

**ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**  
на диссертацию Лысаковой Евгении Игоревны  
**«ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НАНОЧАСТИЦ НА ТЕЧЕНИЯ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ»**  
по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация Лысаковой Евгении Игоревны посвящена экспериментальному исследованию реологических свойств буровых растворов, содержащих небольшие добавки оксидов алюминия и кремния нанометровых размеров, и математическому моделированию течений этих растворов, реализуемых в технологии бурения нефтяных скважин.

Изучение свойств буровых растворов и их течений в различных технологических элементах является источником большого числа задач в современной физико-химической гидродинамике. В литературе отмечается, что буровые растворы проявляют неньютоновский характер поведения, при этом небольшие добавки наночастиц приводят к существенным изменениям механических и фильтрационных свойств, и как следствие влияют на технологические параметры бурения. В этой связи исследования реологических свойств буровых растворов, модифицированных наночастицами, и режимов их течения являются важной фундаментальной задачей, имеющей прикладное значение в нефтегазовой, строительной и других индустриях.

В настоящее время развитие технологии бурения связано с вопросами оптимизации экономических затрат и снижением экологических последствий на окружающую среду. Эффективная организация процесса бурения требует детального исследования влияния состава на реологию растворов и особенности технологических процессов, таких как охлаждение и смазка рабочего инструмента, удаление шлама, кольматация проницаемых пород и т.п. Следует также отметить, что проведенные исследования соответствуют направлению Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации в рамках перехода к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии.

Таким образом, тема диссертационной работы Лысаковой Евгении Игоревны, посвященная экспериментально-теоретическому исследованию течений буровых растворов, является **актуальной** как с **практической**, так и с **фундаментальной** точки зрения.

**Степень разработанности темы исследования.** Одно из направлений развития технологии бурения связано с разработкой растворов с требуемыми механическими, химическими и физическими свойствами. Показано, что добавки наночастиц могут достаточно сильно влиять на вязкие и фильтрационные свойства жидких сред. Литературный обзор по теме диссертации демонстрирует наличие ряда противоречий и отсутствие фундаментальных работ, объясняющих механизмы и природу влияние наноразмерных добавок на вязкие свойства буровых растворов.

На основе анализа современного состояния проблемы исследования автор диссертации выбрал направление, связанное с систематическим экспериментальным исследованием влияния добавок наночастиц на механические свойства буровых растворов и математическим моделированием их течений в скважинах, имеющих различную ориентацию относительно силы тяжести.

**Диссертационная работа** Лысаковой Евгении Игоревны изложена на 148 страницах машинописного текста, содержит 86 рисунков, 5 таблиц, и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 134 наименований.

Во **введении** автор обосновывает актуальность работы, формулирует цель и задачи исследования, обсуждает степень разработанности темы исследования, приводит результаты, свидетельствующие о научной новизне и практической значимости работы, излагает основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** описан круг проблем, возникающих в процессе бурения, а также представлен обзор исследований по влиянию наноразмерных добавок на реологические и фильтрационные свойства растворов. Рассмотрены рецептуры буровых растворов на водной и углеводородной основе, которые применяются сегодня при бурении скважин.

Во **второй главе** приведено описание экспериментального оборудования, а также составов и методик приготовления модельных жидкостей. Неньютоновские свойства образцов определялись с использованием, как ротационных вискозиметров, так и с помощью прибора, позволяющего исследовать микрореологию, что особенно важно в случае наличие в жидких средах диспергированных твердых частиц различных размерных масштабов.

**Третья глава** посвящена описанию экспериментальных исследований вязких характеристик модельных буровых растворов, модифицированных наночастицами, и формулировке математических законов реологического поведения с использованием моделей степенной и вязкопластичной жидкостей. Исследовано влияние концентрации, размера и компонентного состава нанодобавок и базового раствора и температуры.

В **четвертой главе** представлены исследования фильтрационных свойств буровых растворов. Проиллюстрирована модель формирования фильтрационной корки и влияние наночастиц на основные технологические параметры.

В **пятой главе** формулируется математическая постановка задачи о течении бурового раствора в вертикальной, наклонной и горизонтальной скважинах с учетом процесса выноса шлама. Иллюстрируются результаты численного моделирования поставленной задачи, полученные с использованием коммерческого пакета прикладных программ. Представлены результаты тестирование адекватности математической модели путем сравнения с экспериментальными и численными результатами других исследователей.

После каждой главы формулируются основные выводы. В **заключении** диссертации сформулированы основные результаты диссертационной работы, указаны перспективы дальнейших исследований.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Защищаемые научные

положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, вытекают из проведенных экспериментальных и теоретических исследований. Достоверность экспериментальных результатов обеспечена применением комплекса современного измерительного оборудования, общепринятых методов и подходов, анализом и сопоставлением выявленных закономерностей с литературными данными. Достоверность результатов численного моделирования течений буровых растворов, реализуемых в технологии, обеспечена строгой математической постановкой задачи с применением обоснованной модели двухфазного потока для гранулированной среды, использованием сертифицированного программного обеспечения и сравнением полученных решений с известными аналогами. Полученные результаты не противоречат известным физическим закономерностям и фактам.

**Научная новизна** исследования заключается в следующем:

- на основе систематических экспериментальных исследований получены новые данные о реологии и фильтрационных свойствах буровых растворов, модифицированных наноразмерными частицами, с учетом влияния химического состава, концентрации и размера частиц, температуры и состава базового раствора;
- проведенные численные исследования позволили детально изучить характерные особенности процесса выноса шлама из скважины и оценить влияние геометрических факторов на структуру потока бурового состава и качества выноса шлама из зоны рабочего инструмента.

**Практическая значимость** диссертационного исследования заключается в том, полученные результаты образуют основу, позволяющую технологам разрабатывать буровые растворы с требуемыми реологическими характеристиками и функциональными свойствами. При этом не требуется принципиально менять рецептуру раствора, достаточно лишь добавить небольшое количество наноразмерных частиц.

**Содержание автореферата** полностью отражает содержание диссертации, а сам автореферат отвечает всем предъявляемым требованиям.

Основные положения диссертации апробированы на всероссийских и международных конференциях, связанных как с общими разделами механики (например, Теплофизика и физическая гидродинамика), так и вопросами нефтяной индустрии. По результатам исследований опубликованы 15 работ, включенных в Перечень ВАК, в том числе 11 научных статей, индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science.

**Замечания к диссертационной работе**

1. В работе содержится достаточно большое количество графиков с результатами экспериментальных измерений различных характеристик буровых растворов, при этом ни на одном из них не приведен доверительный интервал.

2. Проведенные экспериментальные исследования демонстрируют существенное изменение реологических характеристик растворов при добавлении в них наноразмерных частиц, однако практически не уделяется внимание механизмам выявленных закономерностей. Стоило сформулировать хотя бы гипотезы, особенно с учетом того, что ключевую роль играет не только размер, но химический состав добавок.

3. Вопросу построения расчетной сетки не уделено достаточно внимания. В частности, отсутствует описание тестов на аппроксимационную сходимость. Не ясно из каких соображений выбирается пространственные шаги, почему для расчета в вертикальных и наклонных скважинах используются разные сетки?

4. Результаты расчетов, иллюстрирующих вынос шлама (например, рисунки 5.8, 5.9) показывают, что добавление нанометровых частиц приводит к качественному изменению процесса (формирования области пониженной концентрации шлама в середине зазора, отрицательная скорость проскальзывания). Такое поведение неочевидно и требует объяснения.

5. В работе присутствуют ряд не очень удачных выражений и словосочетаний, например «понизители фильтрации», «улучшена вязкость».

### **Заключение**

Указанные замечания не изменяют общей положительной оценки диссертации Лысаковой Евгении Игоревны «Влияние добавок наночастиц на течения буровых растворов», которая является законченной научно-квалификационной работой, содержит решение задачи, имеющей большое практическое значение для науки и техники, и полностью соответствует требованиям действующего Положения ВАК о порядке присуждения учёной степени кандидата наук, учёной степени доктора наук, а ее автор, Лысакова Евгения Игоревна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 - Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент:

профессор кафедры прикладной газовой динамики и горения  
Федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский  
государственный университет»  
(634050, г. Томск, пр. Ленина, 36,  
(3822) 529-852, rector@tsu.ru, http://www.tsu.ru),  
доктор физико-математических наук  
(01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы),  
доцент

Борзенко Евгений Иванович

27 февраля 2023 года

Подпись Е.И. Борзенко удостоверяю  
Ученый секретарь Ученого совета ТГУ

Н.А. Сазонтова

