

На правах рукописи



САФРАЙДЕР АЛИНА ИЛЬДАРОВНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПРОХОДКИ
СКВАЖИН НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ
ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МАТЕРИАЛОВ
БУРИЛЬНЫХ ТРУБ**

Специальности 2.8.2. Технология бурения и освоения скважин
(технические науки), 2.6.17. Материаловедение (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Уфа – 2021

Работа выполнена на кафедре «Бурение нефтяных и газовых скважин» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель доктор технических наук, доцент
Аглиуллин Ахтям Халимович

Научный консультант доктор технических наук, доцент
Латыпов Олег Ренатович

Официальные оппоненты: **Симонянц Сергей Липаритович**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»/ кафедра бурения нефтяных и газовых скважин, профессор

Пояркова Екатерина Васильевна
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»/ кафедра механики материалов, конструкций и машин, заведующая кафедрой

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (г. Самара)

Защита диссертации состоится « 09 » декабря 2021 г. в 14:30 час. на заседании диссертационного совета 24.2.428.03 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте www.rusoil.net

Автореферат диссертации разослан « _____ » _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Султанов Шамиль Ханифович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время большинство нефтегазовых месторождений РФ находятся на поздней стадии разработки. В этих условиях характерным является строительство скважин сложного профиля, многозабойных скважин, освоение шельфа, в том числе - северных морей. За последние два десятилетия объём проходки в горизонтальном бурении вырос на 70 %, что явилось драйвером роста рынка бурения и связанного с ним комплекса предоставляемых услуг. Однако несомненному прогрессу в этом направлении сопутствуют необходимость совершенствования техники и технологий безаварийного ведения буровых работ, применения компоновки бурильной колонны с повышенным ресурсом, оптимизации свойств буровой среды при проходке протяженных горизонтальных участков. В значительной степени преодолеть данные проблемы при бурении сложнопрофильных скважин позволило бы применение бурильных труб из специальных алюминиевых сплавов (легкосплавные бурильные трубы).

Применяемые на практике бурильные трубы в условиях протяженных горизонтальных стволов скважин не всегда обеспечивают устойчивость последних (возникновение обвалов стенок скважины, желобообразование и т.п.), возможны также прихваты и слом бурильного инструмента при проведении технологических операций в скважине. Назрела необходимость применения перспективных технологий получения алюминиевых сплавов со структурой, обеспечивающей бурильным трубам повышенные механические свойства, что позволило бы осуществлять бурение горизонтальных скважин большей протяженности, с меньшими потерями на трение, а также эффективную очистку ствола скважины от выбуренной породы. С нашей точки зрения, повышение механических свойств алюминиевых сплавов, используемых для изготовления бурильных труб, вполне осуществимо посредством уменьшения размера зерна до субмикроструктурных величин. Однако вопросы влияния размера зерна алюминиевых сплавов на триботехнические свойства и коррозионную стойкость бурильных труб в буровых промывочных жидкостях остаются малоизученными.

В ходе бурения скважин под воздействием агрессивных технологических жидкостей происходит коррозия внутренней и внешней поверхностях бурильных труб, что приводит к интенсивной эрозии их стенок. В сочетании со сложным напряженно-деформированным состоянием бурильной колонны в горизонтальном стволе это приводит к выходу из строя бурильного инструмента в целом. В связи с этим совершенствование компоновки бурильного инструмента, технических средств бурения на основе разработки и применения новых материалов для изготовления бурильных труб с повышенными механическими характеристиками, а также рекомендаций по снижению коррозионной активности промывочных жидкостей является актуальной и перспективной проблемой для нефтегазовой отрасли.

Степень разработанности исследуемого направления

Анализ литературы в области практической применимости легкосплавных бурильных труб в процессе бурения сложнопрофильных скважин в составе бурильной колонны, исследования путей повышения коррозионной стойкости и износостойкости материалов легкосплавных бурильных труб (ЛБТ) и методов оценки влияния различных факторов на их эксплуатационные характеристики свидетельствует о большом научном и практическом вкладе в развитие отечественных ученых и специалистов как Файна Г.М., Басовича В.С., Буяновского И.Н., Тихонова В.С., Штамбургом В.Ф., Томашевым Н.Д., Ребиндером П.А., Фуксом Г.И., Гельфгатом М.Я., Тихоновым В.С., Чижиковым В.В.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспортам специальностей ВАК Минобрнауки России 2.8.2. Технология бурения и освоения скважин (технические науки), а именно: **п. 3** «Физико-химические процессы в горных породах, буровых и цементных растворах с целью разработки научных основ обоснования и оптимизации рецептур технологических жидкостей, химических реагентов и материалов для строительства скважин», **п.5** «Моделирование и автоматизация процессов бурения и освоения скважин при углублении ствола, вскрытии и разобщении пластов, освоении продуктивных горизонтов,

ремонтно-восстановительных работах, предупреждении и ликвидации осложнений» и 2.6.17. Материаловедение (технические науки), а именно: п. 6 «Разработка и совершенствование методов исследования и контроля структуры, испытание и определение физико-механических и эксплуатационных свойств материалов на образцах и изделиях».

Цель работы

Повышение работоспособности компоновки бурильной колонны для проводки горизонтальных скважин посредством применения алюминиевых бурильных труб с повышенными механическими характеристиками и снижения коррозионной активности буровой промывочной жидкости.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

1 Моделирование процесса бурения при выборе рациональных компоновок бурильной колонны для обеспечения проектной траектории ствола скважины.

2 Исследование механических и триботехнических свойств, а также коррозионной стойкости алюминиевых сплавов при контакте с буровой промывочной жидкостью применительно к различным типам движения бурильной колонны в условиях её взаимодействия с внутренней поверхностью обсадной колонны и в открытом стволе скважины.

3 Исследование влияния интенсивной пластической деформации на формирование мелкозернистой структуры алюминиевого сплава Д16Т и ее взаимосвязи с механическими свойствами данного сплава после проведения равноканально-углового прессования.

Научная новизна

1 Предложена усовершенствованная математическая модель для расчета комбинированной бурильной колонны, состоящей из стальных труб на вертикальном и криволинейном участках скважины и легкосплавных труб на ее горизонтальном участке, которая на основании аналитических решений соответствующих уравнений позволила показать, что коэффициент запаса прочности данной конструкции колонны может быть увеличен на 22 % при условии повышения механических свойств ($\sigma_{0,2}$, σ_b , δ , HRB) легкосплавных труб в среднем на 10 %,

снижения скорости изнашивания a – на 15 % и уменьшения скорости коррозии металла K^m в 2 раза.

2 Экспериментально установлено, что значения характеристик механических свойств, износостойкости и коррозионной стойкости алюминиевых сплавов, полученных посредством их обработки методом интенсивной пластической деформации, соответствуют приведенным выше расчетным величинам. В сплаве Д16Т и алюминий-литиевых сплавах 1420, 1421 и 1460 в результате сверхпластической деформации формируются мелкозернистая и субмикроструктурная структуры, которые и обеспечивают существенное упрочнение этих сплавов с одновременным ростом их износостойкости и коррозионной стойкости. Формирование таких свойств у материалов легкосплавных труб при проведении интенсивной пластической деформации служит доказательной базой перспективности их использования для замены обычных алюминиевых труб на горизонтальных участках скважины.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в создании корректной математической модели для расчета комбинированной буровой колонны в случае, когда на горизонтальном участке скважины могут использоваться алюминиевые трубы из упрочненных методом интенсивной пластической деформации материалов, а также в экспериментальном обосновании формирования в них при этом мелкозернистой и субмикроструктурной структур, обеспечивающих преимущество по ряду характеристик над широко применяемыми алюминиевыми трубами.

Практическая значимость:

1 Разработана методика определения механических, триботехнических свойств и коррозионной стойкости алюминиевого сплава после интенсивной пластической деформации, которая на основании подписанного с ФГБОУ ВО УГНТУ трехстороннего соглашения № И13/2019 о научно-техническом сотрудничестве от 20.02.2019 г. рекомендована к применению в АО «Аркин СМЗ» (г. Самара) и АО «ССК» (г. Москва) в процессах изготовления и применения

легкосплавных труб и трубных заготовок.

2 Результаты проведенных исследований используются в учебном процессе кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин» ФГБОУ ВО УГНТУ при выполнении лабораторных и научно-исследовательских работ, подготовке лекций по дисциплинам «Технология бурения нефтяных и газовых скважин», «Буровые промывочные жидкости» и написании выпускных квалифицированных работ, дипломных проектов и магистерских диссертаций. Разработано и опубликовано учебно-методическое пособие «Расчет бурильной колонны для скважин пространственного профиля с горизонтальным окончанием».

Методология и методы исследования

В работе использовались следующие методы: для расчета напряжений в бурильной колонне - числовое моделирование и программное обеспечение Landmark (Wellplan, Compass); для определения триботехнических свойств материалов - методы измерения коэффициентов трения и интенсивности изнашивания при вращательном и возвратно-поступательном движении бурильной колонны на машинах трениях АИ-3М, УМТ-2168, Fann Model 212, ИИ-5018; для исследования коррозии - гравиметрический метод (ГОСТ 9.506-87), потенциостат Elinx P-30J. Субмикроструктурную структуру алюминиевых сплавов получали методом равноканально-углового прессования. Их микроструктуру наблюдали методом просвечивающей микроскопии на электронном микроскопе JEM-2000 EX. Твердость алюминиевых сплавов определяли методом Роквелла, а пределы прочности и текучести - эмпирическими методами М.С. Дрозда.

Положения, выносимые на защиту:

1 Теоретическое обоснование выбора рациональной компоновки бурильной колонны на основе предлагаемой математической модели с использованием легкосплавных бурильных труб с улучшенными механическими, триботехническими свойствами и повышенной коррозионной стойкостью.

2 Способ и средства улучшения механических свойств, коррозионной стойкости и износостойкости алюминиевых сплавов за счет реализации метода интенсивной пластической деформации.

3 Результаты исследования свойств буровых промывочных жидкостей и материалов, применяемых для улучшения эксплуатационных характеристик бурильного инструмента.

Степень достоверности и апробация результатов

Степень достоверности результатов заключается в использовании апробированных и оригинальных методик, результатов экспериментальных испытаний на стендовых установках, прошедших государственную проверку, численных методов расчета и лицензированных программных комплексов, сертифицированных по ГОСТ и стандартам API, которые подтвердили достоверность результатов расчета в минимальном процентном расхождении. Полученные данные исследований обрабатывались с помощью подходов теории ошибок эксперимента.

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждались: на конференции «Материалы для технических устройств и конструкций, применяемых в Арктике» во Всероссийском институте авиационных материалов (Москва, 2015); международной научно-практической конференции «Научные исследования и разработки в эпоху глобализации» (Пермь, 2016); 13 международной конференции и выставке по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ «RAO/CIS Offshore» и пленарном заседании конференции «Реализация шельфовых проектов – драйвер промышленного и экономического развития» (Санкт-Петербург, 2017); 3 международной выставке и конференции по судостроению и развитию инфраструктуры континентального шельфа Offshore Marintec Russia (Санкт-Петербург, 2018); пленарном заседании конференции «Севморпуть – Основа комплексного развития Арктической зоны РФ» (Санкт-Петербург, 2018); международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых Тюменского индустриального университета (Тюмень, 2019).

Публикации

По результатам работы опубликовано 18 научных трудов, в том числе

4 статьи - в российских периодических изданиях, включенных в перечень ВАК Министерства образования и науки РФ и 3 статьи - в журналах, включенных в международные базы данных SCOPUS и Web of Science. Получен патент РФ на изобретение.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка, включающего 148 наименований, и 1 приложения. Объем диссертации составляет 154 страниц машинописного текста и содержит 26 таблиц и 43 иллюстрации.

Работа выполнена при содействии Минобрнауки России по соглашению (№ 075-15-2020-900) в рамках программы развития Научного центра мирового уровня (НЦМУ).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цель и основные задачи, показаны научная новизна и практическая ценность.

В **первой главе** проведена оценка условий работы бурильной колонны с учетом факторов воздействия возникающих напряжений и усталостного разрушения металла, в первую очередь – бурильных труб, которые играют ключевую роль при создании нагрузки на породоразрушающий инструмент.

На основе подходов, изложенных в работах Г.М. Файна, выполнен анализ практической применимости легкосплавных бурильных труб в составе бурильной колонны и тех преимуществ, которые отмечаются при их использовании. В 1970 г. центром инновационных работ по применению легкосплавных бурильных труб была Кольская сверхглубокая скважина, протяженностью более 12 км. В период с 1983 до 2011 гг. технология применения легкосплавных бурильных труб повышенной надежности в морских и континентальных условиях разрабатывалась ЗАО «Акватик», а затем ООО «Акватик-Бурильные трубы». Установлено, что при бурении наклонных и горизонтальных скважин использование такого вида бурильных труб позволяет снизить

силы сопротивления перемещению бурильной колонны в скважине и в итоге увеличить длину горизонтального участка. В работах В.С. Басовича, И.Н. Буяновского, В.С. Тихонова и др. показан позитивный эффект от применения труб типа легкосплавных бурильных труб повышенной надежности (ЛБТПН) в составе комбинированных бурильных колонн. Например, расчеты, проведенные на отметке 3135 м в направленной скважине длиной 3249 м при наличии в нижней части бурильной колонны 770 м ЛБТПН 90 × 9П, выявили снижение значений основных параметров, отражающих напряженно-деформированное состояние металла бурильной колонны, в 1,3–1,8 раза.

Существенное влияние на условия работы бурильной колонны оказывают технологическая среда и свойства горной породы. В процессе вращения колонны имеет место трение бурильных труб о внутреннюю стенку обсадной трубы или открытого ствола скважины, что впоследствии может привести к механическому износу обсадной и бурильной колонн. Аналитическая зависимость центробежной силы от веса бурильной колонны показывает, что эта сила прямо пропорциональна весу колонны и частоте ее вращения. Поэтому при создании большой нагрузки увеличивается изгиб колонны, происходят потеря ее устойчивости и неравномерное искривление скважины, а также недоведение нагрузки до породоразрушающего инструмента. Кроме того, возможны образование желобов и рост вероятности слома бурильного инструмента.

Среди факторов, определяющих технико-экономические показатели проводки и строительства скважин, важное место занимает надежность работы бурильных труб. С нашей точки зрения, наиболее перспективным направлением является повышение прочностных свойств легкосплавных бурильных труб посредством разработки и применения инновационных технологий упрочнения алюминиевых сплавов и модификации буровых промывочных жидкостей.

Известны работы отечественных и зарубежных ученых по упрочнению алюминиевых сплавов, внедрению новых методик получения высокопрочных материалов бурильных труб, улучшающих их износостойкость и коррозионную стойкость. В частности, эффективным способом получения высокопрочного

состояния материала труб является измельчение зерна до субмикроструктурных (0,1–1 мкм) и нанокристаллических (менее 100 нм) размеров (по классификации Б.М. Балояна) в композиционных и легированных сплавах с помощью интенсивной пластической деформации (ИПД).

Значительный вклад в исследование повышения прочностных характеристик алюминиевых сплавов методом ИПД внесли такие отечественные и зарубежные ученые как О.А. Кайбышев, Р.З. Валиев, Р.И. Кузнецов, Р.Ш. Мусалимов, Н.К. Ценев, Г.И. Рааб, Н. Miyamoto, В.С. Atlan, Т. Lowe, М.Ј. Zehetbauer, С.С. Koch.

Вопросы применения легкосплавных бурильных труб при строительстве скважин, исследование путей повышения коррозионной стойкости и износостойкости материалов ЛБТ и методы оценки влияния различных факторов на их эксплуатационные характеристики базируются на фундаментальных результатах, полученных Г.М. Файном, В.Ф. Штамбургом, С.М. Данелянцем, Б.И. Костецким, Н.Д. Томашевым, П.А. Ребиндером, Г.И. Фуксом, В.С. Басовичем, М.Я. Гельфгатом, В.С. Тихоновым, В.В. Чижиковым и другими инженерами и исследователями.

Проблемы взаимодействия бурильного инструмента и буровых промывочных жидкостей при строительстве скважин, пути улучшения их антифрикционных и противоизносных свойств рассмотрены в работах Г.В. Конесева, М.Р. Мавлютова, А.И. Спивака, Б.И. Костецкого, Г.М. Эрлика, Г.И. Фукса, Ф.П. Боудена, Д. Тэйбора, Y. Meng.

Одним из эффективных способов снижения коэффициента трения и износа бурильных колонн в горизонтальных скважинах является применение смазочных добавок для обработки промывочных жидкостей. В горизонтальном стволе скважины бурильная колонна лежит на нижней стенке, что увеличивает сопротивление движению инструмента и создает проблемы в передаче нагрузки на долото. Поэтому для уменьшения силы трения необходимо либо снизить коэффициент трения, либо нагрузку, либо оба этих фактора, влияющих на силу трения. Применение ЛБТ позволяет снизить вес колонны почти в три раза, а

оптимальная концентрация ПАВ в буровом растворе – уменьшить крутящий момент и облегчить движение бурильного инструмента.

Во **второй главе** обоснован выбор методик исследования, а также предложена математическая модель для расчета комбинированной бурильной колонны, состоящей из стальных труб на вертикальном и криволинейном участках скважины и легкосплавных труб на ее горизонтальном участке. Полученные аналитические выражения для квазистатического режима бурения позволили на основе подхода В.К. Хегая получить решения для горизонтального профиля, состоящего из трех участков: вертикального, криволинейного (участка набора зенитного угла) и горизонтального при значении зенитного угла $\alpha_2^* = 0,5\pi$.

Начальные и граничные условия предложенной нами модели отличаются от таковых в подходе В.К. Хегая эффективными коэффициентами трения с соответствующими внешними диаметрами колонн и коэффициентами трения при не вращающейся колонне для криволинейного и горизонтального участков. Для вертикального участка скважины уравнение В.К. Хегая остается без изменений. Для криволинейного участка запишем следующие начальные и граничные условия:

$$\frac{dN_2}{d\alpha_2} + k_1^* N_2 = qR_2(k_1^* \sin \alpha_2 - \cos \alpha_2), \quad \alpha_2 \in [0, \alpha_2^*],$$

$$\alpha_2 = 0: N_2(0) = N_1(l), \quad \alpha_2 = \alpha_2^* = 0,5\pi: N_2(\alpha_2^*) = N_3(0),$$

где N_1, N_2, N_3 – осевые усилия на вертикальном, криволинейном и горизонтальном участках, кН; q – погонный вес бурильной трубы, Н/м; α_2, α_2^* – зенитные углы, град.; k_1^* – эффективный коэффициент трения на криволинейном участке; R_2 – радиус кривизны криволинейного участка, м; l – длина вертикального участка бурильной колонны, м.

Для горизонтального участка профиля получаем:

$$\frac{dN_3}{ds_3} = q(k_2^* \sin \alpha_2^* - \cos \alpha_2^*), \quad s_3 \in [0, L],$$

$$S_3 = 0: N_3(0) = N_2(\alpha_2^*), \quad 6) S_3 = L: N_3(L) = -P,$$

где k_2^* – эффективные коэффициенты трения на горизонтальном участке; S_3 – расстояние между текущим поперечным сечением бурильной колонны и устьем скважины, м; l_2, L – длина криволинейного и горизонтального участков, м; P – усилие, приложенное к нижнему торцу колонны, кН.

Полученные уравнения позволяют решать практические задачи по определению осевой нагрузки на забой и момента вращения при роторном бурении скважин с горизонтальным окончанием. С учетом начальных и граничных условий, учитывающих разнотипные по геометрическим характеристикам, плотности материала (вес погонного метра) и модулю упругости (в случае определения осевого усилия) бурильные трубы, получили следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} P = \left(Q_1 - N_0 - \frac{4k_1^* Q_2}{\pi(1+k_1^{*2})} \right) e^{-0,5\pi k_1^*} + \frac{2(1-k_1^{*2})}{\pi(1+k_1^{*2})} Q_2 - k_2^* Q_3, \\ M_0 = M_n(P, n) + \frac{nD_1^2 k_1^*}{4v_s} \left[\frac{4 Q_2}{\pi(1+k_1^{*2})} (e^{-0,5\pi k_1^*} + k_1^*) + \frac{Q_1 - N_0}{k_1^*} (1 - e^{-0,5\pi k_1^*}) \right] + \frac{nD_2^2 k_2^*}{4v_s} Q_3, \end{cases}$$

где Q_1, Q_2, Q_3 , – сила тяжести участков бурильной колонны, тонн; N_0, M_0 – осевое усилие, приложенное к торцу начала вертикального участка и момент вращения на роторе (на торце вертикального участка), кН, кН·м; M_n – абсолютное значение момента на роторе, кН·м; $M_n(P, n_0)$ – момент сопротивления вращению породоразрушающего инструмента со стороны забойной точки, кН·м; D_1, D_2 – внешние диаметры бурильной колонны из стальных и легкосплавных труб на криволинейном и горизонтальном участках, м; v_s – скорость поступательного движения бурильной колонны, м/с; n – угловая скорость, с⁻¹.

Теоретическая применимость комбинированной колонны подтверждается оценкой ее работы, приближенной к реальным условиям в скважинах с горизонтальным окончанием, с помощью аналитических и компьютерных расчетов и выбора ее составных элементов (по Р.Х. Санникову и с использованием программного обеспечения Landmark, Wellplan). Показано, что

при бурении конечного интервала долотом диаметром 155,6 мм использование легкосплавных бурильных труб из алюминиевого сплава Д16Т в составе комбинированной колонны по сравнению со стальными обеспечивает наибольший запас прочности на растяжение при подъеме колонны и снижение значений основных параметров напряженно-деформированного состояния ее металла (Таблица 1). Обусловлено это тем, что при увеличении протяженности горизонтального участка, бурение таких скважин со стальной колонной вызывает затруднения, связанные с потерей продольной устойчивости труб и недоведением нагрузки до долота. При определенном соотношении длин труб, расположенных на горизонтальном и вертикальном участках скважины, а также их известном местоположении на участках с зенитным углом больше 60° предпочтительно использовать колонны из алюминиевых труб, а для обеспечения осевой нагрузки на долото – из стальных труб на вышележащих участках скважины.

Таблица 1 – Расчетные показатели характеристик различных компоновок бурильной колонны

Показатели колонны при бурении на глубине 3878 м	Компоновка колонны			Изменение показателей, %
	Стальная	Легкосплавная	Комбинированная	
Вес колонны в промывочной жидкости, кг	73820	34880	58140	↓ 21
Нагрузка в опасном сечении, кН	531	291	378	↓ 28
Максимальный изгибающий момент, кН · м	8,54	1,38	7,96	↓ 7
Коэффициент запаса прочности при подъеме колонны	4,28	2,25	5,24	↑ 22

На основании представленных выше расчетов сформулированы и обоснованы выбор объектов исследования и методики для получения и изучения различных структур алюминиевых сплавов, а также определения их триботехнических свойств и коррозионной стойкости в разных промывочных жидкостях.

Для формирования в данных сплавах соответствующих структур, обеспечивающих их сверхпластичность, нами использован известный метод ИПД – равноканально-угловое прессование (РКУП). Информацию о структуре материалов получали с помощью методов просвечивающей электронной микроскопии.

На образцах из промышленных алюминиево-литиевых сплавов 1420 (92,18 % *Al* - 5,5 % *Mg* - 2,2 % *Li* - 0,12 % *Zr*), 1460 (95,18 % *Al* - 2,5 % *Cu* - 2,2 % *Li* - 0,12 % *Zr*), 1421 (94,18 % *Al* - 5,5 % *Li* - 0,12 % *Zr* - 0,2 % *Sc*), для оценки возможности их последующего использования в изготовлении ЛБТ, как наиболее легких и прочных на 15 - 20%, и используемого в бурении сплава Д16Т, выбранных в качестве модельных материалов, исследовано влияние размера зерна на их механические, триботехнические свойства, а также коррозионную стойкость в различных промывочных жидкостях.

Проведены исследования триботехнических параметров данных материалов и буровых промывочных жидкостей, в ходе которых осуществлено моделирование физического процесса трения между бурильными, обсадными трубами и горной породой.

Исследование коррозионной стойкости алюминиевых сплавов осуществляли гравиметрическим методом (ГОСТ 9.506-87) с использованием климатической камеры.

В **третьей главе** приведены результаты исследования влияния промывочной жидкости с различным *pH* на триботехнические свойства и коррозионную стойкость алюминиевых сплавов. Методами планирования эксперимента установлена наиболее приемлемая рецептура смазочного реагента для промывочной жидкости применительно к трению легкосплавных бурильных труб о внутреннюю поверхность обсадных труб.

В экспериментах по определению триботехнических свойств алюминиевых сплавов при их взаимодействии с обсадной колонной и горной породой использовали широко применяемые промывочные жидкости:

– полимерный глинистый раствор (ПГР): техническая вода + 4 % бентонит

+ 0,2 % частично гидролизованый полиакриламид (ЧГПАА) + 0,3 % полиакрилонитрил (ПАН) + 0,1 % $NaOH$;

– ингибированный глинистый раствор (ИГР): техническая вода + 8 % бентонит + 0,1 % $NaOH$ + 0,2 % Na_2CO_3 + 0,5 % карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ) + 0,1 % нитрилотриметилфосфоновая кислота (НТФ) + 2 % KCl + 35 % мел + 1 % смазочная добавка буровая (СДБур).

Испытывали контрольные образцы горных пород месторождений (керны) и образцы из стали 45, аналогичной сталям, применяемым для изготовления обсадных труб. По критерию абразивности были выбраны керны из доломита (кристаллический, мелкозернистый и малоабразивный).

Показано, что обработка ИГР известной эффективной смазочной добавкой СДБур улучшает триботехнические свойства данного раствора в среднем на 22 % в процессе взаимодействия с горной породой. При этом в технической воде скорость изнашивания металла несоизмеримо выше, чем в ИГР и, тем более, чем в ИГР с добавлением 1 % СДБур (Рисунок 1).

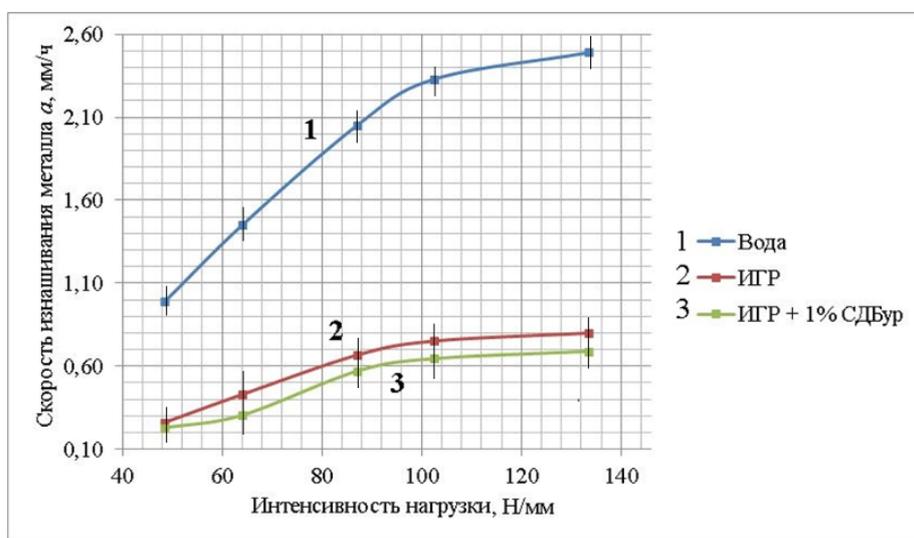


Рисунок 1 – Зависимость скорости изнашивания сплава 1420 до РКУП от интенсивности нагрузки в различных промывочных жидкостях

Установлено также, что при бурении с повышением интенсивности прилагаемой нагрузки скорость изнашивания алюминиевого сплава 1420 (после РКУП о доломит) растет, а коэффициент трения достигает максимума при

нагрузке 87 Н/мм и далее начинает снижаться (Рисунок 2), что связано с разрушением оксидной пленки на металле и отделением слоев оксидов от подложки. Для износа открывающейся ювенильной поверхности требуется уже меньшая удельная энергии, поэтому значения коэффициента трения снижаются.

Аналогичные испытания в паре «легкосплавная буровая труба – обсадная колонна» с введением смазочной добавки «Буринтех лубрикант» (БЛ) показали улучшение противоизносных свойств раствора в среднем в 5 раз при наличии в ПГР добавки БЛ и в 13 раз при наличии БЛ и одновременном проведении ИПД.

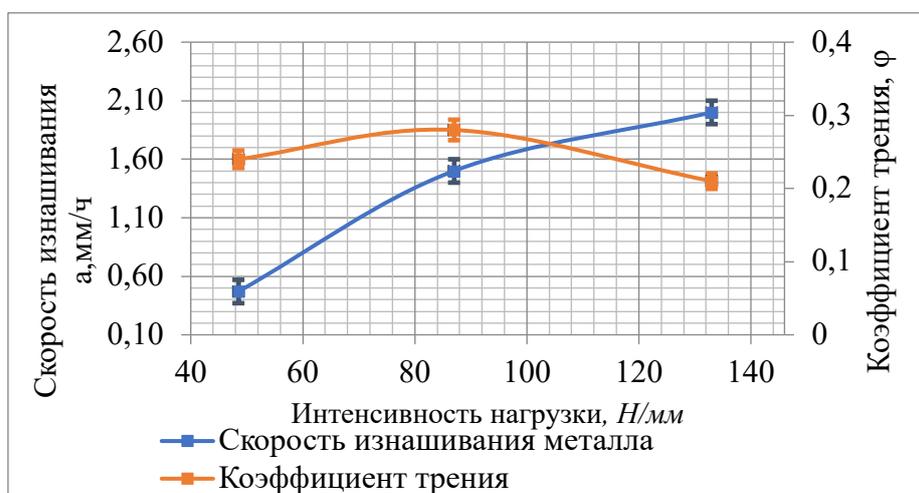


Рисунок 2 – Зависимость скорости изнашивания и коэффициента трения в паре «буровая труба – горная порода» от интенсивности нагрузки в технической воде

В отсутствие БЛ проведение ИПД не столь эффективно, так как приводит к незначительному снижению скорости изнашивания металла (Рисунок 3). Современные исследования по разработке составов смазочных добавок проводятся в основном для пары трения «стальная буровая труба - обсадная колонна», в то время как для пары «легкосплавная буровая труба - обсадная колонна» результаты таких изысканий практически отсутствуют. Поэтому нами была проведена разработка компонентного состава смазочной добавки для данной пары трения. При этом в качестве компонентов разрабатываемой добавки были выбраны вещества, показавшие в исследованиях других авторов высокие

характеристики. Определение оптимального компонентного состава смазочной добавки осуществляли методом планирования эксперимента.

Относительная ошибка измерения скорости изнашивания a составляла 1,7 %, механических характеристик ($\sigma_{0,2}$, σ_b , δ , HRB) – 3,4 %, скорости коррозии металла K^m – 2 %.

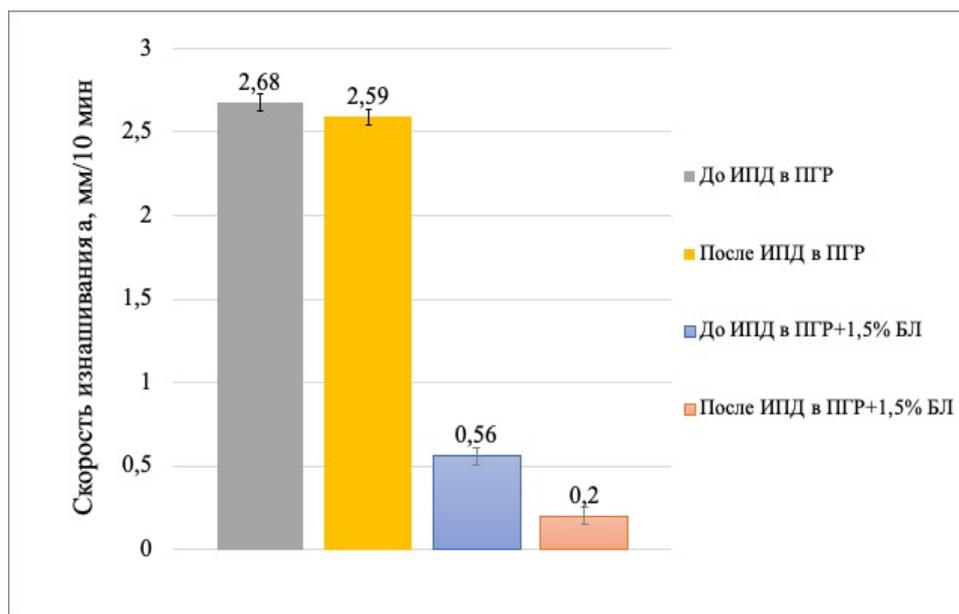


Рисунок 3 – Скорость изнашивания сплава Д16Т до и после ИПД при трении о сталь 45 в среде ПГР с добавкой БЛ

При планировании эксперимента учитывали, что переменные в уравнении регрессии представляют собой концентрации перспективных компонентов смазочной добавки: СВС – смесь высокоатомных спиртов (полигликоли), КТМ – калия таловое масло и ХП – хлорированные парафины. Поскольку данные переменные не являются независимыми, планирование выполняли симплекс-центроидным методом (Зедгинидзе И.Г., Фролов А.М.). Выбор метода обусловлен тем, что сумма концентраций компонентов смазочной добавки всегда постоянна (не может быть ниже или выше 100 %). Был построен трехфакторный симплекс-центроидный план. За критерий оптимизации принимали скорость изнашивания образца трения в среде бурового раствора при

1 %-ной концентрации компонентов.

Уравнение регрессии получили посредством обработки данных эксперимента с помощью программного обеспечения Statistica:

$$a = 0,005928 \cdot A + 0,004930 \cdot B - 0,008397 \cdot C - 0,00015 \cdot A \cdot B + 0,000089 \cdot A \cdot C - 0,000009 \cdot B \cdot C,$$

где a – скорость изнашивания образца алюминиевого сплава, мм/ч;

A – концентрация компонента СВС;

B – концентрация компонента КТМ;

C – концентрация компонента ХП.

Коэффициент обобщенной детерминации $R_{ext} = 0,8708$, то есть максимальное расхождение между данными модели и экспериментальными результатами не превышает 12,92 %.

Уравнение регрессии анализировали с помощью диаграммы Парето.

Поскольку по полученным данным линии погрешности не выявлено, то влияние всех коэффициентов на конечный результат - выше 5 %, все коэффициенты значимые. Выявлено оптимальное соотношение концентраций компонентов в смазочной добавке: СВС – 20 %; КТМ – 60 % и ХП – 20 %.

В ходе гравиметрических испытаний получены зависимости потери массы образцов из сплава Д16Т от pH агрессивной среды и времени (Рисунок 4). В качестве модельного использовали биополимерный раствор (БР) с добавлением гидроксида натрия $NaOH$: техническая вода + 0,1 % Na_2CO_3 + 0,15 % бактерицид + 0,4 % полианионная целлюлоза низкой вязкости (ПАЦ НВ) + 0,4 % ксантановая смола. Различная концентрация $NaOH$ изменяла pH от 7 до 11.

Показано, что в нейтральной среде потеря массы остается неизменной для всех видов образцов сплава. По мере увеличения в растворе концентрации $NaOH$ потеря массы образцов без ИПД растет вследствие растворения в щелочной среде защитной оксидной пленки на поверхности сплава. У образцов из сплава Д16Т после ИПД потеря массы увеличивается со временем незначительно -

сплав корродирует слабо, что можно связать с образованием поверхностных структур, стойких в данной коррозионной среде.

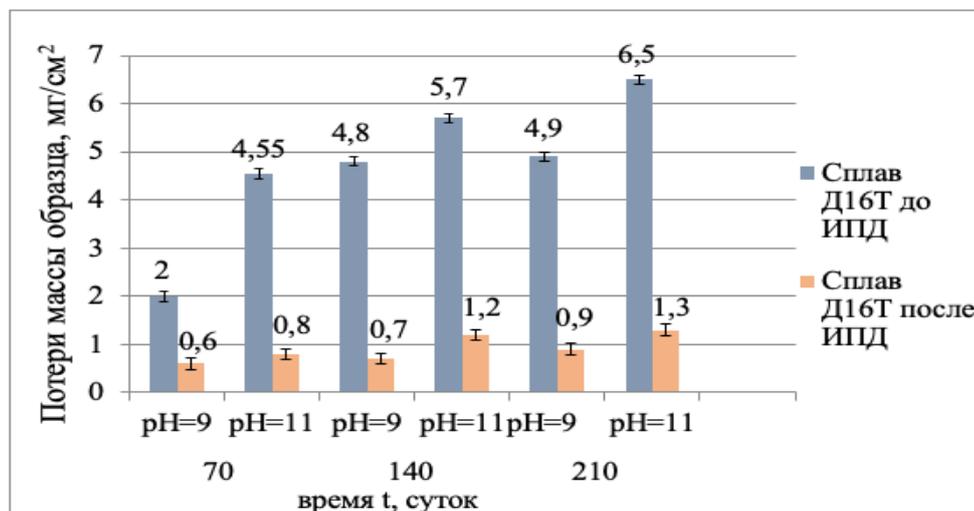


Рисунок 4 – Потеря массы образцов из сплава Д16Т в зависимости от pH среды и времени

Температурные испытания сплава Д16Т не проводились, так как геотермический градиент, обозначающий прирост температуры горной породы в °С на единицу глубины, изменяется в среднем за единицу глубины 100 м на 2,7 °С. Для среднестатистической скважины глубиной по вертикали до 3000 м температурный градиент на забое составит 81 °С, при этом максимально допустимая рабочая температура алюминиевых сплавов соответствует 120–220 °С.

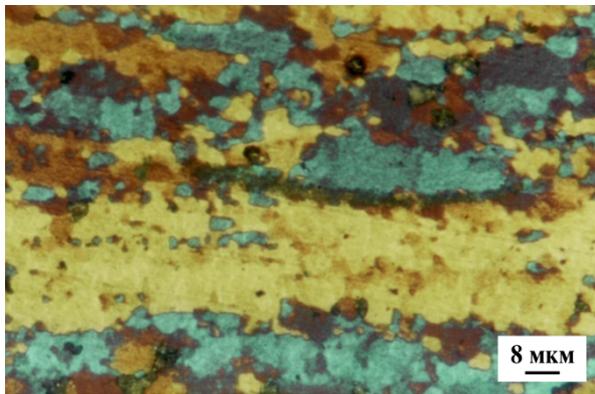
Механические характеристики металлических образцов определяли методом М.С. Дрозда, относящимся к первому классу измерения твердости, которая характеризует упрочняемость материала и оценивается коэффициентом упрочнения или равномерной деформации на растяжение. После измерения значений твердости образцов HRB определяли σ_b , $\sigma_{0,2}$ и δ с помощью нового числа твердости (Таблица 2).

Приведенные в Таблице 2 результаты нашли подтверждение при проведении металлографических и электронномикроскопических исследований структуры сплава Д16Т.

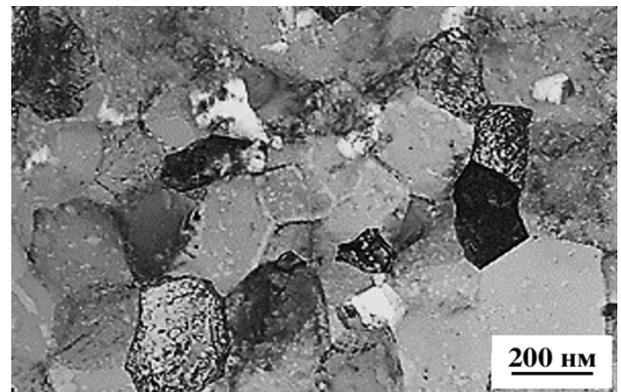
На Рисунке 5 представлена микроструктура сплава Д16Т в исходном состоянии и после ИПД.

Таблица 2 – Механические характеристики алюминиевого сплава Д16Т

Условия испытаний и pH среды	HRB	σ_6 , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
До ИПД при $pH = 7$	74,28	434,52	396,13	31,07
$pH = 9$	60,48	342,65	317,50	37,00
$pH = 11$	49,22	288,35	273,24	41,66
После ИПД при $pH = 7$	83,32	519,27	472,85	27,01
$pH = 9$	66,54	378,73	347,82	34,43
$pH = 11$	54,74	313,19	293,28	39,39



а)



б)

Рисунок 5 – Микроструктура сплава Д16Т: а) исходная; б) после ИПД

Оптической металлографией в поляризованном свете установлено, что микроструктура в исходном состоянии является частично рекристаллизованной со средним размером зерна 8 мкм (Рисунок 5, а). Проведение ИПД приводит к измельчению зерна более чем в 40 раз (Рисунок 5, б). Средний размер зерна составляет 0,2 мкм. Согласно уравнению Холла-Пэтча, такое измельчение вызывает существенное повышение механических свойств сплава, что подтверждается данными измерения значений его твёрдости (Таблица 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Анализ выбора оптимальной компоновки бурильной колонны на основе системных расчетов с помощью разработанной математической модели при квазистатическом режиме бурения показал эффективность применения

комбинированной компоновки. Показано, что на участках с зенитным углом, превышающим 60° , более эффективно использовать алюминиевые трубы, а для формирования осевой нагрузки на долото применять в вышележащих участках стальную колонну. Согласно проведенным расчетам, комбинированная бурильная колонна, включающая легкосплавные трубы, может обеспечить возможность строительства скважин с увеличенным горизонтальным отходом от вертикали и с повышением коэффициента запаса прочности до 22 %.

2 При моделировании вращательного и возвратно-поступательного движения бурильной колонны в условиях контакта с обсаженным участком и открытым стволом скважины установлено повышение износостойкости образцов сплава Д16Т на 22 % соответственно, снижение скорости их изнашивания и коэффициента трения в тринадцать раз за счет применения материалов с более высокими механическими, триботехническими свойствами и коррозионной стойкостью.

3 Экспериментально подтверждены возможность и перспективность использования метода интенсивной пластической деформации с целью повышения механических свойств алюминиевых сплавов и их коррозионной стойкости. Так, уменьшение размера зерна сплава Д16Т в сорок раз приводит к росту твердости материала на 11,6 % и предела текучести на 11,5 %, что обеспечит существенное увеличение ресурса легкосплавных труб при бурении сложнопрофильных скважин. При этом верхний предел pH контактирующей с алюминиевым сплавом буровой промывочной жидкости может быть увеличен до 11. При таких значениях pH скорость коррозии металла алюминиевых труб, не прошедших обработку интенсивной пластической деформацией, в два раза выше.

Содержание работы опубликовано в следующих научных трудах:

- в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, выпускаемых в РФ, в соответствии с требованиями ВАК Минобрнауки России

1 Сафрайдер, А.И. К вопросу о разрушении легкосплавных бурильных труб / **А.И. Сафрайдер**, Р.А. Исмаков, А.Х. Аглиуллин, С.Н. Ценева, Н.К. Ценев // Нефтегазовое дело. – 2019. – Т. 17, № 2. – С. 42–49.

2 Сафрайдер, А.И. Улучшение показателей строительства скважин повышением работоспособности легкосплавных бурильных труб при эксплуатации в различных буровых промывочных жидкостях / **А.И. Сафрайдер**, Р.А. Исмаков, А.Х. Аглиуллин, М.Н. Назарова,

Н.К. Ценев // НТЖ «Наука и техника в газовой промышленности». – 2019. – № 2 (78). – С. 12–20.

3 Сафрайдер, А.И. Подбор компоновки бурильной колонны для строительства скважины сложного профиля с удлиненным горизонтальным участком / Р.А. Исмаков, А.Х. Аглиуллин, **А.И. Сафрайдер**, Р.М. Тимиров // НТЖ «Наука и техника в газовой промышленности». – 2019. – № 3(79). – С. 20–25.

4 Сафрайдер, А.И. Применение легкосплавных бурильных труб при бурении наклонно-направленных скважин/ **А.И. Сафрайдер**, С.С. Чернуха // НТЖ «Наука и техника в газовой промышленности». – 2020. – № 1. – С. 3-6.

- в рецензируемых научных журналах, включенных в международные базы данных SCOPUS и Web of Science

5 Шакирова, А.И. (Сафрайдер, А.И.). Комплексное изучение материалов алюминиевых бурильных труб / **А.И. Шакирова (А.И. Сафрайдер)**, Р.А. Исмаков, А.Х. Аглиуллин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328, № 2. – С. 95–103.

6 Сафрайдер, А.И. Коррозионные аспекты повышения физико-механических свойств материалов легкосплавных бурильных труб / А.Х. Аглиуллин, Р.А. Исмаков, В.В. Леонов, **А.И. Сафрайдер** // Горный журнал. – 2019. – №7. – С. 85–89.

7 Shakirova, A.I. (Safraider, A.I.). Innovative approaches to light-alloy drill pipes modification for drilling in abnormal operating conditions / M.N. Nazarova, **A.I. Shakirova (A.I. Safraider)**, R.A. Ismakov, A.Kh. Agliullin, N.K. Tsenev // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources, 2019, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-367-85720-2, P. 860-863.

- в материалах различных научно-технических конференций и семинаров

8 Сафрайдер, А.И. Модификация легкосплавных бурильных труб для бурения в осложненных геологических условиях. / **А.И. Сафрайдер**, М.Н. Назарова, А.Р. Хафизов. VII Междунар. науч.-практ. конф. «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020» Санкт-Петербургский горный университет, 2020, С.119-122.

9 Шакирова, А.И. (Сафрайдер, А.И.). О перспективных направлениях совершенствования технологий изготовления алюминиевых бурильных труб для работы в условиях Арктики / **А.И. Шакирова (А.И. Сафрайдер)**, М.Н. Назарова, Р.А. Исмаков, А.Р. Хафизов, Н.К. Ценев. // В сборнике: Материалы для технических устройств и конструкций, применяемых в Арктике. Сб. докладов конф. ФГУП ВИАМ. – 2015, С.23.

10 Shakirova, A.I. (Safraider, A.I.). Investigation of tribotechnical and corrosion behavior of material for light-alloy drill pipes / **A.I. Shakirova (A.I. Safraider)**, R.A. Ismakov, A.Kh. Agliullin, N.K. Tsenev // Arctic Environmental Research. – 2018. – V. 18, No. 1. – P. 21–27.

11 Шакирова, А.И. (Сафрайдер, А.И.). Техничко-технологические решения по повышению эффективности бурения сложнопрофильных скважин на суше и на море / **А.И. Шакирова (А.И. Сафрайдер)**, Р.А. Исмаков, А.Х. Аглиуллин, Н.К. Ценев. // 3 Междунар. конф. и

выставка по судостроению и разработке высокотехнологичного оборудования для шельфа, Offshore Marintec Russia–2018. Сб. трудов конф. – 2018. – С. 182–186.

12 Шакирова, А.И. (Сафрайдер, А.И.). Состояние материала элементов компоновки буровой колонны при бурении в осложненных условиях / **А.И. Шакирова (А.И. Сафрайдер)**, М.Н. Назарова, Р.А. Исмаков, А.Г. Палаев. // В книге: Бурение скважин в осложненных условиях. Санкт-Петербургский горный университет. – 2017. – С. 68-69.

13 Шакирова, А.И. (Сафрайдер, А.И.). Перспективные применения легкосплавных буровых труб в условиях Крайнего Севера и Арктики/ **А.И. Шакирова (А.И. Сафрайдер)**, Р.А. Исмаков, А.Х. Аглиуллин, Н.К. Ценев. // Труды 13 Междунар. конф. и выставки по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ (RAO / CIS Offshore 2017). Санкт-Петербург — СПб: Химиздат. – 2017. — С. 314-318.

14 Шакирова, А.И. (Сафрайдер, А.И.). Совершенствование технологии по изготовлению алюминиевых буровых труб/ Инновационные технологии в машиностроении сборник трудов VIII Междунар. науч.-практ. конф. Юргинский технологический институт. Издательство НИТПУ (Томск). – 2017. – С.63-66.

15 Сафрайдер, А.И. Коррозионная стойкость алюминиевого сплава, обработанного методом интенсивной пластической деформации / **А.И. Сафрайдер**, О.Р. Латыпов, А.Х. Аглиуллин // В сб.: Новые технологии – нефтегазовому региону. Матер. Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. - Тюмень. – 2019. – С. 141–143.

16 Сафрайдер, А.И. Испытания на коррозию алюминиевого сплава электрохимическим методом / **А.И. Сафрайдер**, О.Р. Латыпов, А.Х. Аглиуллин // Матер. 70 науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. – 2019. – С. 274.

17 Сафрайдер, А.И. Комплексный подход на стадии строительства сверхглубоких скважин с использованием облегченной буровой колонны при освоении морских месторождений / **А.И. Сафрайдер**, Р.А. Исмаков, А.Х. Аглиуллин, Н.К. Ценев // Труды 14 Междунар. конф. и выставки по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа, г. Санкт-Петербург — СПб.: Химиздат. – 2019. – С. 21.

Патент

18 Патент на изобретение № 2698759, RU, МПК Е 21В 7/04. Компоновка буровой колонны для строительства горизонтальных участков большой протяженности / Г.Г. Ишбаев, Л.М. Левинсон, А.И. Шакирова (Сафрайдер А.И.); опубл. 29.08.2019, бюл. № 25.