



Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации  
федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
**«Алтайский государственный  
технический университет  
им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ)**  
пр-т Ленина, 46, г. Барнаул, 656038  
Телефон: (3852) 29-07-10  
Факс: (3852) 36-78-64  
E-mail: altgtu@list.ru ;  
ntsc@desert.secna.ru  
ОКПО 02067824  
ОГРН 1022201517854  
ИНН/КПП 2224017710/222401001

УТВЕРЖДАЮ

Ректор

Федерального государственного  
бюджетного образовательного учре-  
ждения высшего образования «Алтай-  
ский государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова»,  
доктор технических наук, профессор

А.М. Марков

31 " января 2023 г.



## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

О научно-практической значимости диссертации Лысаковой Евгении Игоревны  
«Влияние добавок наночастиц на течения буровых растворов», представленной к защите  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности  
1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

### Актуальность избранной темы.

В последние два десятилетия наблюдается все возрастающий интерес мировой нефтегазовой промышленности к нанотехнологиям. Перспективным применением нанотехнологий в нефтегазовом деле является создание буровых растворов с содержанием малоразмерных твердых частиц, введение которых даже в небольших количествах в буровой раствор позволяют решить ряд сложных проблем, таких как снижение сил трения буровых труб о стенки скважины, снижение фильтрации промывочной жидкости, улучшение условия выноса шлама на поверхность, укрепление стенки скважины при прохождении слабосцепленных горных пород, изменение смачиваемости горных пород, борьба с коррозией и многие другие.

Для того чтобы нанотехнологии успешно применялись в буровых растворах, они должны иметь преимущества по сравнению с коллоидным или микроразмерными добавками. Уже существующие исследования дают интересные данные, показывающие перспективность применения нанотехнологий в бурении. Однако свойства буровых растворов, модифицированных наночастицами, все еще малоизучены. В частности, данные о свойствах буровых растворов с добавлением наноразмерных частиц в данный момент зачастую противоречат друг другу или вовсе отсутствуют. Это требует дальнейшего более глубокого экспериментального изучения. Поэтому основным направлением работы Лысаковой Е.И. можно выделить систематическое изучение влияния добавок наночастиц на основные функциональные свойства буровых растворов на водной основе.

**Новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций,  
сформулированных в диссертации.**

В работе были получены следующие основные результаты.

1. Установлено, что добавка наночастиц в буровые растворы может значительно улучшить их реологические характеристики. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что при низких концентрациях наночастиц реология буровых растворов с наночастицами, как правило, лучше описывается степенной моделью. Повышение концентрации наночастиц в суспензии приводит к качественному изменению ее реологических свойств. В растворе начинает появляться предельное напряжение сдвига. Таким образом было показано, что с помощью добавок наночастиц можно управлять вязкими и реологическими свойствами буровых растворов. При этом было установлено, что реологические свойства исследуемых суспензий также значительно зависят не только от концентрации, но и от размера и материала добавляемых наночастиц. С уменьшением размера наночастиц это влияние усиливается. Показано, что вязкость модифицированных наночастицами буровых растворов менее подвержена влиянию температуры по сравнению с обычными растворами, что очень важно для их практического применения. Установлено, что с уменьшением размера наночастиц их влияние на температурную зависимость реологических параметров буровых растворов усиливается. Зависимость вязкости и реологии от размера и материала не свойственна классическим суспензиям микроскопических частиц и является отличительной характеристикой наносуспензий. Это позволяет управлять свойствами растворов в очень широких пределах.

2. Впервые проведено систематическое экспериментальное исследование влияния концентрации, размера и материала наночастиц на фильтрационные свойства буровых растворов. В результате было показано, что добавление наночастиц в буровой раствор значительно влияет на величину фильтрационных потерь. Было установлено, что добавка 1-2 масс. % наночастиц позволяет снизить фильтрационные потери раствора более чем в 3 раза. При этом влияние наночастиц зависит не только от их концентрации, но и от размера. Показано, что фильтрационные потери уменьшаются с увеличением концентрации наночастиц и уменьшением их размера. При помощи электронной микроскопии удалось обнаружить, что основной причиной снижения фильтрационных потерь при добавке в глинистые растворы наночастиц является снижение проницаемости фильтрационной корки, которая образуется на стенках скважины.

3. С помощью численного моделирования впервые исследованы зависимости эффективности выноса шлама и перепада давления в скважине от концентрации, размера и вида наночастиц, а также от скорости вращения буровой колонны, расхода бурового раствора и угла наклона скважины к горизонту. Исследование влияния добавок наночастиц в буровой раствор на эффективность транспорта шлама из горизонтальной скважины показало, что добавка наночастиц приводит к значительному улучшению промывки скважины (в 2,7 раз для двухпроцентной по массе концентрации наночастиц оксида кремния размером 10 нм). Было установлено, что с увеличением угла наклона скважины от вертикали положительное действие добавки наночастиц на эффективность выноса шлама возрастает. Таким образом, было показано, что добавка наночастиц в буровой раствор будет наиболее эффективна именно для горизонтально-направленных скважин.

Поскольку, в отличие от суспензий с макро и микроскопическими размерами частиц, реологические параметры и величина фильтрационных потерь модифицированных наночастицами буровых растворов зависят от размеров и материала наночастиц и изменяются значительно уже при небольших их концентрациях, это открывает широкую перспективу применения наночастиц для управления характеристиками буровых растворов.

#### **Значимость для соответствующей отрасли науки и производства (практики) полученных автором диссертации результатов.**

Результаты, полученные в работе, безусловно, обладают большим потенциалом для их внедрения в экономику, и при должном их использовании будут способствовать экономическому росту Российской Федерации. Это в полной мере относится к разработанным в работе буровым растворам с добавками наночастиц, т.к. разработка отечественных

буровых растворов нового поколения является чрезвычайно актуальной задачей. Проведенные в рамках данной работы исследования показали, что разработанные буровые растворы с наночастицами имеют ряд принципиальных преимуществ по сравнению с традиционными растворами: имеют повышенные эксплуатационные характеристики (работа при высоких температурах, давлении и пр.); максимально адаптивны к горно-геологическим условиям и особенностям разработки; обладают широким диапазоном регулирования свойств; добавка требуется в малом количестве, возможно снижение себестоимости; экологически инертны. Это открывает широкую перспективу по их применению. Продемонстрированные в работе результаты по возможности управления свойствами буровых растворов с помощью добавок наночастиц могли бы быть успешно внедрены в отечественную нефтегазовую промышленность. Потенциальными потребителями результатов работы по части совершенствования рецептур буровых растворов могут стать РН-Бурение, Газпром бурение, Славнефть, БКЕ (Буровая компания Евразия), ИНК (Иркутская нефтяная компания), ОБК (Оренбургская буровая компания), ООО Буровая компания Таймыр и др.

#### **Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений.**

Обоснованность научных положений подтверждается глубоким анализом современного состояния исследований по данной тематике (134 источника их списка литературы); большим объемом согласованных данных теоретических и экспериментальных результатов, полученных с использованием современных методов исследования; корректной постановкой цели и задач исследования и обоснованным применением современных и адекватных методов их решения. Достоверность научных положений, выводов и заключений, сформулированных в диссертационной работе, подтверждается использованием проверенных средств измерений, сертифицированного оборудования и приборов.

Это дает основание считать полученные результаты достаточно обоснованными и достоверными. Основные положения достигнутых результатов опубликованы в открытой печати, обсуждены в ряде международных и научно-практических конференций.

#### **Оценка содержания диссертации, ее завершенность в целом, замечания по оформлению.**

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой и посвящена исследованию влияния добавок наночастиц на течения буровых растворов. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 134 наименований. Материал изложен на 148 страницах, содержит 86 рисунков и 5 таблиц.

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 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 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 **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 **Пятой главе** на основании полученных выше экспериментальных данных 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 **Заключении** сформулированы основные результаты работы.

Таким образом, текст диссертации равномерно распределен по главам, структура и содержание работы свидетельствуют о завершенном научном исследовании, в котором получены новые научные результаты.

**По содержанию диссертационной работы имеются следующие замечания:**

1. Не сформулированы требования к буровым растворам, поэтому не совсем ясно зачем добавлять в буровой раствор не только наночастицы, но и глинистые компоненты.

2. Не объяснено аномальное поведение зависимостей: показателя нелинейности, меры консистенции и предельного напряжения сдвига от размеров наночастиц при 10 Нм, приведенные на рисунке 3 автореферата или рисунках 3.7, 3.8 и 3.9 диссертации.

3. Утверждение на стр. 37 о том, что бингамовские жидкости можно рассматривать как ньютоновскую среду с переменной вязкостью, кажется странным. В этом случае вязкость должна быть разрывной функцией, а это не совсем удобно при расчетах.

4. В п. 5.1, где приводится численный алгоритм и математическая модель, отсутствуют граничные условия для скорости, давлений и напряжений. Также не совсем ясно направление потока.

5. Не понятен физический смысл, используемый в (5.4) величины  $P_s$  – давление твердых частиц. Хотя далее в (5.11) эта величина определена через температуру гранул твердой фазы, не ясно, почему использован такой закон, который следует из кинетической теории газов.

6. Как следует из выражения (5.12) величина  $g_{0,ss}$  должна быть больше единицы. При этом говорится, что эту величину можно интерпретировать, как вероятность того, что одна частица твердой фазы коснется другой частицы. Но вероятность не может быть больше единицы.

#### **Соответствие автореферата основным положениям диссертации.**

Содержание автореферата в полной мере отражает структуру, научные результаты и выводы диссертации. Текст автореферата и диссертации оформлен стилистически грамотно, с хорошим стилем и в соответствии с требованиями. Специальные термины используются по существу и соответствуют назначению.

Соответствие содержания диссертационной работы специальности, по которой она представляется к защите, подтверждается апробацией работы, ее научной новизной и практической значимостью.

Диссертационная работа по своему содержанию соответствует формуле специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы:

"Построение и исследование математических моделей для описания параметров потоков движущихся сред в широком диапазоне условий, проведение экспериментальных исследований течений и их взаимодействия с телами и интерпретация экспериментальных данных с целью прогнозирования и контроля природных явлений и технологических процессов, включающих движения текучих сред", а также следующим областям исследования из паспорта специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы, соответствующие п. 2, 3, 4, 7, 8, 20, 23, 24 паспорта специальности:

- Реологические законы поведения текучих однородных и многофазных сред при механических и других воздействиях;
- Гидравлические модели и методы расчета течений в водоемах, технологических устройствах и энергетических установках;
- Ламинарные и турбулентные течения;
- Течения многофазных сред (газожидкостные потоки, пузырьковые среды, газовзвеси, аэрозоли, суспензии и эмульсии);
- Течение жидкостей и газов в пористых средах;
- Разработка математических методов и моделей гидромеханики;
- Физико-химическая механика коллоидных систем;
- Микро- и наногидродинамика.

**Подтверждения опубликованных основных результатов диссертации в научной печати.**

По теме диссертации опубликована 21 работа, в том числе 15 статей в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень, рекомендованный 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.

Перечисленные выше публикации полностью соответствуют теме докторской диссертации и раскрывают основные положения всех содержательных глав докторской диссертации: третья глава [1,3,7,9-12,15], четвертая глава [4,5,8,9,13,15], пятая глава [2,6,14].

#### **Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.**

Таким образом, докторская диссертация Лысаковой Евгении Игоревны является научно-квалификационной работой, в которой содержится систематическое исследование влияния добавок наночастиц различного размера, концентрации и материала на свойства буровых растворов на водной основе и характеристики их течений. Работа имеет существенное значение для развития знаний в области разработки отечественных буровых растворов нового поколения с целью оптимизации процессов строительства нефтегазовых скважин и снижения экологической нагрузки при использовании стандартных буровых растворов, что подтверждает наличие в исследовании обоснованных технологических решений, имеющих существенное значение для развития страны, что соответствует требованиям п. 24 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (с изменениями от 28 августа 2017 г.), предъявляемым к докторским диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Отзыв обсужден на заседании кафедры высшей математики (протокол № 6 от 30.01.2023).

заведующий кафедрой высшей математики,  
доктор физико-математических наук, профессор

Г.М. Полетаев

профессор кафедры высшей математики, ведущий  
научный сотрудник научного управления АлтГТУ  
доктор физико-математических наук, профессор

Г.В. Пышнограй

«\_30\_» января 2023 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова

656038, Россия, Алтайский край, г. Барнаул, просп. Ленина, д. 46

Телефон: +7 (385) 229-07-10; +7 (385) 229-08-12

e-mail: [altgtu@list.ru](mailto:altgtu@list.ru); [pyshnograi@mail.ru](mailto:pyshnograi@mail.ru)

Адрес официального сайта в сети интернет: <https://www.altstu.ru>

