–501;
4. Минаков А.В., Неверов А.Л., Михиенкова Е.И., Жигарев В.А. Управление свойствами буровых растворов на водной основе с помощью добавок наночастиц // *Бурение скважин в осложненных условиях*. – 2018. – С. 76–77;
5. Михиенкова Е.И., Минаков А.В., Жигарев В.А., Черепова А.В. Исследование влияния добавки наночастиц на реологию буровых растворов // *Технологии будущего нефтегазодобывающих регионов*. – 2018. – С. 129–133;
6. Камаев И.В., Финк Т.А., Головашкин А.В., Яровенко О.И., Ахмадишин Ф.Ф., Евдокимов Д.В., Удяшева Н.М., Кокуйкин А.М., Заворотный В.Л., Минаков А.В., Михиенкова Е.И. Буровые растворы: оптимизация составов, совершенствование сервиса // *Нефть. Газ. Новации*. – №6 (234). – 2020.