На правах рукописи

Набиуллин Динар Рамилевич

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ОТ ШЛАМА НАКЛОННО НАПРАВЛЕННЫХ УЧАСТКОВ СКВАЖИНЫ

Специальность 2.8.2. Технология бурения и освоения скважин

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти»».

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Дьяконов Александр Анатольевич

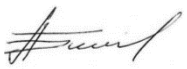
Официальные оппоненты:
Лягов Александр Васильевич
доктор технических наук, доцент, общество с ограниченной ответственностью «Перфобур», директор по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам;

Гельфгат Михаил Яковлевич
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», кафедра бурения нефтяных и газовых скважин, профессор.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.

Защита диссертации состоится **18 декабря 2025 г. в 10:00** на заседании диссертационного совета ГУ.10 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 3321.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.
Автореферат разослан 17 октября 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета  БЛИНОВ
Павел Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

На сегодняшний день одним из векторов рационального использования нефтегазовых месторождений является строительство наклонно-направленных скважин (ННС), в том числе с горизонтальным окончанием ствола. Активное развитие этого направления в России связано с разработкой длительно эксплуатируемых месторождений, имеющих послойную и зональную неоднородность, для которых наиболее эффективная выработка запасов нефти возможна только путем строительства горизонтальных скважин (ГС). Результаты эксплуатации однозначно показали эффективность бурения благодаря кратному повышению производительности. ННС позволяет сократить количество скважин и повысить коэффициент нефтегазоотдачи.

Строительство нефтяных скважин сопряжено со значительными трудностями, такими как, затяжки, прихваты и другие осложнения, вызванные скоплением шлама, поэтому качественная очистка ствола является приоритетной задачей при бурении.

Степень разработанности темы исследования

Весомый вклад в исследования очистки ствола скважины в разное время внесли Агзамов, Ф.А., Акбулатов Т.О., Алван К.А.Х., Ангелопуло О.К., Беккер Т.Е., Булатов А.И., Ганджумян Р.А., Гельфгат М.Я., Гирфанов И.И., Гусман М.Т., Данелянц С.М., Двойников М.В., Дуркин В.В., Ионнесян Р.А., Калинин А.Г., Караушев А.В., Кашкаров Н.Г., Киселев П.В., Крецул В.В., Крылов В.И., Куликов В.В., Курочки А.С., Леонов Е.Г., Лихушин А.М., Махоро В.А., Мительман Б.И., Оганов А.С. Рябченко В.И., Рязанов Я.А., Тагиев Э.И., Соловьев Н.В., Уляшева Н.М., Хабибуллин И.А., Шарафутдинов З.З., Штамбург В.Ф. и др. выявили, что снижение показателей работы долота с ростом глубины скважины связано с ухудшением условий очистки от выбуренной породы, в этом случае необходимо, чтобы промывка забоя скважины была совершенной, под которой понимается беспрепятственное удаление шлама из призабойной зоны. Качественная очистка ствола скважины является одним из основных факторов успешного строительства ННС. Также

значительный вклад в развитие этого направления внесли зарубежные исследователи Amanna B., Bridges S., Darly G.S.G., Gray J.R., Katende A., Makovey N., Ytrehus D.

На качество очистки скважины влияют следующие факторы: плотность бурового раствора, скорость потока бурового раствора, реологические характеристики бурового раствора, режим течения потока бурового раствора, скорость проходки скважины, расположение бурильной колонны в скважине, угол наклона ствола скважины, наличие или отсутствие зон скопления шлама, эксцентричность кольцевого пространства ствола скважины и другие факторы.

Проведённые ранее исследования позволяют сделать вывод, что одним из показателей высокого качества очистки скважины от шлама является наличие турбулентного потока в затрубном пространстве. Российскими и зарубежными исследователями, а также компаниями разрабатываются множество разнообразных конструкций устройств, которые могут создать турбулентный поток жидкости. Однако при всем разнообразии конструкций и различной эффективности существующих технических решений для улучшения очистки ствола скважины на сегодняшний день не существует универсального решения данной проблемы и необходимы дальнейшие исследования.

Объект исследования – очистка наклонно-направленных и горизонтальных участков скважины от шлама при бурении.

Предмет исследования – режим течения промывочной жидкости в скважине за счет использования центратора – турбулизатора для бурильных труб с вращающимся элементом.

Цель исследования повышение эффективности процесса бурения с помощью технологии гидромеханической очистки от шлама наклонно-направленных участков скважины.

Идея работы заключается в улучшении качества очистки наклонно-направленных и горизонтальных участков ствола скважины от выбуренной горной породы за счёт создания турбулентного потока жидкости в местах застойных зон скопления шлама.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач:**

1. Обзор и анализ существующих технических и технологических решений для качественной очистки ствола скважины.
2. Теоретический анализ турбулизирующей способности центраторов с различными профилями в рамках предположений, допускающих существование аналитического решения задачи о течении жидкости в окрестности центратора.
3. Численное моделирование технологии гидромеханической очистки с применением центратора. Оптимизация геометрии центратора для достижения его наибольшей турбулизирующей способности.
4. Лабораторные исследования технических характеристик опытного образца центратора – турбулизатора для бурильных труб с вращающимся элементом на стенде имитации наклонно – горизонтального бурения.
5. Разработка технологии гидромеханической очистки от шлама наклонно-направленных участков скважины центратором – турбулизатором для бурильных труб с вращающимся элементом.

Научная новизна исследования

1. Установлен механизм формирования вектора скорости течения бурового раствора вдоль образующих лопастей центратора – турбулизатора, основанный на возникновении центробежных сил с повышением кинетической энергии потока в подвижном элементе, который позволяет предотвратить осложнения в процессе бурения скважины.
2. Разработана математическая модель, позволяющая определить оптимальную скорость течения в кольцевом пространстве в зависимости от концентрации шлама в буровом растворе с учётом конструктивных особенностей центратора - турбулизатора.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.2. Технология бурения и освоения скважин: п. 2 «Конструкции скважин. Профиль и технология проводки вертикальных, наклонный, а также горизонтальных скважин, в том

цикле с разветвлёнными стволами. Геонавигация в процессе бурения»; п. 6 «Гидромеханика процессов бурения скважины. Движение жидкости в скважине в различных термобарических условиях. Реология технологических жидкостей и влияние реологических параметров на процессы строительства скважины».

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Использование вращающегося центратора – турбулизатора в составе буровой колонны повышает энергию турбулентного потока за счёт изменения вектора скорости течения бурового раствора вдоль образующих лопастей с возникновением центробежных сил в подвижном его элементе, который позволяет предотвратить осложнения в процессе бурения скважины.
2. Разработан центратор – турбулизатор для бурильных труб (патент 215131 U1 заявлено: 25.08.2022; опубликовано 30.11.2022), позволяет осуществлять кратное увеличение скорости потока бурового раствора в кольцевом пространстве скважины, предупреждающий образование шламовых застойных зон.
3. Разработанная модель определения оптимальной скорости течения бурового раствора в кольцевом пространстве скважины с учётом предложенной конструкции центратора – турбулизатора, используется при проведении практических и лабораторных занятий студентов нефтегазового направления подготовки АГТУ «ВШН».
4. Разработанная технология гидромеханической очистки от шлама горной породы наклонно-направленных и горизонтальных участков ствола скважины за счет локальной турбулизации потока бурового раствора (акт внедрения от 21.02.2025).

Основные результаты, полученные по результатам аналитического решения и численного моделирования, могут быть в дальнейшем использованы для определения оптимальных геометрических особенностей профиля центратора и режима его работы при бурении для обеспечения высокой турбулизирующей способности, что потенциально способно привести к повышению экономической эффективности работы бурового долота с использованием центраторов оптимизированного профиля.

Полученные результаты и разработанные методы ориентированы на широкое применение при производстве буровых работах, оптимизированный профиль позволяет достичь повышенной турбулизирующей способности центратора с практически полным сохранением затрат по сравнению с существующими на рынке продуктами.

Методология и методы исследования. В работе используются аналитические методы исследования для проведения 3D моделирования в программе SIMULIA Abaqus, натурное и вычислительное моделирование. Обработка результатов экспериментальных исследований, проводимых на лабораторном стенде, осуществлялась в ПО «ДИАМАНТ–2», виброанализатора АГАТ–М.

Основные защищаемые положения:

1. Использование вращающегося центратора – турбулизатора в составе буровой колонны обеспечивает увеличение локального числа Рейнольдса в области низкой турбулентности потока от 1200 до 5000 между частями центратора и достижение максимальной энергии турбулентного потока с $5 \cdot 10^{-3}$ $м^2/с^2$ до $2 \cdot 10^{-1}$ $м^2/с^2$, что способствует эффективной гидромеханической очистке от шлама наклонно направленных и горизонтальных участков скважины.

2. Разработанная технология гидромеханической очистки от шлама наклонно-направленных участков скважины, основанная на создании турбулентности потока бурового раствора за счет использовании вращающегося центратора – турбулизатора с углом между лопастями подвижного элемента и направлением потока промывочной жидкости ($\beta = 30°$) при количестве лопастей $N = 12$ является оптимальным при расходе промывочной жидкости до 0,03 $м^3/с$.

Степень достоверности работы

Достоверность обеспечена достаточным объёмом аналитических и стендовых исследований, сходимостью и воспроизводимостью полученных результатов, а также апробацией полученных результатов на всероссийских и международных конференциях.

Апробация результатов диссертации проведена на 8 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 5 международных. За последние 3 года принято участие в 6 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных: научно – технической конференции «Цифровые технологии в добыче углеводородов: от моделей к практике» (г. Уфа, 2021 г.); Международной научно – практической конференции: «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли» (г. Альметьевск, 2021 г.); Международной научно – практической конференции: «Технологические решения строительства скважин на месторождениях со сложными геолого – технологическими условиями их разработки» (г. Тюмень, 2022 г.); Научно – технической конференции «Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых» (г. Пермь, 2023 г.); Международной научно–практической конференции «75 – летие горно – нефтяного факультета УГНТУ и 100 – летие учёного Спивака Александра Ивановича» (г. Уфа, 2023 г.); Международной студенческой научно-практической конференции «Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений на поздней стадии» (г. Альметьевск, 2024 г.); 78 – ой Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ – 2024» (г. Москва, 2024 г.); научно – практических конференциях «Математическое моделирование и компьютерные технологии в процессах разработки месторождений», «Инновационные решения в геологии и разработке ТРИЗ», «Цифровая трансформация в нефтегазовой отрасли» (г. Москва, 2025 г.)

Личный вклад

Заключается в определении цели и постановке задач, проведении анализа современного состояния в области очистки от шлама наклонно-направленных скважин, проведении теоретических и лабораторных исследований, разработке конструкторской документации и обосновании модели опытного образца.

Публикации. Результаты диссертационной работы освещены в 12 печатных работах, в том числе в 3 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на

соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук, в 1 статье – в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, пяти глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 140 наименований и 2 приложений. Диссертация изложена на 127 страницах машинописного текста, содержит 69 рисунков и 11 таблиц.

Благодарности

Автор выражает особую признательность и искреннюю благодарность научному руководителю Дьяконову Александру Анатольевичу и коллективу кафедры БНГС АГТУ ВШН, помогавшим в выполнении работы, а также лаборатории фундаментальных проблем нефтегазовой геофизики и геофизического мониторинга ФГБУН Институт Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук за предоставленную возможность проведения 3D моделирования в программе SIMULIA Abaqus.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность тематики работы, степень её разработанности, приведены объект и предмет исследования, цель работы, её идея, сформулированы основные задачи исследования и методы их решения, приведена научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы защищаемые положения.

В **первой главе** освещено современное состояние вопроса на сегодняшний день. Наблюдается рост количества наклонно-направленных скважин, строительство которых сопряжено со значительными трудностями, такими как, например, неполный вынос шлама при бурении скважины, дюнообразование, лавинное обрушение скоплений шлама и т. д. На основе проведённого анализа литературных источников, посвящённых вопросам проблематики и факторов очистки скважин шлама выявлено, что улучшение качества

очистки возможно путём гидромеханического воздействия на поток для создания турбулентного режима течения промывочной жидкости.

Во второй главе представлена упрощённая теоретическая модель, позволяющая рассматривать течение промывочной жидкости в окрестности центратора с помощью методов математического моделирования.

В третьей главе выполнено численное моделирование технологии гидромеханической очистки с применением центратора при помощи алгоритма, основанного на решении системы интегральных уравнений в программном комплексе Ansys.

В четвертой главе проведена параметрическая оптимизация геометрии предлагаемого профиля центратора. Определена зависимость между параметрами турбулентного потока и параметрами геометрии модели, найден ее максимум, а также проведено ранжирование по эффективности от наибольшей турбулизирующей способности к наименьшей по результатам теоретического исследования 8, 1, 2, 7, 4, 3, 5, 6, 9.

В пятой главе представлена технология гидромеханической очистки от шлама наклонно – направленных участков скважины, включающая применение центратора – турбулизатора для бурильных труб с вращающимся элементом. Проведены стендовые испытания, подтвердившие работоспособность центратора – турбулизатора.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Использование вращающегося центратора – турбулизатора в составе буровой колонны обеспечивает увеличение локального числа Рейнольдса в области низкой турбулентности потока от 1200 до 5000 между частями центратора и достижение максимальной энергии турбулентного потока с $5 \cdot 10^{-3}$ м^2/с^2 до $2 \cdot 10^{-1}$ м^2/с^2, что способствует эффективной гидромеханической очистке от шлама наклонно направленных и горизонтальных участков скважины.

Приведены основные механические методы улучшения очистки ствола, включающие разработку различных конструкций и агрегатов, устанавливаемых в составе компоновки низа бурильной колонны для эффективного удаления шлама при турбулентном

режиме течения бурового раствора в наклонно-направленных и горизонтальных участках скважины. Обосновано применение центраторов для создания турбулентного потока жидкости, выявлены основные профили. Транспортирующая способность выноса шлама на поверхность главным образом зависит от конструктивных показателей центраторов и гидравлических показателей промывки.

При всем разнообразии существующих решений для улучшения очистки ствола скважин на сегодняшний день не существует универсального решения данной проблемы, необходимы дальнейшие исследования.

В работе предлагается техническое решение проблемы выноса шлама с наклонно-направленных и горизонтальных участков ствола скважины в виде разработанного и запатентованного центратора – турбулизатора для бурильных труб, состоящего из полого корпуса в виде 2 втулок, расположенных последовательно друг за другом и имеющих разнонаправленные лопасти. Верхняя втулка может вращаться относительно нижней, которая крепится неподвижно на бурильную колонну. Буровой раствор, проходя через нижнюю втулку, меняет направление вправо и поступает на верхнюю втулку, в которой меняет направление влево, что приводит к турбулизации восходящего потока, вследствие чего частицы шлама, находящиеся в потоке, интенсивно перемешиваются, что обеспечивает предотвращение возникновение зон скоплений шлама.

Построены модели центраторов с различными профилями и типами зубьев (Рисунок 1). На Рисунках 1, 2 представлены 5 типов зубьев с различными профилями: шевронный, с переменной толщиной (№ 1, 2), периодический (№ 3, 6), дуговой профиль (№ 4, 5), косозубый (7, 8), а также профиль с прямым зубом (№ 9), а также подготовленные 3D модели (Рисунок 2). В дальнейшем эти профили использовались для теоретического исследования турбулизирующей способности центраторов и численного моделирования.

В основе модели лежит аналитическое решение уравнения Навье – Стокса для течения жидкости в области, ограниченной двумя соосными цилиндрами, способными к вращению вокруг оси и поступательному движению вдоль оси цилиндров. Предложена модификация этой задачи для случая сложной геометрии центратора

при стационарном течении жидкости в случае осевой симметрии. Получены распределения скоростей потока промывочной жидкости в окрестности центратора, оценены параметры турбулентного потока (Рисунок 3 и 4). Графики на рисунках 5 и 6 нормированы относительно профиля 9.

Сравнительный анализ результатов, полученных теоретическим методом для центраторов различной геометрии, позволил выделить профили, соответствующие максимальным значениям средней скорости потока жидкости до 5 $м^3/с$ и числа Рейнольдса до 25 тыс. Обоснована наибольшая турбулизирующая способность центратора с профилем 8 на качественном уровне исходя из пика нормированного числа Рейнольдса (Рисунок 4).

Изменение направления потока существенно повышает турбулизирующую способность предложенного центратора – турбулизатора для бурильных труб за счёт увеличения локального числа Рейнольдса в области низкой турбулентности потока от 1200 до 5000 между частями центратора и повышения максимальной энергии турбулентного потока почти на два порядка с $5 \cdot 10^{-3}$ $м^2/с^2$ до $2 \cdot 10^{-1}$ $м^2/с^2$.

В качестве граничных условий выбирались параметры потока на стенках модели флюида (Таблица 1). Другим начальным условием для модели является вращение подвижного колеса центратора с заданной постоянной частотой вращения (Ω = 300 об. /мин.).

Таблица 1 – Параметры бурового раствора, используемые при численном моделировании

Свойства бурового раствора		Показатели свойств бурового раствора «TBR-MudMax»
Плотность	$кг/м^3$	1150
Условная вязкость	$T_{100,}$ с	25–60
Реологические свойства	$\tau_{0,}$ Па	95–100
	η, Па·с	8–10

Подтверждена согласованность теоретических и численных сравнительных оценок турбулизирующей способности центраторов различных геометрий. Определена зависимость числа Рейнольдса, амплитуды потока, амплитуда и частота пульсаций скорости как функция геометрии центратора и расхода промывочной жидкости.

Согласно теоретическим построениям:

1. Турбулизирующая способность технологии гидромеханической очистки от шлама наклонно направленных участков скважины центратором – турбулизатором для бурильных труб с вращающимся элементом максимальна для центраторов с профилями 1, 2, 7, 8. Профиль 8 значимо выделяется на зависимости амплитуды турбулентного потока от расхода жидкости;

2. Теоретические построения позволяют оценить и обосновать высокую турбулизирующую способность центратора с профилем 8.

2. Разработанная технология гидромеханической очистки от шлама наклонно-направленных участков скважины, основанная на создании турбулентности потока бурового раствора за счет использовании вращающегося центратора – турбулизатора с углом между лопастями подвижного элемента и направлением потока промывочной жидкости (β = 30°) при количестве лопастей N = 12 является оптимальным при расходе промывочной жидкости до 0,03 м^3/с.

Технология основана на создании развитого турбулентного потока жидкости разработанным и запатентованным центратором – турбулизатором для бурильных труб с вращающимся элементом, предотвращающим скопление шлама на наклонно-направленных участках скважины.

Выполнена оптимизация геометрии профиля по следующим параметрам: количеству выступов на поперечном сечении и углу между лопастью центратора и направлением потока жидкости.

Профиль определяется параметрами:

1. Количеством выступов на поперечном сечении $N = \pi/\theta'$ (целочисленное);

2. Углом между лопастью центратора и направлением β.

Проведение расчетов для набора значений N = 4, 6, 8, 10, 12; $\beta = 0^o, 10^o, 20^o, 30^o, 40^o$.

Оптимальные результаты: N = 12; $\beta = 30^o$.

Определено, что угол между лопастью центратора и направлением потока промывочной жидкости $\beta = 30^o$ при количестве

лопастей N = 12 является оптимальным для всего рассмотренного диапазона расходов жидкости (Рисунок 11–12).

Гидравлические расчеты показали (Рисунок 7 – 10), что для бурения горизонтального участка нефтяной скважины, применительно к послойной и зональной неоднородности терригенных пород, представленных кварцевыми песчаниками, которые приближены к геолого-техническим условиям нефтегазовых месторождений ПАО «Татнефть», установка центратора – турбулизатора для бурильных труб в компоновку низа бурильной колонны позволяет снизить необходимый расход промывочной жидкости для выноса шлама с 12,5 л/с до 5 л/с и предотвращает образование скоплений шлама. Для эффективного выноса шлама необходимо устанавливать центратор – турбулизатор через каждую бурильную трубу (8,6 м). Потери давления на 1 центратор – турбулизатор составляют 0,06 МПа, что при общей потере давления в колонне 7,5 МПа составляет менее 1% и являются несущественными.

Разработанный центратор перед спуском в скважину проверяют на целостность и возможность свободного вращения втулки 2 (Рисунок 1). Устанавливают на переводник, закрепляя нижнюю втулку 1 к трубе штифтами 5. Затем центратор – турбулизатор, установленный на переводнике, вместе с колонной бурильных труб спускают в интервал скважины, где требуется обеспечить качественное удаление шлама, например, в кавернозных, наклонных и горизонтальных участках ствола.

При достижении центратором – турбулизатором для бурильных труб с вращающимся элементом кавернозного участка скважины, наклонного или горизонтального участка ствола скважины буровой раствор, попадая из бурильной трубы в кольцевое затрубное пространство и проходя через втулку 2, попадает в лопасти неподвижной втулки 1. Изменение направления течения жидкости приводит к повороту или вращению верхней втулки 1. Кроме того, резкое изменение направления движения потока приводит к турбулентному движению жидкости. Для предупреждения торможения вращения втулка 2 несколько меньше диаметра втулки 1.

Изготовление центратора – турбулизатора для бурильных труб с вращающимся элементом в виде двух втулок, насаженных на переводник посредством штифтов с заостренными концами, упрощает конструкцию центратора с одновременным снижением затрат на изготовление. Устанавливать центраторы в компоновке бурильной колонны предлагается следующим образом: центратор после забойного двигателя, телесистемы и другого необходимого оборудования через каждую бурильную трубу.

Опытный образец центратора – турбулизатора для бурильных труб с вращающимся элементом был изготовлен на заводе Технологические решения «Tech–TS» (Рисунок 13).

С целью апробации и определения характеристик опытного образца центратора – турбулизатора для бурильных труб с вращающимся элементом были проведены лабораторные испытания на стенде имитации наклонно – горизонтального бурения (ИНГБ) кафедры Бурения нефтяных и газовых скважин АГТУ ВШН (Таблица 2).

Опытный образец центратора – турбулизатора для бурильных труб с вращающимся элементом устанавливался на имитатор бурильной трубы. Были проведены испытания при расходах промывочной жидкости 0,001 $м^3/с$, 0,003 $м^3/с$, 0,005 $м^3/с$, 0,007 $м^3/с$. Согласно методике испытаний проводились замеры виброанализатором частоты потока промывочной жидкости без центратора и с ним. Получен турбулентный поток жидкости, инициируемый центратором.

Таблица 2 - Параметры стенда ИНГБ с коэффициентом (масштабом) геометрического моделирования k_d

Величины	Размеры, мм		Коэффициент (масштаб) геометрического моделирования k_d
	натуры	модели	
Диаметр скважины D_c, мм	146	146	1
Диаметр труб D_T, мм	114	92	0,81
Диаметр центратора, мм	137	137	1

На рисунке 15 представлены графики спектра частоты турбулентности с опытным образцом центратора (красная линия) и

без него (синяя линия) при расходе жидкости 0,003 $м^3/с$. Графики получены из программного обеспечения (ПО) прибора виброанализатор АГАТ – М, который показывает пиковые значения амплитуды потока при заданном расходе жидкости. Величина пиковых значений может отличаться от теоретических в связи с ограничениями лабораторного оборудования.

Из рисунка 15 видно, что пиковая амплитуда турбулентного потока при расходе 0,003 $м^3/с$ без опытного образца центратора равна 0,0001 мм/с, с ним равна 0,001 мм/с, что свидетельствует о создании турбулентного потока промывочной жидкости и работоспособности опытного образца центратора, который может снизить возможность осаждения шлама на наклонно – направленных и горизонтальных участках скважины.

Сопоставление значений теоретических и лабораторных испытаний показало, что имеется сходимость значений испытаний. Более высокие значения расхода жидкости выше 0,0078 $м^3/с$ на лабораторном стенде замерить не позволяют характеристики стенда ИНГБ.

Проведённые лабораторные испытания (Рисунок 14) выявили возможность создания турбулентного потока жидкости опытным образцом центратора – турбулизатора для бурильных труб с вращающимся элементом и подтвердили работоспособность, что позволяет сократить сроки разработки и внедрения новых центраторов при бурении нефтяных и газовых скважин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предлагается запатентованный опытный образец центратора – турбулизатора для бурильных труб с вращающимся элементом, на основе которого разработана новая технология гидромеханической очистки от шлама наклонно направленных участков скважины. Сформулирована теоретическая модель течения жидкости в окрестности центратора. Выполненные исследования позволяют сделать следующие рекомендации:

1. На основе проведённого анализа литературных источников, посвящённых вопросам проблематики очистки скважин от выбуренной породы, выявлено, что повышение качества очистки

наклонно направленных участков скважины возможно путём гидромеханического воздействия на поток жидкости за счёт создания турбулентного режима течения бурового раствора в кольцевом пространстве.

2. Обоснована теоретическая модель, позволяющая рассматривать течение промывочной жидкости в окрестности центратора с помощью аналитических методов. Установлено на основе теоретической модели течение промывочной жидкости в окрестности центратора, что изменение направления потока существенно повышает турбулизирующую способность предложенной технологии гидромеханической очистки от шлама наклонно направленных участков скважины.

3. В результате проведённого численного моделирования технологии гидромеханической очистки от шлама наклонно направленных участков скважины определён оптимальный угол между лопастью центратора и направлением потока промывочной жидкости и количество лопастей на поперечном сечении для всего рассмотренного диапазона расходов жидкости.

4. Сконструирован и изготовлен опытный образец центратора – турбулизатора для бурильных труб с вращающимся элементом. Проведённые лабораторные испытания подтвердили его работоспособность. Получена сходимость результатов теоретических и лабораторных испытаний. Погрешность лабораторных испытаний составила не более 7 %.

5. Разработана технология гидромеханической очистки от шлама наклонно – направленных участков скважины, на основе запатентованного центратора – турбулизатора для бурильных труб с вращающимся элементом, который обеспечивает повышение качества строительства ствола скважины за счёт турбулизации восходящего потока бурового раствора и предотвращает создание зон скопления шлама.

Перспективы дальнейшего развития темы в области улучшении качества очистки наклонно направленных и горизонтальных участков профиля скважины от выбуренной горной породы заключаются в разработке цифрового двойника КНБК, в составе которого находится центратор – турбулизатор для бурильных

труб с вращающимся элементом, а также в изучении ранее не рассмотренных гидродинамических эффектов, позволяющих повысить качество проводимых исследований.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Набиуллин, Д.Р.** Теоретические исследования турбулизирующей способности центратора – турбинного с различными профилями / **Д.Р. Набиуллин**, А.А. Дьяконов, Л.Б. Хузина // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2024. – № 3(375). – С. 10–16.

2. **Набиуллин, Д.Р.** Результаты численного моделирования гидродинамического течения промывочной жидкости в окрестности центратора–турбулизатора / **Д.Р. Набиуллин**, А.А. Дьяконов, Л.Б. Хузина // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2024. – № 4(376). – С. 10–14.

3. **Набиуллин, Д.Р.** Результаты лабораторных испытаний центратора –турбулизатора для бурильных труб / **Д.Р. Набиуллин**, А.А. Дьяконов, Л.Б. Хузина // Нефтяная провинция. – 2024. – № 3(39). – С. 308–315.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

4. **Набиуллин, Д.Р.** Исследование технологических аспектов гидромеханической очистки с применением центратора-турбулизатора для бурильных труб с вращающимся элементом / **Д.Р. Набиуллин**, А.А. Дьяконов // Нефтяное хозяйство. – 2025. – № 3. – С. 48–51.

Публикации в прочих изданиях:

5. **Набиуллин, Д.Р.** Создание цифровой модели центратора турбулизатора / **Набиуллин Д.Р.**, Хузина Л.Б. // Цифровые технологии в добыче углеводородов: от моделей к практике. Сборник тезисов научно–технической конференции, Уфа 5–8 октября 2021 года. – Уфа, РН–БашНИПИнефть. – 2021. – С. 124–125.

6. **Набиуллин, Д.Р.** Создание цифровой модели центратора – турбулизатора / **Набиуллин Д.Р.**, Хузина Л.Б. // Достижения,

проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли: Сборник материалов VI Международной научно–практической конференции, Альметьевск, 25 ноября 2021 года. – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2021. – С. 130–132.

7. **Набиуллин, Д.Р.** О проектировании модели центратора – турбулизатора / **Набиуллин Д.Р.** // Технологические решения строительства скважин на месторождениях со сложными геолого–технологическими условиями их разработки: материалы II международной научно–практической конференции, посвященной памяти Виктора Ефимовича Копылова, Тюмень, 15–17 февраля 2022 г. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2022. – С. 252–255.

8. **Набиуллин, Д.Р.** Разработка модели центратора–турбулизатора для бурильных труб / **Набиуллин Д.Р.** // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2023. – Т. 1. – С. 232–234.

9. **Набиуллин, Д.Р.** О теоретических исследованиях центратора – турбулизатора / **Набиуллин Д.Р.**, Дьяконов А.А., Хузина Л.Б. // Международная научно–практическая конференция, посвященная 75 – летию горно – нефтяного факультета УГНТУ и 100 – летию ученого Спивака Александра Ивановича: сборник материалов, Уфа, 23 – 24 ноября 2023 г. – Уфа УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2023 – С. 58 – 59.

10. **Набиуллин, Д.Р.** Исследование характеристик опытного образца центратора – турбулизатора для бурильных труб / **Набиуллин Д.Р.**, Дьяконов А.А. // Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений на поздней стадии: материалы Международной студенческой научно-практической конференции (23–24 сентября 2024 года) / Альметьевск: Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», 2024. – С. 142–145.

11. **Набиуллин, Д.Р.** Разработка центратора–турбулизатора для бурильных труб / **Набиуллин Д.Р.**, Дьяконов А.А., Хузина Л.Б. // 78 – я Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ – 2024»: сборник тезисов, Москва, 22 – 26 апреля 2024 г. – Москва, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2024 – С. 255 – 256.

12. **Дубиня, Н.В.** Математическое моделирование работы центратора-турбулизатора для бурильных труб / Дубиня Н.В., **Набиуллин Д.Р.**, Дьяконов А.А., Хузина Л.Б. // "Математическое моделирование и компьютерные технологии в процессах разработки месторождений". "Инновационные решения в геологии и разработке ТРИЗ". "Цифровая трансформация в нефтегазовой отрасли": сборник докладов научно-практических конференций, Москва, 24 апреля – 29 ноября 2024 года / Москва ЗАО «Издательство «НЕФТЯНОЕ ХОЗЯЙСТВО». – 2025. – С. 68–75.

Патент:

13. Патент на полезную модель № 215132 U1 Российская Федерация, МПК E21B 17/10 (2006.01), СПК E21B 17/10 (2022.08). Центратор–турбулизатор для бурильных труб: № 2022122924; заявлено: 25.08.2022; опубликовано: 30.11.2022 / Бабичев И.Н., Дьяконов А.А., Хузина Л.Б., **Набиуллин Д.Р.**, Хузин Б.А.; патентообладатель: Государственное бюджетное образовательное учреждение "Альметьевский государственный нефтяной институт".

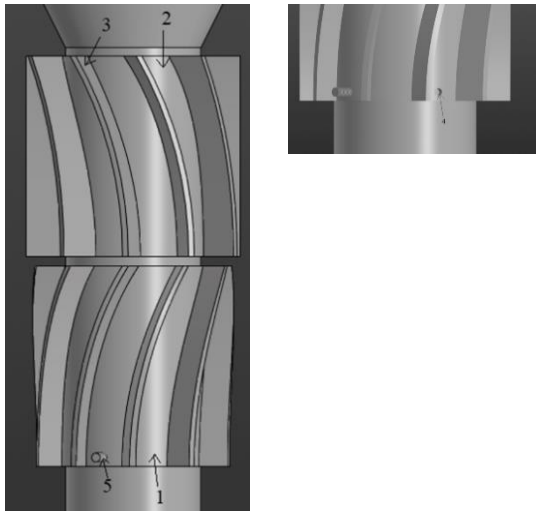


Рисунок 1 – Центратор – турбулизатор для бурильных труб, где
1 – нижняя втулка; 2 – верхняя втулка; 3 – лопасть; 4 – отверстие для шпильки; 5 – шпилька

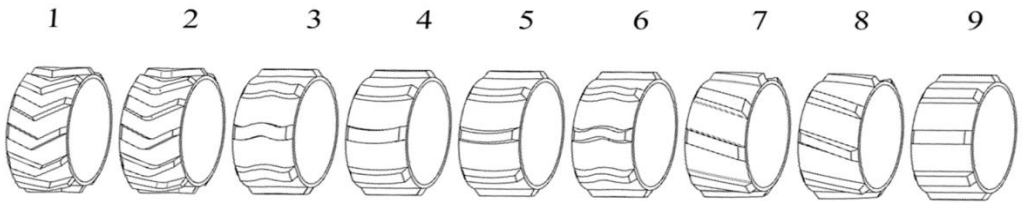


Рисунок 2 – Эскизы вариантов профилей лопастей вращающегося колеса центратора

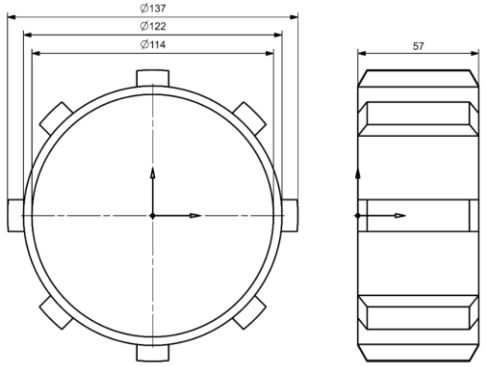


Рисунок 3 – Профиль центратора

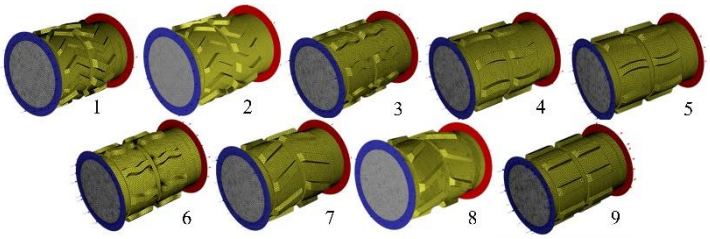
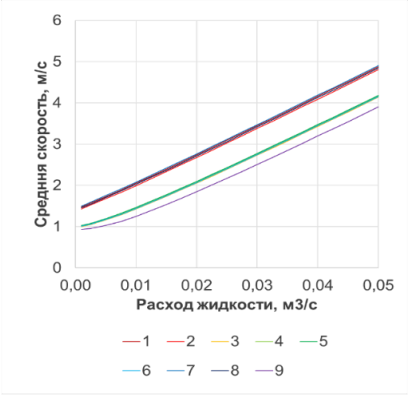


Рисунок 4 – 3D модели центраторов



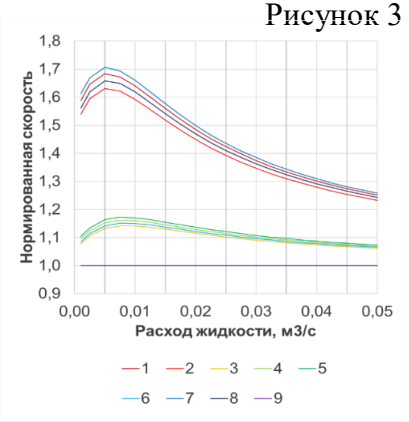
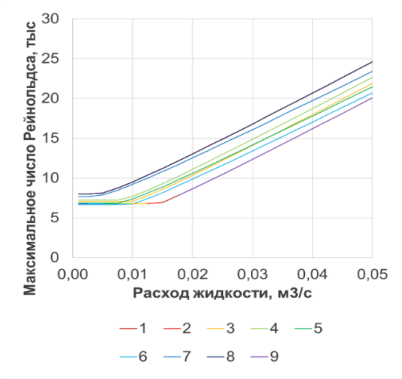


Рисунок 5 – Средняя скорость потока



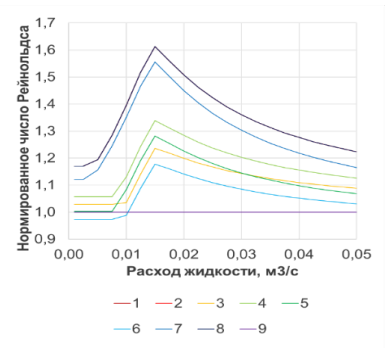


Рисунок 6 – Максимальное число Рейнольдса

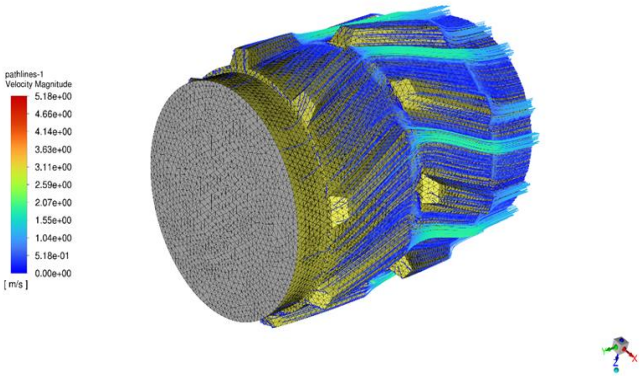


Рисунок 7 – Графическое представление скорости потока для профиля 8

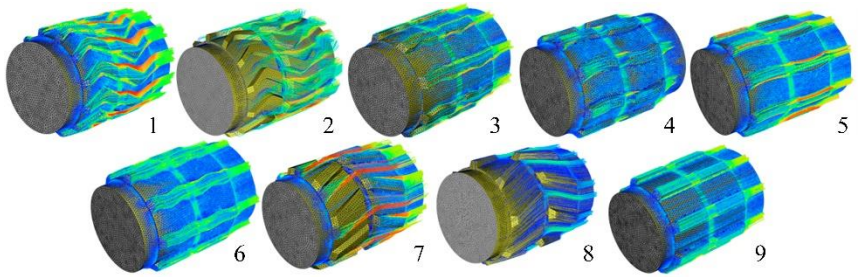


Рисунок 8 – Графическое представление скорости потока для всех профилей

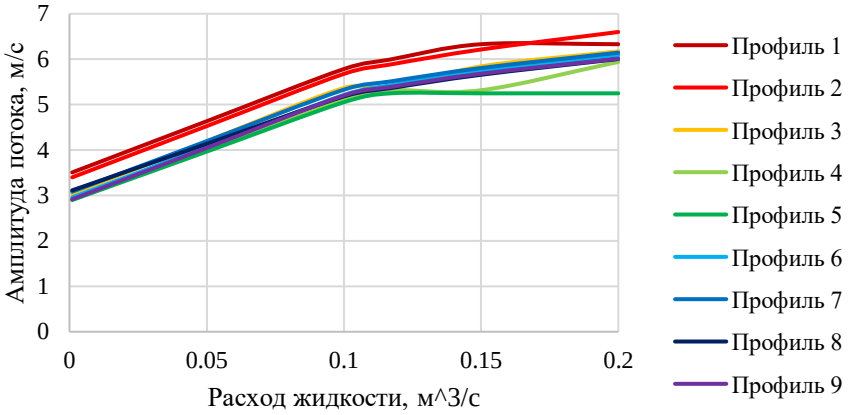


Рисунок 9 – Зависимость амплитуды потока от расхода жидкости

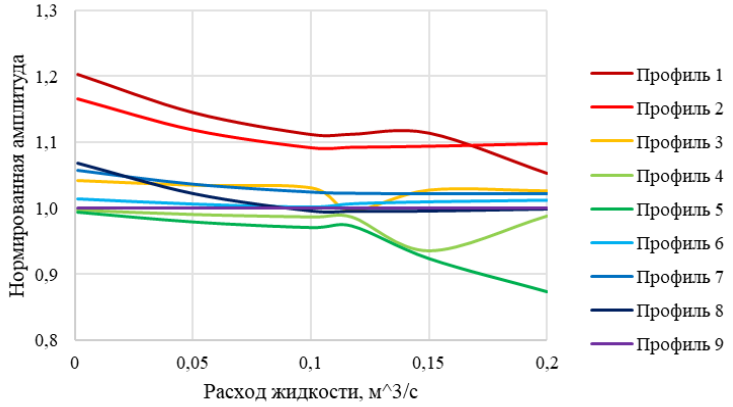


Рисунок 10 – Зависимость нормализованной амплитуды потока от расхода жидкости

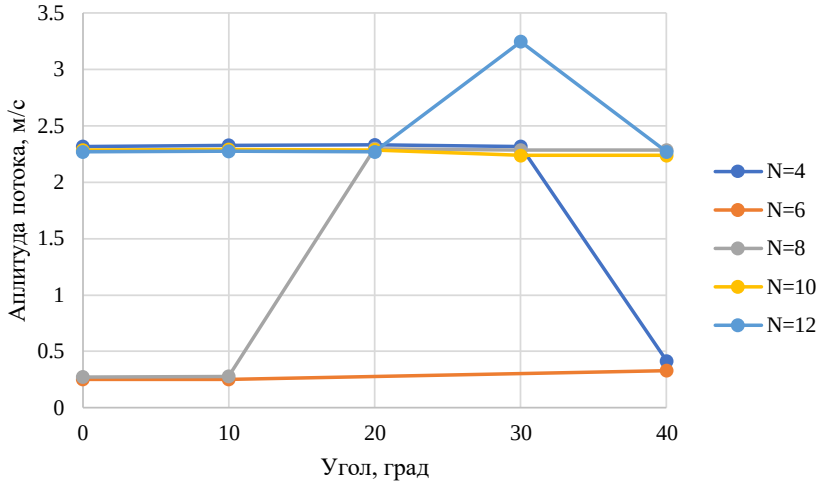


Рисунок 11 – Зависимость амплитуды потока от угла наклона профиля

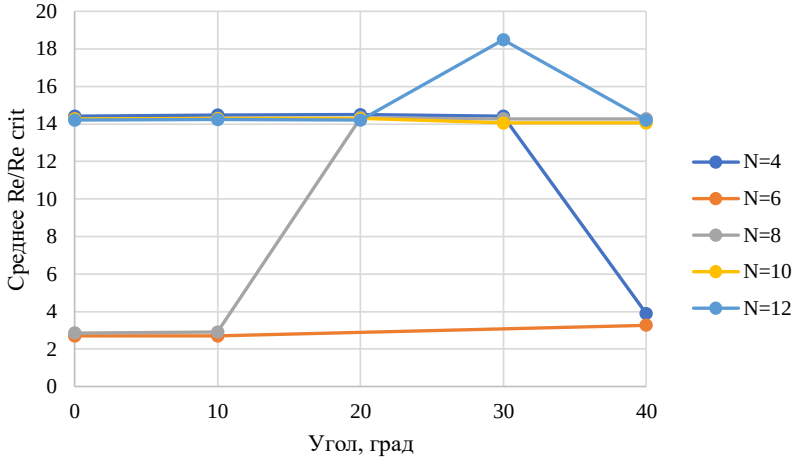


Рисунок 12 – Зависимость среднего число Рейнольдса/ число Рейнольдса критическое от угла наклона профиля

Рисунок 13 – Опытный образец центратора – турбулизатора для бурильных труб с вращающимся элементом, где
1 – первый диск, 2 – второй диск, вращающийся

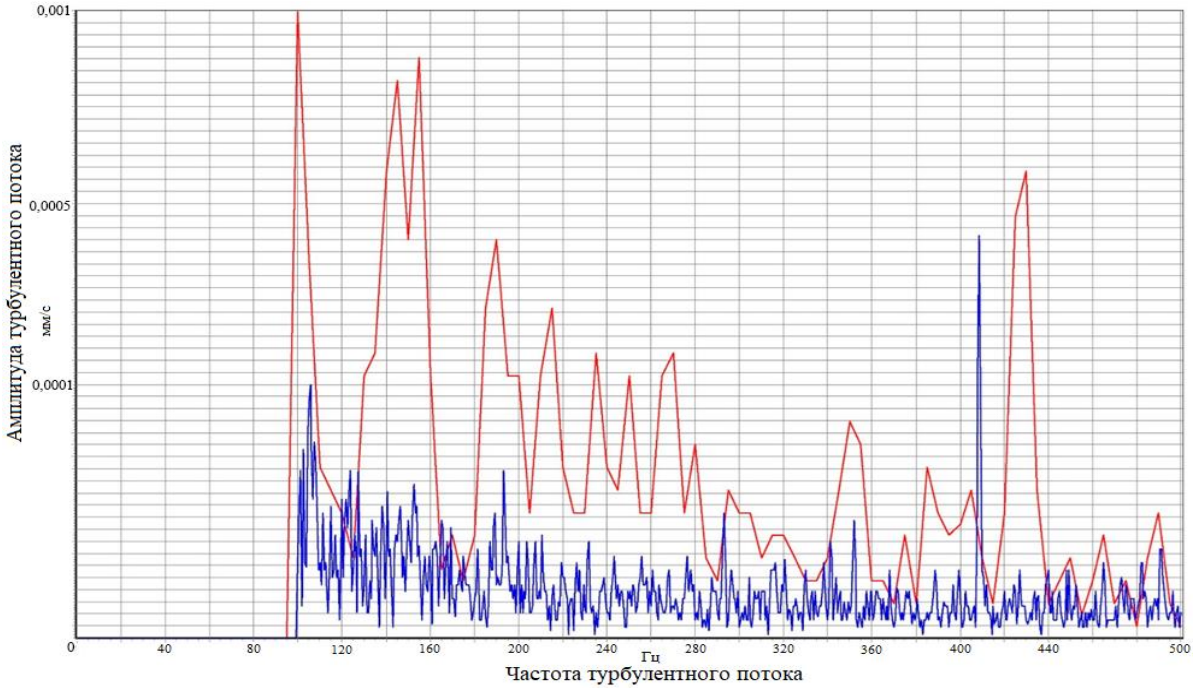


Рисунок 14 – Спектр частот, полученный из ПО прибора АГАТ–М

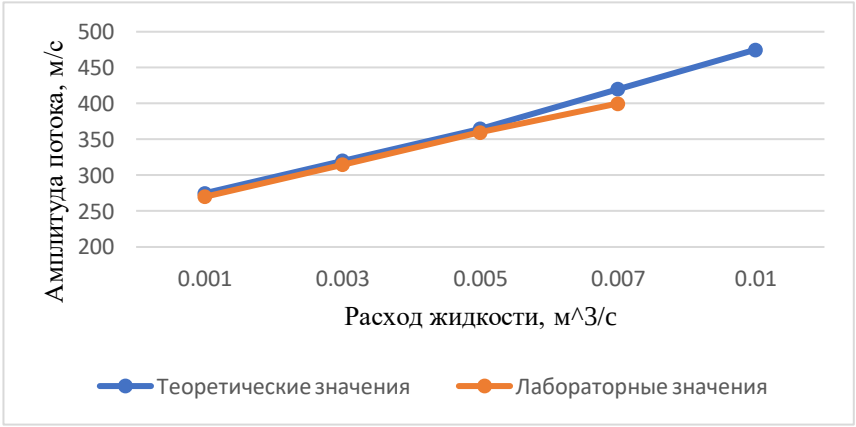


Рисунок 15 – Сопоставление значений теоретических и лабораторных испытаний частоты турбулентного потока в зависимости от расхода жидкости