

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа природных ресурсов  
 Направление подготовки 21.04.01 Нефтегазовое дело  
 ООП Технология строительства нефтяных и газовых скважин  
 Отделение школы Отделение нефтегазового дела

### ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРАНТА

Тема работы
<b>Проектирование буровых долот PDC и режимов их работы при использовании нового способа количественной оценки динамической твердости горных пород</b>

УДК 622.24.051-047.74

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ13	Валегдинов Назар Андреевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОНД	Борисов К.И.	д.т.н.		

#### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОНД	Шарф И. В.	д. э. н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОБД	Сечин А. А.	к. т. н.		

#### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП/ОПОП, должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОНД	Минаев К. М.	к. х. н.		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

### Результаты освоения образовательной программы Универсальные компетенции выпускников и индикаторы их достижения

Категория компетенций	Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
Системное и критическое мышление	УК(У)-1. Способность осуществлять поиск, критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	И.УК(У)-1.1. Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
		И. УК(У)-1.2. Определяет пробелы в информации, необходимой для решения проблемной ситуации, и проектирует процессы по их устранению
		И.УК(У)-1.3. Разрабатывает стратегию решения проблемной ситуации на основе системного и других современных междисциплинарных подходов; обосновывает выбор темы исследований на основе анализа явлений и процессов в конкретной области научного знания
		И.УК(У)-1.4. Использует логико-методологический инструментарий для критической оценки современных концепций в своей предметной области
Разработка и реализация проектов	УК(У)-2. Способность управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла	И.УК(У)-2.1. Определяет проблему и способ ее решения через реализацию проектного управления
		И.УК(У)-2.2. Разрабатывает концепцию проекта в рамках обозначенной проблемы: формулирует цель, задачи, обосновывает актуальность, значимость, ожидаемые результаты и возможные сферы их применения
		И.УК(У)-2.3. Осуществляет мониторинг за ходом реализации проекта, корректирует отклонения, вносит дополнительные изменения в план реализации проекта
Командная работа и лидерство	УК(У)-3. Способность организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели	И. УК(У)-3.1. Планирует и корректирует свою социальную и профессиональную деятельность с учетом интересов, особенностей поведения и мнений людей, с которыми работает и взаимодействует
		И.УК(У)-3.2. Организует дискуссии по заданной теме и обсуждение результатов работы команды
		И.УК(У)-3.3. Планирует командную работу, распределяет поручения и делегирует полномочия членам команды

Категория компетенций	Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
Коммуникация	УК(У)-4. Способность применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	И.УК(У)-4.1. Решает конкретные задачи профессиональной деятельности на основе академического и профессионального взаимодействия с учетом анализа мнений, предложений, идей отечественных и зарубежных коллег
		И.УК(У)-4.2. Составляет, переводит и редактирует различные академические тексты (рефераты, эссе, обзоры, статьи и т.д.)
		И.УК(У)-4.3. Представляет результаты академической и профессиональной деятельности на различных научных мероприятиях, включая международные
		И.УК(У)-4.4. Планирует и организывает совещания, деловые беседы, дискуссии по заданной теме; аргументированно и конструктивно отстаивает свою точку зрения, позицию, идею в академических и профессиональных дискуссиях на государственном и иностранном языках
Межкультурное взаимодействие	УК(У)-5. Способность анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия	И.УК(У)-5.1. Осуществляет профессиональную и социальную деятельность с учетом особенностей поведения и мотивации людей различного социального и культурного происхождения, в том числе особенностей деловой и общей культуры представителей других этносов и конфессий
Самоорганизация и саморазвитие (в том числе здоровье сбережение)	УК(У)-6. Способность определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	И.УК(У)-6.1. Анализирует использование рабочего времени в широком спектре деятельности: планирование, распределение, постановка целей, делегирование полномочий, анализ временных затрат, мониторинг, организация, составление списков и расстановка приоритетов
		И.УК(У)-6.2. Сочетает выполнение текущих производственных задач с повышением квалификации; корректирует планы в соответствии с имеющимися ресурсами
		И.УК(У)-6.3. Планирует профессиональную траекторию с учетом особенностей как профессиональной, так и других видов деятельности и требований рынка труда

### Общепрофессиональные компетенции выпускников и индикаторы их достижения

Категория компетенций	Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
Применение фундаментальных знаний	ОПК(У)-1. Способность решать производственные и (или) исследовательские задачи на основе фундаментальных знаний в нефтегазовой области	И.ОПК(У)-1.1. Демонстрирует навыки физического и программного моделирования отдельных фрагментов процесса выбора оптимального варианта для конкретных условий И.ОПК(У)-1.2. Использует фундаментальные знания профессиональной деятельности для решения конкретных задач нефтегазового производства И.ОПК(У)-1.3. Анализирует причины снижения качества технологических процессов и предлагает эффективные способы повышения качества производства работ при выполнении различных технологических операций
Техническое проектирование	ОПК(У)-2. Способен осуществлять проектирование объектов нефтегазового производства	И.ОПК(У)-2.1. Использует знание алгоритма организации выполнения работ в процессе проектирования объектов нефтегазовой отрасли И.ОПК(У)-2.2. Формулирует цели выполнения работ и предлагает пути их достижения И.ОПК(У)-2.3. Выбирает соответствующие программные продукты или их части для решения конкретных профессиональных задач
	ОПК(У)-3. Способность разрабатывать научно-техническую, проектную и служебную документацию, оформлять научно-технические отчеты, обзоры, публикации, рецензии	И.ОПК(У)-3.1. Анализирует информацию и составляет обзоры, отчеты И.ОПК(У)-3.2. Владеет навыками аналитического обзора при подготовке рефератов, публикаций и не менее 50 источников при подготовке магистерской диссертации
Работа с информацией	ОПК(У)-4. Способность находить и перерабатывать информацию, требуемую для принятия решений в научных исследованиях и в практической технической деятельности	И.ОПК(У)-4.1. Определяет основные направления развития инновационных технологий в нефтегазовой отрасли И.ОПК(У)-4.2. Обработывает результаты научно-исследовательской, практической технической деятельности, используя имеющееся оборудование, приборы и материалы
Исследование	ОПК(У)-5. Способность оценивать результаты научно-технических разработок, научных исследований и обосновывать собственный выбор, систематизировать и обобщать достижения в нефтегазовой отрасли и смежных областях	И.ОПК(У)-5.1. Определяет на профессиональном уровне особенности работы различных типов оборудования и выявление недостатков в его работе И.ОПК(У)-5.3. Интерпретирует результаты лабораторных и технологических исследований применительно к конкретным условиям
Интеграция науки и образования	ОПК(У)-6. Способность участвовать в реализации основных и дополнительных профессиональных образовательных программ, используя специальные научные и профессиональные знания	И.ОПК(У)-6.1. Демонстрирует знания основ педагогики и психологии И.ОПК(У)-6.2. Демонстрирует умение общаться с аудиторией, заинтересовать слушателей

### Профессиональные компетенции выпускников и индикаторы их достижения

Область и сфера профессиональной деятельности	Задача профессиональной деятельности	Основание - профессиональный стандарт, анализ опыта, форсайт	Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
<b>Тип задач профессиональной деятельности:</b> технологический				
19 Добыча, переработка, транспортировка нефти и газа	1. Технологический контроль и управление процессами строительства скважин.	<p><b>19.005</b> Профессиональный стандарт "Буровой супервайзер в нефтегазовой отрасли" (Утвержден приказом Минтруда России от 27.11.2014 № 942н)</p> <p><b>ОТФ В</b> «Технологический контроль и управление процессом бурения скважин на месторождениях»</p>	<p><b>ПК(У) -1.</b> Способность осуществлять контроль, техническое сопровождение и управление технологическими процессами строительства скважин</p> <p><b>ТФ В</b> «Обеспечение выполнения подрядными организациями проектных решений при бурении скважин на месторождениях»</p>	<p><b>И.ПК(У) -1.1.</b> Осуществляет контроль и управление безопасного ведения технологических операций в соответствии с нормативными документами и отраслевыми регламентами.</p> <p><b>И.ПК(У) -1.2.</b> Осуществляет контроль выполнения подрядными организациями проектных решений при строительстве скважины.</p> <p><b>И.ПК(У) -1.3.</b> Определяет возможные риски при проведении технологических операций и применяет эффективные способы их предупреждения.</p>
	2. Контроль, управление и выполнение работ по диагностике, техническому обслуживанию, ремонту и эксплуатации бурового оборудования.	<p><b>19.005</b> Профессиональный стандарт "Буровой супервайзер в нефтегазовой отрасли" Утвержден приказом Минтруда России от 27.11.2014 № 942н)</p> <p><b>ОТФ А</b> «Технологический контроль и управление процессом бурения скважин»</p>	<p><b>ПК(У) -2.</b> Способность обеспечивать безопасную и эффективную эксплуатацию бурового оборудования</p> <p><b>ТФ А</b> «Технический контроль состояния, работоспособности бурового оборудования и условий хранения материалов на буровой площадке.</p>	<p><b>И.ПК(У) -2.1.</b> Оценивает преимущества и недостатки применяемого бурового оборудования, определяет благоприятную область применения</p> <p><b>И.ПК(У) -2.2.</b> Соблюдает требования инструктивно-нормативной документации по эксплуатации и обслуживанию бурового оборудования.</p>
<b>Тип задач профессиональной деятельности:</b> научно-исследовательский				

19 Добыча, переработка, транспортировка нефти и газа	1. Инициирование создания, разработка и проведение экспериментальной проверки инновационных технологий в области строительства скважин.	Мнение экспертов, пожелания работодателей.	<b>ПК(У)-3.</b> Способность планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования, критически оценивать данные и делать выводы.	<b>И.ПК(У)-3.1.</b> Осуществляет сбор, обработку, анализ и систематизацию научно-технической информации по теме исследования, выбирает методики и средства решения поставленной задачи; планирует и проводит исследования; оценивает их результаты, делает выводы.  <b>И.ПК(У)-3.2.</b> Создает новые и совершенствует действующие методики проведения расчетов, необходимых при проектировании технологических процессов и технических устройств
	2. Оценка возможности использования достижений научно-технического прогресса в области строительства скважин.	Мнение экспертов, пожелания работодателей.	<b>ПК(У)-4.</b> Способность проводить анализ и обобщение научно-технической информации в области строительства скважин.	<b>И.ПК(У)-4.1.</b> Владеет навыками проведения анализа и систематизации информации по теме исследований, а также патентных исследований.
				<b>И.ПК(У)-4.2.</b> Оценивает возможность применения наиболее совершенных на данный момент технологий строительства скважин.
	<b>Тип задач профессиональной деятельности:</b> педагогический			
1 «Образование и наука» (в сфере научных исследований)	1. Разработка методических материалов для обеспечения подготовки и аттестации специалистов	<b>01.004</b> Профессиональный стандарт «Педагог профессионального образования, профессионального образования и дополнительного профессионального образования» (утвержден приказом Минтруда России от 08.09.2015 № 608н).  <b>ОТФ G</b> Научно-методическое и учебно-методическое обеспечение реализации программ профессионального обучения	<b>ПК(У)-5.</b> Способность разрабатывать методическое обеспечение для первичной периодической подготовки и аттестации специалистов в области строительства скважин.  <b>(ТФ Н/04.7</b> «Разработка под руководством специалиста более высокой квалификации учебно-методического обеспечения реализации учебных курсов, дисциплин (модулей) или отдельных видов учебных занятий программ бакалавриата и (или) ДПП»).	<b>И.ПК(У)-5.1.</b> Участвует в разработке методических документов, необходимых для подготовки и аттестации в области промышленной безопасности на опасных производственных объектах в процессе строительства скважин

Код результ.	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
P1	Применять базовые естественнонаучные, социально-экономические, правовые и специальные знания в области нефтегазового дела, для решения прикладных междисциплинарных задач и инженерных проблем, соответствующих профилю подготовки (в нефтегазовом секторе экономики), самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.
P2	Планировать и проводить аналитические и экспериментальные <i>исследования</i> с использованием новейших достижений науки и техники, уметь критически оценивать результаты и делать выводы, полученные в <i>сложных и неопределённых условиях</i> ; использовать <i>принципы изобретательства, правовые основы в области интеллектуальной собственности</i> .
P3	Проявлять профессиональную <i>осведомленность о передовых знаниях и открытиях</i> в области нефтегазовых технологий с учетом <i>передового отечественного и зарубежного опыта</i> ; использовать <i>инновационный подход</i> при разработке новых идей и методов <i>проектирования</i> объектов нефтегазового комплекса для <i>решения инженерных задач развития</i> нефтегазовых технологий, <i>модернизации и усовершенствования</i> нефтегазового производства.
P4	<i>Внедрять, эксплуатировать и обслуживать современные машины и механизмы</i> для реализации технологических процессов нефтегазовой области, обеспечивать их <i>высокую эффективность</i> , соблюдать правила <i>охраны здоровья и безопасности труда</i> , выполнять требования по <i>защите окружающей среды</i> .
P5	Быстро ориентироваться и выбирать <i>оптимальные решения в многофакторных ситуациях</i> , владеть методами и средствами <i>математического моделирования</i> технологических процессов и объектов.
P6	Эффективно использовать любой имеющийся арсенал технических средств для максимального приближения к поставленным производственным целям при <i>разработке и реализации проектов</i> , проводить <i>экономический анализ затрат, маркетинговые исследования, рассчитывать экономическую эффективность</i> .
P7	Эффективно работать <i>индивидуально</i> , в качестве <i>члена и руководителя команды</i> , умение формировать задания и <i>оперативные планы</i> всех видов деятельности, распределять обязанности членов команды, готовность нести <i>ответственность за результаты работы</i> .
P8	Самостоятельно учиться и непрерывно <i>повышать квалификацию</i> в течение всего периода профессиональной деятельности; активно <i>владеть иностранным языком</i> на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию и защищать результаты инженерной деятельности.
P9	Разрабатывать и внедрять инновационные решения при строительстве скважин
P10	Обеспечивать технологический контроль и управление процессом бурения скважин
P11	Разрабатывать проектную документацию на строительство скважин в осложненных горно-геологических условиях.

Школа – Инженерная школа природных ресурсов  
 Направление подготовки (специальность) – Нефтегазовое дело  
 Уровень образования – магистратура  
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение нефтегазового дела  
 Период выполнения – осенний / весенний семестр 2021/2022 учебного года  
 Форма представления работы:

магистерская диссертация <small>(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)</small>
---

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
05 марта 2022	1. Проведение литературного обзора по теме.	20
02 апреля 2022	2. Разработка методики проведения литературного обзора и обобщения отечественного и зарубежного опыта по тематике диссертации.	5
05 апреля 2022	3. Промежуточная аттестация выполнения диссертации в виде доклада на XXIV Международном научном симпозиуме студентов и молодых ученых им. академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр».	10
13 мая 2022	4. Проведение литературного обзора по тематике диссертации и анализ полученных результатов.	40
20 мая 2022	5. Формулирование выводов и рекомендаций.	20
25 мая 2022	6. Предварительная защита диссертации.	5

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОНД	Борисов К.И.	д.т.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОНД	Минаев К.М.	к.х.н		



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа природных ресурсов  
 Направление подготовки (специальность) – 21.04.01. Нефтегазовое дело  
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение нефтегазового дела

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП

\_\_\_\_\_  
 (Подпись)    (Дата)    (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации
--------------------------

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
2БМ13	Валегдинову Назару Андреевичу

Тема работы:

Проектирования буровых долот PDC и режимов их работы при использования нового способа количественной оценки динамической твердости горных пород
---

Утверждена приказом директора (дата, номер)	
---	--

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Объект исследования: Способ количественной оценки динамической твердости. Область применения: Бурение долотами PDC.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	1 Аналитический обзор 1.1 Текущие объемы промышленного бурения на нефть и газ с использованием PDC долот и факторы, сдерживающие рост этих объемов 1.2 Ключевые тенденции рынка 1.3 Факторы, сдерживающие рост этих объемов 2 Анализ проблем в современных методах оценки свойств буримых горных пород, используемых для целей проектирования технологии бурения и конструкции PDC долот и перспективных путей их улучшения

	2.1 Оценка твердости горной породы методом Шрейнера Л.А. 2.2 Оценка категории пород по буримости на основе определения динамической прочности 2.3 Крепость породы 2.4 Методы оценки твердости горных пород 2.5 Анализ основных требований к методу определения твердости 3 Результаты исследования нового способа оценки динамической твердости и применение в лабораторных условиях
--	---

<b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Необходимость в графических материалах отсутствует
---	--

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**  
*(с указанием разделов)*

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Профессор отделения нефтегазового дела, д.э.н. Шарф И.В.
Социальная ответственность	Доцент отделения общетехнических дисциплин, к.т.н. Сечин А.А.
Часть на иностранном языке	Доцент отделения иностранных языков, к.ф.н. Айкина Т.Ю.

**Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:**

Design of PDC drill bits and their operating modes using a new method for quantifying the dynamic hardness of rocks

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал руководитель**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор отделения нефтегазового дела	Борисов К.И.	д.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ13	Валегдинов Назар Андреевич		

**ЗАДАНИЕ К РАЗДЕЛУ  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
2МБ13	Валегдинов Назар Андреевич

<b>Школа</b>	Инженерная школа природных ресурсов	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	Отделение нефтегазового дела
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	21.04.01 Нефтегазовое дело Технология строительства нефтяных и газовых скважин

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

<i>1. Стоимость ресурсов научно-исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Оценка стоимости материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих ресурсов при строительстве эксплуатационной скважины на месторождении Западной Сибири с применением биополимерного бурового раствора
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	РД 153-39-007-96 ВСН 39-86 СНиП IV-5-82
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Налоговый кодекс Российской Федерации (часть 1) ФЗ №146 от 31.07.1998 в ред. от 18.03.2023 Налоговый кодекс Российской Федерации (часть 2) ФЗ №117 от 05.08.2000 в ред. от 28.04.2023

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке**

<i>1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Обоснование перспективности строительства эксплуатационной скважины на месторождении Западной Сибири с применением биополимерного бурового раствора
<i>2. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Расчеты локальных смет строительства эксплуатационной скважины на месторождении Западной Сибири
<i>3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Расчет сметной стоимости строительства эксплуатационной скважины на месторождении Западной Сибири с применением биополимерного бурового раствора

**Перечень графического материала:**

Сметная документация по обоснованию и общей оценке стоимости перечня операций по строительству скважины в табличной форме

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	28.03.2023
---	------------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Профессор ОНД	Шарф И.В.	Д.Э.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
2БМ13	Валегдинов Назар Андреевич		

## ЗАДАНИЕ К РАЗДЕЛУ

### «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>		<b>ФИО</b>	
2БМ13		Валегдинову Назару Андреевичу	
<b>Школа</b>	<b>ИШПР</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>ОНД</b>
Уровень образования	магистратура	Направление/ специальность	21.04.01 Нефтегазовое дело

Тема ВКР:

<b>Проектирование буровых долот PDC и режимов их работы при использовании нового способа количественной оценки динамической твердости горных пород</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
<p><b>Введение</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения.</li> <li>– Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации</li> </ul>	<p><i>Объект исследования:</i> биополимерные буровые растворы и их свойства  <i>Область применения:</i> буровые растворы для первичного вскрытия коллекторов  <i>Метод и средства исследования:</i> аналитические и экспериментальные (лабораторные).  <i>Рабочая зона:</i> лаборатория буровых растворов  <i>Размеры помещения:</i> 10*8,5  <i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны:</i> весы, смесительные устройства, вискозиметр, фильтр-пресс, печь</p>
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<p>Инструкция №13-107 по охране труда для работающих с химическими веществами. Научно-инновационная лаборатория «Буровые промывочные и тампонажные растворы».          Приказ Минтруда России от 09.12.2014 №997н "Об утверждении Типовых норм бесплатной выдачи специальной одежды, специальной обуви и других средств индивидуальной защиты работникам сквозных профессий и должностей всех видов экономической деятельности, занятым на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, а также на работах, выполняемых в особых температурных условиях или связанных с загрязнением".          Федеральный закон "О специальной оценке условий труда" от 28.12.2013 № 426-ФЗ.          "Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 № 197-ФЗ.          ГОСТ 12.2.049-80 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Оборудование производственное. Общие эргономические требования.</p>
<p><b>2. Производственная безопасность при разработке проектного решения:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов</li> <li>– Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора</li> </ul>	<p><b>Вредные факторы:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. отклонение параметров микроклимата;</li> <li>2. отсутствие (недостаток) естественного света;</li> <li>3. статические перегрузки;</li> <li>4. недостаточная освещенность рабочей зоны;</li> <li>5. повышенная температура поверхности оборудования.</li> </ol> <p><b>Опасные факторы:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. химические (раздражающие и токсические);</li> <li>2. электрический ток.</li> </ol> <p><b>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов:</b> изоляция токоведущих частей электрооборудования, система увлажнения воздуха или кондиционирования, халат, перчатки резиновые или из полимерных материалов,</p>

	фартук из полимерных материалов, очки защитные (до носа), респиратор. <b>Расчет:</b> расчет системы искусственного освещения
<b>3. Экологическая безопасность при разработке проектного решения</b>	<b>Воздействие на литосферу:</b> загрязнение почвы химическими отходами и продуктами исследовательской деятельности <b>Воздействие на гидросферу:</b> загрязнение сточных вод и водоемов химическими отходами и продуктами исследования <b>Воздействие на атмосферу:</b> попадание в атмосферу испарений и пыли от реагентов
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при эксплуатации:</b>	<b>Возможные ЧС:</b> пожар, землетрясения, лесные пожары <b>Наиболее типичная ЧС:</b> возникновение пожара
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОБД	Сечин Андрей Александрович	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ13	Валегдинов Назар Андреевич		

## Реферат

*Магистерская диссертация включает 135 страниц текстового материала, 23 рисунков, 12 таблиц, 97 источника, 2 приложения.*

*Ключевые слова.* Долота PDC, разрушение горной породы, метод Л.А. Шрейнера, объёмное разрушение, режуще-скалывающие действие резца.

*Объект исследования.* Поликристаллические долота типа PDC.

*Цель работы.* Рассмотреть и исследовать новый способ определения количественной оценки динамической твердости горной породы.

*Результаты исследования.* Предложен к использованию разработанный коллективом авторов новый метод оценки динамической твердости

*Методы проведения исследования.* Методы сравнения, статистические или вероятностные методы обработки результатов экспериментов

*Область применения.* Проектирования долот и режимов бурения класса PDC.

## **Abstract**

*Master's thesis* includes 135 pages of text material, 23 figures, 12 tables, 97 sources, 2 appendices.

*Keywords.* PDC chisels, rock destruction, L.A. Schreiner method, volumetric destruction, cutting-chipping action of the cutter.

*Object of study.* Polycrystalline bits of the PDC type.

*Objective.* To consider and investigate a new way of quantifying the dynamic hardness of a rock.

*Research results.* A new method of dynamic hardness estimation developed by a team of authors is proposed for use

*Research methods.* Comparison methods, statistical or probabilistic methods of processing experimental results

*Application area.* Designing bits and drilling modes of the PDC class.



## **Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки**

СНС – статическое напряжение сдвига;

ДНС – динамическое напряжение сдвига;

ВПФ – вредный производственный фактор;

ОПФ – опасный производственный фактор;

ФВА – фильтр воздушный абсолютной очистки.

СПО-Спуско-подъемные операции

## Оглавление

Реферат .....	19
<b>Введение</b> .....	24
1.1 Текущие объемы промышленного бурения на нефть и газ с использованием PDC долот и факторы, сдерживающие рост этих объемов .....	26
1.2 Ключевые тенденции рынка.....	27
1.3 Некоторые факторы, сдерживающие рост эффективности работы долот PDC .....	29
1.3.1 Возникающие реакции при бурении долотами PDC .....	30
<b>Глава 2. Анализ проблем в современных методах оценки свойств буримых горных пород, используемых для целей проектирования технологии бурения и конструктивных характеристиках PDC долот и перспективных путей их улучшения</b> .....	34
2.1 Оценка твердости горной породы методом Шрейнера Л.А. ....	34
2.2. Оценка категории горных пород по буримости на основе определения их «динамической прочности» .....	40
2.3. Крепость породы.....	43
2.4. Методы оценки твердости горных пород .....	43
2.4.1 Методы оценки твердости для металлов и минералов .....	43
2.4.2 Косвенные методы оценки твердости .....	44
2.5. Анализ основных требований к методу определения твердости буримых горных пород PDC долотами. ....	45
2.6 Выводы .....	48
<b>Глава 3. Актуальность разработки и использования новых количественных способов определения твердости горных пород для условий реальной эксплуатации PDC долот</b> .....	50
3.1 Техническая реализация метода оценки характеристики динамической твердости исследуемой горной породы.....	51
3.2 Физическая сущность количественных результатов метода оценки динамической характеристики твердости породы для долот PDC.....	54
3.3. Применение результатов оценки характеристик динамической твердости для технологии бурения скважин долотами PDC.....	66
3.4 Выводы .....	70
<b>4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</b> .....	71
4.1 Расчет сметной стоимости подготовительных работ .....	71
4.2 Расчет сметной стоимости монтажных-демонтажных работ.....	71
4.3 Расчет времени бурения и крепления скважин.....	72
5.4 Расчет сметной стоимости бурения и крепления скважин .....	75
4.5 Расчет сметной стоимости освоения скважины .....	75

<b>5 Социальная ответственность</b> .....	77
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	78
5.1.1 Правовые нормы трудового законодательства .....	78
5.1.2 Эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны .....	80
5.2 Производственная безопасность .....	81
5.2.1 Анализ выявленных вредных и опасных факторов .....	81
5.2.2 Расчет системы искусственного освещения .....	89
5.3 Экологическая безопасность .....	90
5.3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду .....	90
5.3.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды .....	90
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	91
5.5 Расчет воздухообмена для расчистки воздуха .....	93
<b>Заключение</b> .....	94
<b>Список использованной литературы</b> .....	96
<b>Приложение А</b> .....	106
<b>Приложение Б (справочное)</b> .....	122

## **Введение**

Долота PDC в объёмах бурения на территории России используются почти в 90 процентов случаях, постоянная нужда стран мира в сырьевой базе дает потребность в развитии новых месторождений, технологий освоения и строительства скважин, а это в свою очередь предполагает более детальное изучение геологических данных для подбора более эффективного вооружения. Детальное описание горных пород не всегда предоставляются буровыми подрядчиками, дополняющая информация о залегании минералов в пласте восполняется только когда скважина бурится и получен анализ керна из пласта.

Как показывает мировая практика бурения скважин, в результате первичного подбора инструмента скважины бурятся неэффективно и нерационально, что приводит к увеличению времени бурения и тратой средств.

Поэтому наукой на первые места ставится задача разработки научных обоснований и применения новых технологий для точной оценки влияние режуще-скалывающего действия на горные породы.[13]

Как выходит из практики, применение технологий и инструментов подобранные в результате первичных стадий обработки геологических данных являются неэффективными и нерациональными, что способствует увеличенной тратой денежных средств как подрядчиков, так и самих буровых компаний.

Алмазные поликристаллические долота все больше охватывают нефтегазовое бурение, твердость и абразивность те два качества горной породы на которое стоит обратить внимания для выбора долота. Так как свойства горных пород, в частности механические изменяются с процентовой ошибки в 2,5 %, рекомендации по выбору долота будут учитывать количество лопастей долот.

Целью данной работы является: Актуальность разработки нового способа количественной оценки динамической твердости горных пород для использования долотами PDC и режимов их бурения. [15]

Задачи:

1. Провести обзор рынка использования долот PDC на базе не только Восточной Сибири, но и всего мира.

2. Провести анализ основных методов определения динамической твердости горных пород и отобрать подходящие.
3. Рассмотреть разработанный новый способ количественной оценки динамической твердости горной породы

## **Глава 1. Обзор литературы: обоснование направления исследования и актуальности выбранной темы**

### **1.1 Текущие объемы промышленного бурения на нефть и газ с использованием PDC долот и факторы, сдерживающие рост этих объемов**

Прогнозируется, что рынок буровых долот с поликристаллическими алмазами (PDC) будет расти более чем на 4% годовых в период с 2020 по 2025 годы. Этот рост будет обусловлен такими факторами, как возросшая активность в области геологоразведочных работ и разработки новых месторождений нефти и газа, которые будут стимулировать спрос на буровые долота PDC.

Ожидается, что буровые работы, особенно пройденный метраж, будут стимулировать спрос на буровые долота PDC. Однако волатильность цен на нефть в последнее время из-за разрыва спроса и предложения, геополитики и ряда других факторов сдерживала рост рынка буровых долот PDC.

В 2018 году максимальная доля рынка пришлась на наземный сегмент. Наземное бурение охватывает все буровые площадки, расположенные на суше, и обеспечивает 70% мировой добычи нефти.

Растущее количество открытий нефти и газа в сочетании с либерализацией отрасли открывают новые возможности для участников рынка. Новыми развивающимися рынками являются несколько развивающихся стран Ближнего Востока и Африки, Азиатско-Тихоокеанского региона и Южной Америки.

Максимальная доля рынка в 2018 году приходилась на Северную Америку. Ожидается, что темпы роста южноамериканского региона будут самыми высокими в течение прогнозируемого периода, в первую очередь из-за быстрого роста добычи нефти и газа в регионе.[67]

## 1.2 Ключевые тенденции рынка

Береговое бурение охватывает все буровые площадки, расположенные на суше, и обеспечивает 70% мировой добычи нефти. Береговое бурение похоже на морское бурение, но без проблем с глубокой водой между плат формой и нефтью.

Мировые цены на сырую нефть демонстрируют признаки восстановления и улучшаются хорошими темпами, а наземные проекты легче запустить, чем морские. Таким образом, благодаря оптимизму, связанному с восстановлением цен на сырую нефть, ожидается, что наземные проекты зафиксируют значительный рост в течение прогнозируемого периода. Ожидается, что это, в свою очередь, повысит спрос на буровые долота PDC.

В августе 2018 г. компания Baker Hughes получила от Cairn, Vedanta Limited, контракт на строительство ОК. 300 новых скважин и развертывание программы повышения нефтеотдачи с помощью химических реагентов, направленной на увеличение добычи в районе Раджастхана. Этот проект знаменует собой крупнейший комплексный проект для BHGE в Индии, расширяющий ее присутствие в стране и поддерживающий миссию правительства по снижению зависимости от импорта.[24]

В 2019 году ONGC объявила о выделении 6000 крор индийских рупий на бурение 200 скважин в Ассаме в течение следующих семи лет, чтобы увеличить добычу в штате. Ожидается, что скважины будут пробурены в течение следующих семи лет.

Таким образом, с новыми инвестициями в наземную нефтегазовую промышленность, расширением разведки нетрадиционных ресурсов и стабильностью цен на сырую нефть ожидается увеличение спроса на буровые долота PDC в течение прогнозируемого периода.[28]

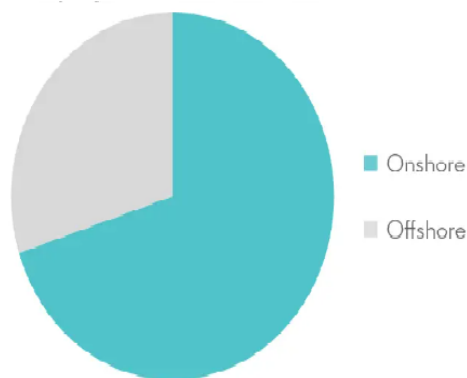


Рисунок 1.1 – Внутреннее и внешнее применение долот PDC диаграмма процентов

Ожидается, что Северная Америка станет крупнейшим рынком для буровых долот PDC из-за большого объема работ по разведке сланцевого газа в регионе. За последнее десятилетие боковые длины нетрадиционных скважин, пробуренных в США, увеличились на 180%. [33]

Соединенные Штаты по состоянию на 2019 год являются крупнейшим производителем нефти и газа. В Соединенных Штатах насчитывается более 900 000 действующих нефтяных и газовых скважин, а с 2010 г. было пробурено более 130 000 скважин. Мб) на глубине 2000 м под водой и в Аппоматтоксе (140 Мб) под водой 2300 м. [41]

По данным правительства Канады, в 2018 г. ожидается, что добыча нефти в Канаде достигнет 4,5 млн бар. для хранения 25,5 баррелей нефти и 20,6 трлн куб. футов газа. [34]

Ежегодная добыча нефти в Мексике с годами снижается из-за высыхания гигантского месторождения Кантарел на мелководье Мексиканского залива. Однако правительство Мексики пытается увеличить частные инвестиции в контролируемые им районы Мексиканского залива.

Таким образом, ожидается, что расширение деятельности по разведке и добыче нефти и газа, а также расширение деятельности по разработке нетрадиционных месторождений в регионе повысит спрос на буровые долота PDC в течение прогнозируемого периода в Североамериканском регионе.



Polycrystalline Diamond Compact (PDC) Drill Bit Market: Growth Rate by Region, 2020-2025



Рисунок 1.2 – Использование PDC долот в мире[78]

### **1.3 Некоторые факторы, сдерживающие рост эффективности работы долот PDC**

В передовых технологиях нефтегазодобычи для бурения геологоразведочных и эксплуатационных скважин важную роль играет породоразрушающий инструмент типа PDC (polycrystalline diamond compact) долот. Большим преимуществом PDC долот, в отличие от шарошечных, является их высокая износостойчивость. Лопастные долота PDC характеризуются длительным сроком службы и эффективностью, обеспечивая увеличение проходки инструмента за один проход и повышенную скорость бурения.

Так же стоит отметить что, овально-спиральная поверхность дает преимущество перед другими долотами в виде, качественной очистки, уменьшения крутящего момента и сводит к минимуму смещение точки вращения.

Благодаря высокой работоспособности инструмента и передовых методов управления направлением ствола скважины, буровые могут справиться с основной задачей - снижением затрат на проходку и улучшением характеристик инструмента в эксплуатации.[44]

Износостойкость такого долота обуславливается в том, что при деформировании поверхности долота легко ремонтируется и пригодны к использованию.

Разрушение горной породы режуще-скалывающим действием в 2 раза эффективнее вдавливания и вследствие этого можно ожидать увеличения скорости бурения и величины проходки на долото.

В России главной причиной износа буровых долот является повреждение при ударной нагрузке. Для уменьшения повреждений буровые организации должны оптимизировать КНБК и улучшить режим бурения, особенно в регионах, где применяются долота. PDC долота эффективнее разрушают породу, однако требуют больше энергии и могут неправильно направляться при бурении. Достоинствами PDC долот являются высокая износостойкость, низкая осевая нагрузка и отсутствие движущихся частей в конструкции. Развитие PDC долот привело к улучшению проходки и снижению аварийности, а в Сибири они составляют до 90% использования в промышленном бурении.

Стоит отметить, что для дальнейшего изучения и научно обоснованного проектирования долот необходимо понимать какие нагрузки действуют на контакте вооружения долота с породой. При вращении резца под действием крутящего момента будет справедлива следующая силовая схема взаимодействия резца с разрушаемой породой (рисунок 1.3) [77].

### **1.3.1 Возникающие реакции при бурении долотами PDC**

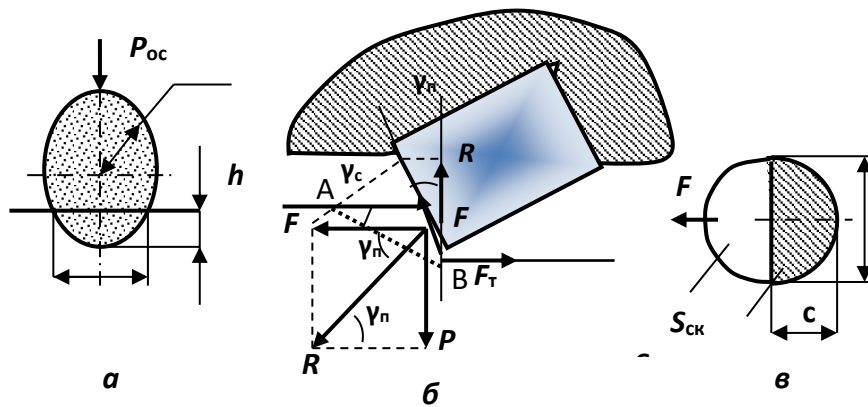


Рисунок 1.3 – Рисунок 1.3 Схема к анализу разрушения породы резцом PDC: *a* – вид на резец спереди; *б* – вид на резец сбоку; *в* – Площадь площадки на которой происходит разрушение горной породы

Важным аспектом этого рисунка является сила  $R$  которая является суммой реакций осевой нагрузки  $P_{oc}$  и силы режуще-скалывающего действия  $F_p$  которая будет находиться под углом тангенса. Установившейся процесс представлен на рисунке 2а. Н рисунке 2б показано появление силы  $T$  направленной под угол вниз которая старается нарушить равновесии и вызвать увеличенное заглубление резца.[4]

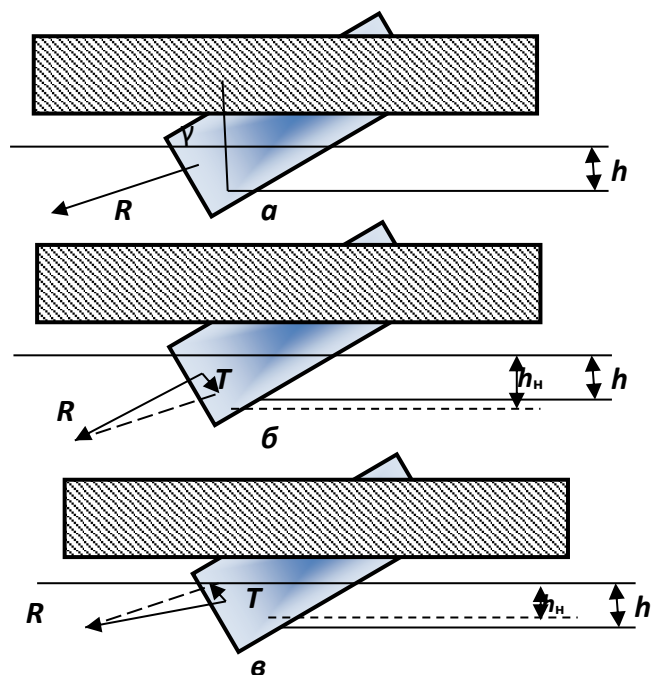


Рисунок 1.4 – Схемы для анализа механики резания-скалывания резцом PDC

Если результат силы  $R$  направлена вверх как показано на рисунке 2 в, то это в свою очередь приводит к ряду изменений таких как уменьшение силе сопротивляемости породы и снижения осевой силы на инструмент, так же это является началом уменьшения глубины резания скалывания от  $h_k$   $h_n$ .

При исследовании силы  $N$  было выявлено что она оказывает силу на ядро сжатие, а не на сам резец, это выявляет затраченную силу  $R$  на преодоление сил внутреннего трения ядра.[43]

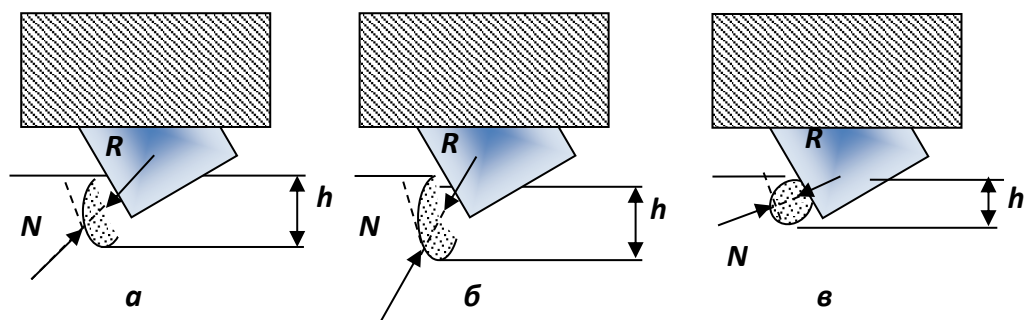


Рисунок 1.5 – Схемы трансформации ядра сжатия породы при установившемся режиме резания-скалывания (*а*), заглублинии резца (*б*) и повышении сопротивления резанию-скалыванию (*в*)

## **Глава 2. Анализ проблем в современных методах оценки свойств буримых горных пород, используемых для целей проектирования технологии бурения и конструктивных характеристиках PDC долот и перспективных путей их улучшения**

### **2.1 Оценка твердости горной породы методом Шрейнера Л.А.**

Определение упругие, пластические твердые характеристики горной породы помогает известный метод Л. А. Шрейнера. Оценка заключается в вдавливание в образец горной породы инородного тела на глубину  $h$  и силу нагрузки на инородное тело  $P$ .

Для более подробного анализа этого метода и в предшествовании для обзора других, нужно определиться с такой важной характеристикой горной породы как твердость. Твердость породы — это сила сопротивления внедрения в нее инородного тела, поэтому твердость можно определить благодаря внедрения в нее индентора который моделирует разрушения объекта острым инструментом. В качестве измерения меры твердости горной породы принято считать количество давления контакта при пределе прочности объекта исследования.

Для работ Л. А. Шрейнер использовал лабораторные установки типа УМГП -3,4, а также на приборах гидропресс (рисунок 2.1) [23]

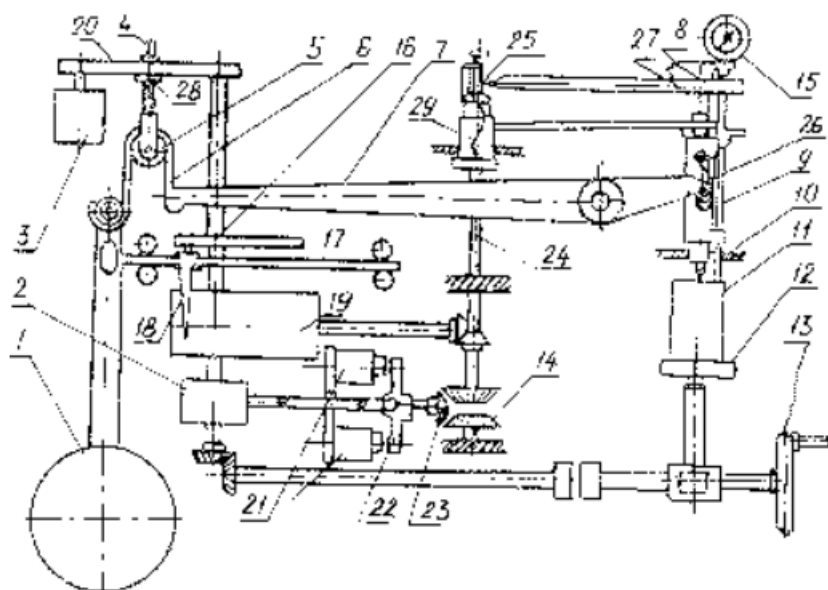


Рисунок 2.1 – Установка УМГП 3 для исследования горных пород по методу Л. А. Шрейнера

Аппарат регистрирует результаты испытаний в виде диаграммы, где координатами являются нагрузка и деформация, а предельная нагрузка разделена на четыре диапазона: 0-1 кН, 0-2,5 кН, 0-5 кН и 0-10 кН. Испытуемый образец имеет предельную деформацию 0,75 мм, время нагружения от нуля до максимума составляет 3 минуты, а максимальное перемещение пера на диаграмме равно 100 мм. Предел погрешности при измерении нагрузки и деформации составляет 1% от максимума. Установка УМГП-3 включает две системы: систему нагружения и систему измерения перемещений. При нагружении происходят деформации и разрушения. Система нагружения состоит из рычага с грузами - 1, штифта - 17, электродвигателя с редуктором - 3, винта 4 с роликом 5, стальной ленты 6, коромысла 7, штока с пружиной и штампа.

Система измерения деформаций включает электродвигатель с приводом 2, электромагниты 21, коромысла 22 с малой конической шестерней 23, две большие конические шестерни 14, вал 24, связанный с электрическими контактами 25, фигурный рычаг 8 и индикаторную ножку 26. Фигурный рычаг 8 укреплен на штоке 9 с осью 27. На столике прибора 12 устанавливается образец породы 11. [91]

Для создания нагрузки пример породы помещается на рабочую поверхность штампа, после чего включается электродвигатель нагрузки посредством тумблера "нагрузка", который передает вращение редуктору. Редуктор передает вращение гайке 28, которая передвигает винт 4, связанный с роликом 5. Ролик приводит в движение стальную ленту 6, закрепленную между рычагом с грузами и коромыслом 7, передавая нагрузку на штамп. Отклонение рычага с грузами записывается на барабане вдоль его образующей.

Запись деформации осуществляется при помощи конической передачи вала 24, который передает вращение от электродвигателя через коническую передачу с малой шестерней и двумя большими шестернями. При замыкании контактов 25 фигурным рычагом, установленным на винте 29, включается верхний или нижний электромагнит, перемещающий малую шестерню в зацепление с большими шестернями. Это перемещение передается на индикаторную ножку 26 индикатора 15, установленного на образце. Электродвигатель записи деформации включается в последнюю очередь при подготовке к опыту и остается включенным в течение всего опыта.

В своих исследования Шрейнер предложил классифицировать горной породу основываясь на трех типах деформации:

1. Хрупкие
2. Хрупко-пластичные
3. высоко-пластичные, сильнопористые, не дающие общего хрупкого разрушения

На графиках к каждому из трех видов классификации будет принадлежать свои результирующие графики (рисунок 2.2, а, б, в.). [65]



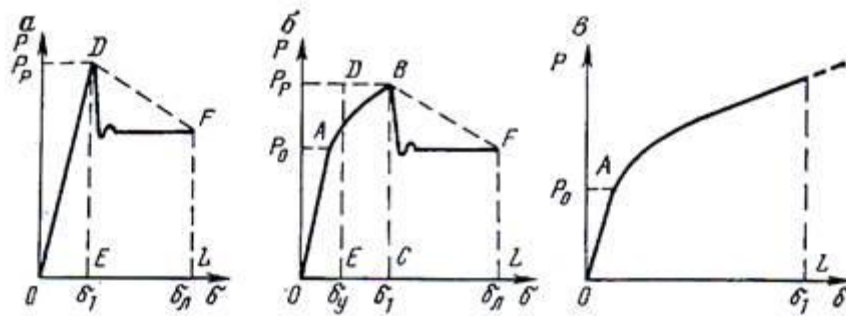


Рисунок 2.2 - Графики деформаций горных пород

а – для хрупких горных пород; б - для хрупко - пластичных горных пород; в – для высоко-пластичных горных пород

На рисунке 2.2, а - график деформации хрупких пород. Зависимость  $\varepsilon = f(P)$  линейная.

До момента разрушения (точка А) деформация только упругая. По максимальной нагрузке  $P_p$ , соответствующей моменту выкола лунки определяется твердость  $P_{ш}$

$$P = \frac{P_0}{F} \quad (2.1)$$

где F- площадь основания штампа.

Диаграмма деформации хрупко-пластичных пород (изображенная на рисунке 2.2 б) представляет собой две составляющих - упругую и пластическую. На участке ОА деформация происходит быстрее в области упругой деформации. В точке А происходит переход от упругой деформации к пластической. В области АВ происходит пластическая деформация породы. При ступенчатом нагружении, наблюдается выраженная деформация, которая продолжается некоторое время после окончания напряжения. Это известно, как пластическое течение и на диаграмме это отражается уменьшением угла наклона кривой деформации. В точке В происходит переход от упругой деформации к пластической, что позволяет определить предел текучести породы  $P_t$  по нагрузке

$P_0$ , соответствующей этому переходу деформации. Твердость определяется аналогично первой диаграмме. [59]

$$P_T = \frac{P_0}{F} \quad (2.2)$$

За меру пластичности принимается отношение общей работы, затраченной до момента разрушения  $A_p$  (пропорциональной площади OABC) к работе упругого деформирования  $A_{уп}$  (пропорциональной площади ODE) – это отношение называют коэффициентом пластичности  $K_{п}$ .

$$K_{п} = \frac{A_p}{A_{уп}} = \frac{S_{OABC}}{S_{ODE}} \quad (2.3)$$

Шрейнер Л.А. предложил считать, что работа упругого деформирования пропорциональна площади треугольника ODE, что означает сохранение упругих констант породы в области пластической деформации. При этом высокопластичные и сильнопористые породы не подвержены общему хрупкому разрушению под штампом. Для измерения твердости и начала разрушения используется предел текучести  $P_T$ , соответствующий нагрузке  $P_0$  рисунок 2.3 в

$$P_T = \frac{P_0}{F} \quad (2.4)$$

Коэффициент пластичности принят равным бесконечности. Шрейнером была разработана классификация горных пород по твердости и пределу текучести (таблица 2.1) на основе анализа материалов с использованием метода статического вдавливания штампа. [58]

Таблица 2.1 – Классификация горных пород по твердости и пределу текучести

Группа пород	Категория	$P_{ш}$ , МПа	$P_T$ , МПа
Мягкие	1 2 3	<100 100-250 250-500	<40 40-110 110- 250

Средней твердости	4 5	500-1000 1000- 1500	250-550 550-850
Твердые	6 7	1500-2000 2000- 3000	850-1200 1200- 1900
Крепкие	8 9	3000-4000 4000- 5000	1900-2500 2500- 3500
Очень крепкие	10 11 12	5000-6000 6000- 7000 >7000	3500-4200 4200- 5100 >5100

Классификация горных пород по пластичности представлена в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Классификация горных пород по пластичности

Категория	1	2	3	4	5	6
Кпл	1	1-2	2-3	3-4	4-6	6-∞

Категории делятся от 1 до 6 группы и включают в себя от первой группы более хрупкие и до 6 более пластичные, высокопластичные и сильнопористые. [3]

Одним из распространенных и признаваемых у специалистов способов разрушения горной породы является, как рассмотрено выше, метод профессора Л.А. Шрейнера, согласно которому в исследуемую на твердость горную породу внедряется индентор (штамп) определенной формы и материала при небольших (статических) скоростях нагружения до момента выкола консоли породы из-под штампа. Процесс динамического резания-скалывания при работе резцов типа PDC носит более сложный характер, так как происходит не только торцевое вдавливание резца, но и срезание слоя породы перед его движущейся передней гранью.

Для промышленного бурения нефтегазодобывающих скважин в настоящее время практически во всех случаях применяются долота PDC. В литературе

имеется относительно небольшое количество материалов по научному обоснованию твердости, проявляемой горными породами в динамическом процессе резания-скалывания долотами PDC. [22]

**Динамическая прочность горных пород** — это такой вид физического явления, которое показывает сопротивляемость породы внедрению инородных тел, под быстро нарастающей нагрузкой, нагружении индентором или инструментом на породу. [31]

## **2.2. Оценка категории горных пород по буримости на основе определения их «динамической прочности»**

**Категория горных пород по буримости** обычно определяются исходя из коэффициента абразивности  $K_{аб}$ , объединённого расчетного показателя  $\rho_m$  и естественно динамической прочности  $F_d$  в соответствии со стандартами по ГОСТ 41-89-74. [17]

Стоит отметить что если брать осадочные и вообще все нетвердые породы, то методы для определения категории буримости к ним не будут подходить, в силу их малой сопротивляемости разрушения и невозможности дать оценки из-за этого, метод распределения породы на категории по буримости и определения крепости по М. М. Протодяконова будет применим к породам 5-12 категории буримости только для вращательного бурения. Для подготовки образцов для определения категории существуют несколько особенностей, образцы берутся из керна с размерами от 1,5 до 2 см, проба должна содержать 25 обломков и разделяться на 5 отдельных проб по 5 обломков.

Процедура классификации пород методом Любимова Н.И. включает в себя несколько этапов. Сначала готовый продукт проходит через сито, затем пяти обломков помещают в стакан устройства ПОК и производят 10 сбрасываний гири массой 2,4 кг с высоты 0,6 м. Полученные образцы делится на 5 проб по 5

обломков. В последней стадии полученную фракцию проходят через сито с отверстием 0,5 мм и определяют объем пробы в мм ( $h_0$ ) с помощью объемомера.

Физический смысл динамической прочности заключается в определении удельной работы дробления обломков при подаче осевой нагрузки на образец породы [45]

Динамическая прочность будет находится по формуле, представленной ниже:

$$F_d = \frac{200}{h_0} \quad (2.5)$$

Коэффициент абразивности будет рассчитываться образом:

$$K_{аб} = \frac{Q}{100} \quad (2.6)$$

где  $Q$  – потеря в результате абразивного износа об испытываемую породу

Для расчета коэффициентов прочности и абразивности необходимо взвесить дробь в пробе до и после ее обработки в стакане, а затем обозначить разницу в массе как  $Q$ . Чтобы считать тест успешным, необходимо выполнить условие, что разница в массе между двумя пробами не превышает 25%. [44]

Объединённый показатель  $\rho_m$  будет считаться основанием для расчета категории горных пород:

$$\rho_m = 3F_\delta^{0,8} \cdot K_{аб} \quad (2.7)$$

Значения категории буримости и объединённого показателя сравнивают с таблицей 2.3 и на основании совпадения данных дают категорию испытываемому образцу горной породы.

Таблица 2.3 – Значения  $\rho_m$  и категории горных пород по буримости при вращательном бурении [51]

Категория пород по буримости	Значение $\rho_m$	Категория пород по буримости	Значение $\rho_m$
V	4,5-6,8	IX	22,8-34,2
VI	6,8-10,1	X	34,2-51,2
VII	10,1-15,2	XI	51,2-76,8
VIII	15,2-22,8	XII	более 76,8

Для ударно-вращательного бурения получена иная формула для расчета объединенного показателя  $\rho_{муд}$ :

$$p_{муб} = 2 \cdot F_6 \cdot K_{аб}^{0,41} \quad (2.8)$$

Коэффициент динамической прочности играет главную роль в процессе бурения горных пород ударными импульсами, в то время как абразивность горных пород оказывает основное влияние на вращательное бурение. В процессе вращения долота в буримой скважине наблюдаются мелкие детали контакта, такие как шлам, осколки или кусочки пород.

В бурении горные породы делят на 7 категорий на основании показателя  $\rho_{муд}$ .

По данным, полученным при изучении категории горных пород, буровые подрядчики составляют оценки затрат и определяют необходимое время на бурение скважины. Они также учитывают параметры, такие как динамическая прочность и абразивность, чтобы выбирать наиболее эффективный инструмент и метод бурения. Коэффициент пластичности, упругости, твердости и трещиноватость являются также важными характеристиками горных пород и используются при выборе инструмента, его характеристик и параметров бурения.[87]

## 2.3. Крепость породы

Согласно исследованию компании Atlas Copco, наибольшее влияние на процесс оказывают крепость, размеры зерен, выветрелость и трещиноватость горных пород.

Существуют еще несколько терминов сопоставляемых с твердостью, к примеру специалисты компании Voart Longyear дают такой термин определения как монолитность, что будет тождественно равно твердости. [78]

## 2.4. Методы оценки твердости горных пород

### 2.4.1 Методы оценки твердости для металлов и минералов

**Метод Бринелля.** Такой метод заключается в том, что металлический шарик вдавливают в тело, чем больше оставленный отпечаток диаметра в теле, тем меньше твердость у исследуемого образца, далее из полученного отпечатка рассчитывают твердость как отношение усилия, приложенного к шариком к площади отпечатка. Этот метод не подходит для определения твердости при режуще-скалывающем действии резца, так как силы будут отличаться при режуще-скалывающем действии считается сумма реакций сил на вдавливание и резания, а этот метод только соответственно, рассматривает только силу вдавливания. [16]

**Метод Роквелла.** Твердость определяется на лабораторной аппаратуре, путем вдавливания в исследуемый предмет металлического конуса. Твердость вычисляется по формуле 2.9: [24]

$$HR=100-kd \quad (2.9)$$

Где  $d$  –глубина вдавливания конуса, а  $k$ -коэффициент твердости

В этом методе твердость определяется по силе, действующей вертикально вниз, но такое определение твердости не применима к режуще-скалывающему действию, потому как силы отличаются.

**Метод Шора.** Метода заключается в определении отскока бойка, на изучаемый предмет сбрасывают боёк, на какую высоту он отскочит такая твердость и будет. Твердость определяется путем замера высоты отскока бойка, но при применении динамического способа резания горной породы этот метод не подходит так как, будет произведен только контроль реакции силы вдавливания, а сила резани будет не учтена. [51]

**Метод Либя.** Этот способ определения твердости рассматривается как измерение скорости бойка до и после отскока от поверхности. При определении скорости этого метода, не возможна сказать о истирающей силе резания горной породы, поэтому такой метод не подходит. [84]

**Шкала твёрдости минералов Мооса.** Метод определяется за счет царапания одного минерала об другой, если царапается минерал, то он ниже твердости если нет, то выше. Такой метод оценивания будет подходить для шарошечных долот, но при бурении инструментом PDC не будут учитываться все силы действия долота на породы, поэтому этот метод оценивания твердости горной породы не подходит для режуще-скалывающего действия. [34]

#### **2.4.2 Косвенные методы оценки твердости**

Одним из методов оценки горных пород является анализ звуковых колебаний, называемый акустическим. В данном методе регистрируется сигнал, возникающий в результате взаимодействия бурового инструмента и породы на дне скважины.

Это явление известно, как акустическая эмиссия, которая представляет собой излучения колебаний, возникающих при деформации и разрушении



материала. В процессе разрушения горной породы микротрещины появляются при контакте резцов инструмента с породой, излучая сигнал, который зависит от характеристик разных факторов, таких как режим бурения, механические свойства и структура породы. В зависимости от типа разрушения (поверхностное, объемное или усталостное) спектр излучаемого сигнала изменяется.

Ученые из Томского политехнического университета разработали метод регистрации импульсного электромагнитного поля, который, вместе с методом вызванной акустической эмиссии, позволяет измерять сопротивление твердых тел разрушению. Он основан на измерении потенциала электромагнитного поля и выявляет процессы зарождения и развития трещин при нагружении твердых тел. В промышленном бурении для определения твердости горных пород используют акустический каротаж и другие геофизические методы. Была разработана программа RSA, которая учитывает естественные условия и степень анизотропии горных пород на глубине для определения их прочности. Такой анализ помогает оптимизировать процесс бурения, выбрать подходящий инструмент и предотвратить естественное искривление скважины.

При бурении скважины в реальные условия для осуществления оптимального выбора долота, наши коллеги из зарубежных компаний используют акустические методы совместно с гамма-каротажем или же газовый-каротажем. Программное обеспечение, разработанное для работы с акустическим каротажем (RSA). Программа RSA позволяет определить твердость горной породы учитывая реальные условия залегания горной породы с учетом таких факторов, как горное давление и степень анизотропии. Подробный анализ позволят спроектировать и оптимизировать процесс бурения и обеспечить для нужных условий более подходящее долото. [91]

## **2.5. Анализ основных требований к методу определения твердости буримых горных пород PDC долотами.**

Разработка критерия оценки устойчивости горных пород к разрушению во время применения резально-скалывающих инструментов становится всё более актуальной задачей, особенно в связи с возрастающим использованием новых долот типа PDC. Необходимо разработать новый критерий твердости горных пород для динамического процесса разрушения инструментами резально-скалывающего действия и определить момент достижения предела прочности на вдавливание горной породы с применением долот типа PDC. Метод Л.А. Шрейнера может моделировать процессы вдавливания зуба шарошечного долота, но пока не имеется ясного определения критерия достижения предела "динамической твердости" в динамическом процессе резания.

Эта проблема создает фундаментальные трудности, а также непрерывную необходимость улучшать инструменты для определения эффективности разрушения горных пород. Исходя из анализа исследований, предлагается связывать достижение предела «динамической твердости» с переходом динамического процесса резания на оптимальный режим объемного разрушения, который признают все ученые. В свете этого, разработка точных методов регистрации данного момента становится важной задачей. При разработке нового параметра для оценки динамической твердости горных пород для резания необходимо соблюдать ряд методологических требований.

Методы формализации присутствуют, величина Нвд, предложенная Л.А. Шрейнером, дает объективную количественную оценку более сложного процесса разрушения горных пород при резании. Ее отличие от показателя Л.А. Шрейнера и ее значение для точной оценки динамической твердости горных пород при использовании инструментов режуще-скалывающего действия являются объективными. Необходимо обратить внимание на физическую сущность величины  $R_v$ , которая объективно соответствует величине  $R_x$ , определенной из аналитической модели установившегося режима динамического резания горной породы. Для получения количественных значений  $R_v$  и других параметров рекомендуется применять метод "жестко фиксированного резца". [27]

Он включает фиксацию породоразрушающего элемента в силоизмерительном устройстве, жестко закрепленном на массивном основании, и проведение резания (строгания) образца горной породы при перемещении относительно неподвижного резца с переменной толщиной снимаемого слоя. Чтобы точно видеть картину моделирования работы режущих резцов нужно момент резания должен производиться до того, как установится коэффициент  $K_p$  в моменте объёмного разрушения.

Новая технология измерения показателя должна быть способна оценивать динамическую твердость всех горных пород, включая мягкие, пластичные и сыпучие осадочные комплексы нефтегазовых месторождений. Реализация этой методики даст возможность получить количественные характеристики прочностных свойств всего спектра горных пород, от мягких до твердых категорий. [28]

Таким образом выделяются основные требования для реализации нового научного метода оценки динамической твердости горной породы:

1. Вне зависимости от величины прилагаемого усилия или затрачиваемой энергии, значение твердости для однородного тела при постоянной температуре должно быть материальной константой.
2. Поверхность объекта должна быть обработана и подготовлена в соответствии с методикой эксперимента.
3. Для точного измерения нужно исключить смещения материала в процессе его измерения
4. Твердость должна иметь точный и ясный физический смысл, точную и правильную размерность, характеризующую сопротивление материала пластической деформации.
5. Максимизировать в методе и показать, как статические стадии внедрения резца, так и динамические процессы разрушения

6. Организовывается техническая возможность изучение каждого процесса (динамического и статического) их стадий от начала вдавливания до получения процесса массового разрушения

7. Эксперимент можно проводить, регулируя все изменяемые параметры статического и динамического внедрения, чтобы выбрать более подходящие значения и достичь нужного результата.

8. Для контроля сил необходимо правильно регистрировать измеряемые параметры и использовать надежные технические средства. При исследовании образца с более высокой твердостью требуется более высокая нагрузка, а методы с более высокой точностью требуют более тщательной подготовки поверхности образца. Чем лучше будет подготовлен образец, тем меньше будет погрешность результата при использовании как стационарного, так и портативного твердомера. [36]

## **2.6 Выводы**

Существует множество способов измерения твердости, которые различаются к примеру, от характера воздействия на наконечник. Одни способы включают в себя вдавливание индентора, другие - удар или отскок наконечника-шарика. В зависимости от метода измерения, твердость может характеризовать сопротивление пластической деформации, упругие свойства или сопротивление разрушению. Метод Шрейнера Л. А. вдавливания является перспективным и высокоточным, при котором записывается диаграмма перемещения с одновременной регистрацией усилий. Но картина по данному методу, как и по всем другим не иллюстрирует понимания полного процесса разрушения испытуемого объекта горной породы, при бурении долотами PDC, вызывающее режуще-скалывающее действие на долото. Статическая твердость измеряется при плавном приложении нагрузки, а динамическая - ударом. В силу того, что нам нужен метод который полностью описывает картину представления обобщенных сил действующих на породы не только вдавливания, но и

параллельно с ним оценки влияния на породу сил режущего действия, целесообразно и актуально будет рассмотреть разработанный новый метод оценки динамической твердости горной породы для бурения долотами PDC, чтобы в дальнейшем иметь представления о сопротивляемости разрушению горной породы и точным образом проектировать долота PDC для улучшения производительности работы буровых подрядных организаций. [13]

### Глава 3. Актуальность разработки и использования новых количественных способов определения твердости горных пород для условий реальной эксплуатации PDC долот

Одна из задач современных нефтяных компаний заключается в рациональном выборе породоразрушающего инструмента для бурения различных видов скважин при планировании строительства. Точно рассчитанный выбор позволяет значительно сберечь бюджет капитальных затрат, поэтому использование новых типов и видов буровых долот является важной частью проектирования скважины. В последнее время долота с поликристаллическими алмазно твердосплавными резцами получают внимание от многих компаний.

Для правильного проектирования долот нужно осознавать, что при каждом интервале долото должно подходить для бурения метров проходки с определенными показателями твердости и абразивности.

Выбор долота идет из вероятностного исхода, так как свойства горных пород изменяются в обширных пределах. Известен метод выбора типа и класса долота с использованием номограмм, представленные в рисунке 3.1 [86]

Выбор долота PDC по номограммам

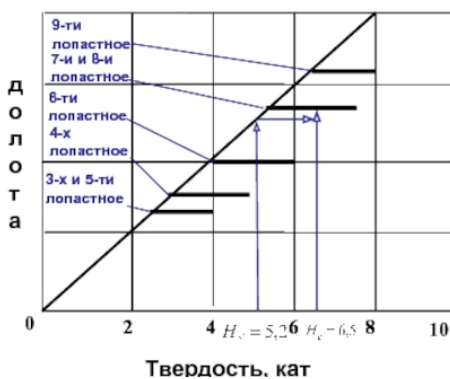


Рисунок 3.1 – Номограмма для выбора долот PDC по твердости

ООО НПП "Буринтех" предлагает диапазоны твердости и абразивности при использовании долот в разных категориях. Следовательно, чем более твёрдые и абразивные горные породы, тем больше лопастей должно иметь долото.

Долото Bit	Проходка на долото Bit footage		Механическая скорость Mechanical speed		$t_{11}$
	Я, м Я, m	$t_{12}$	$v_{11}$ , м/ч $v_{11}$ , m/h	$t_{12}$	
4-лопастное 4-blade	4529	1,43	47,0	9,14	2,06
6-лопастное 6-blade	4156		31,4		

Рисунок 2 – Рекомендации завода ООО НПП <<Буринтех>> по применению долот PDC

Таким образом для проектирования долот нужно иметь точное понимание значений твердости горных пород на всем участке бурения.

Описанные в пункте 2.4 методы оценки твердости горных пород не подходят для условий эксплуатации долот PDC так как силы описывающие в этом методе не точно повторяют силы, действующие при режуще-скалывающем действии резца долота PDC о породу. Поэтому Актуальность разработки нового метода количественной оценки твердости горных пород для целей проектирования долот PDC играет важную роль в современных научных институтах нефтяных компаний по всему миру. [84]

### 3.1 Техническая реализация метода оценки характеристики динамической твердости исследуемой горной породы

Для того чтобы быть наиболее точно приближённым к значениям динамической твердости и максимально точно показать процесс резание-скалывания долотами PDC в Томском Политехническом Университете на базе института геологоразведки была разработана лабораторная установка УМР, позволяющая не только смоделировать процесс разрушения горной породы, но и технически зарегистрировать силы, действующие на породы резцом на электронной технике. В такой установке резец находится в фиксированном

состоянии так, что он является неподвижным, а образец горной породы подается с помощью гидроцилиндров или же с помощью асинхронного двигателя, от вида варианта подачи будет зависеть мягкий или жесткий режим. [51]

Сама установка и узлы из чего она состоит представлены на рисунке 3.2

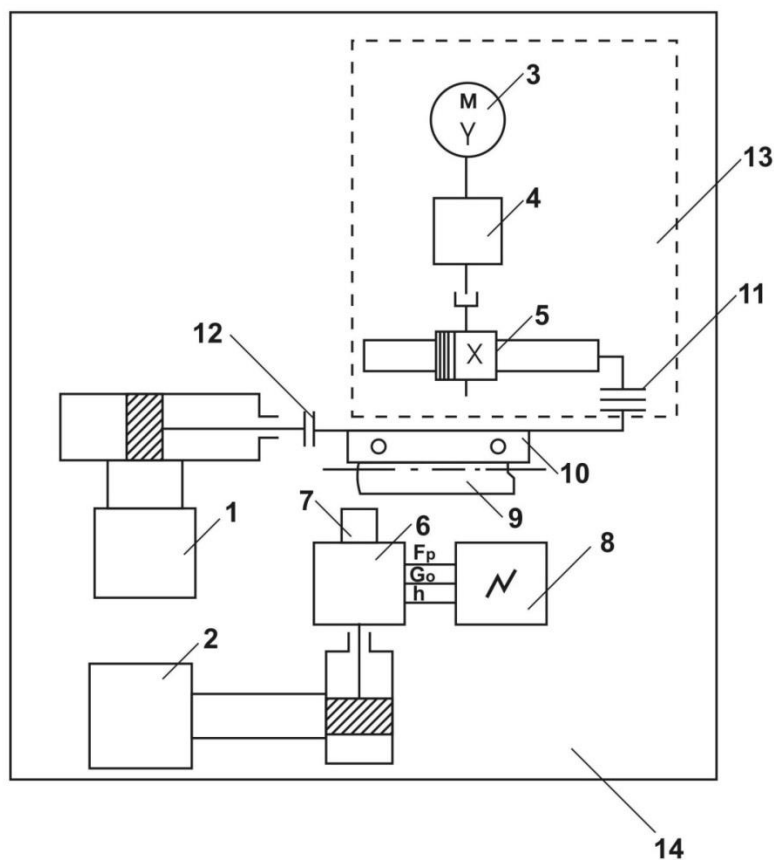


Рисунок 3.2 – схема установки УМР

1 – гидравлическая система мягкой подачи образца горной породы; 2 – гидравлическая система создания осевой нагрузки на резец; 3 – электродвигатель привода реечной подачи керна; 4 – коробка перемены передач; 5 – реечная подача керна; 6 – цифровой динамометр; 7 – резцедержатель; 8 – преобразовательно-измерительная система; 9 – образец горной породы (кern); 10 – кернадержатель; 11, 12 – механизмы сцепления; 13 – платформа механической подачи керна. [19]



Исследование гонных пород на определение твердости проводилась из разных образцов пород, саму породу устанавливали так чтобы в момент скола сила, действующая от резца на породу, находилась перпендикулярна слоистости образцов. [17]

Принцип работы установки заключается в следующем, на рисунке 2 резец закрепляется в резцедержателе 7 с которым он соединён с динамометром 6, закреплённая с помощью винтов в специальном устройстве 10 горная порода начинается двигаться либо с помощью гидравлической системы 1 – мягкой подачей, либо непосредственно с помощью асинхронного двигателя 3 через коробку переменной передачи 4. В качестве режущего элемента использовались резцы Stratamax и твердосплавные резцы по ГОСТ 880-75 формы Г 5303. Данные по динамометры передаются таким образом, что Держатель резца крепится в цифровом динамометрическом устройстве 6, который и подает сигналы на экран в момент изменения силы на образец породы. [17]

Каждый образец породы перед исследованием проходил обработку, такую как зачистка его от неровных поверхностей, контроль которой проводился с помощью временной модели микроскопа, а также на породе вырезалась определенное углубление, чтобы в момент передачи силы на резец, сам резец надавливая не скользил по образцу породы, а вдавливался в намеченные точки.

В данном опыте, контролировалось разрушение образца породы, в момент, когда на диаграммах появлялся скачек сил, замечалось откол определенной части образца, что характерно было слышно по звуку, а также резкому скачку значений осевой нагрузки.

В процессе резания изменение скорости производилось с помощью переменной коробки передач или же изменением давления в гидросистеме подачи керна, если же это мягкий вариант подачи.

Для эксперимента так же изменяли угол наклона резца относительно классификации породы, для очень мягких угол был от 5 до 10°, для мягких 15°, для абразивных пород угол был универсальным 20°, а также 30° для крепких пород. Схема угла наклона представлена на рисунке 3.3 [92]

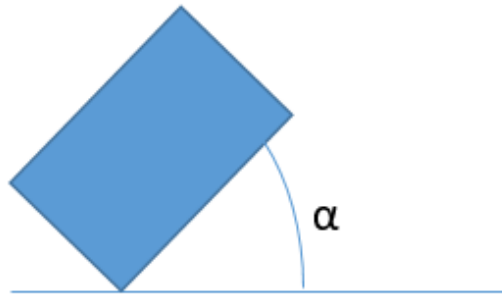


Рисунок 3.3 – Угол наклона резца установки УМР

### **3.2 Физическая сущность количественных результатов метода оценки динамической характеристики твердости породы для долот PDC.**

По методике, были описаны некоторые свойства исследуемых пород. На основании графиков, полученных в ходе работы на установки УМР получены такие характеристики породы как, жесткость горной породы –  $C_{ш}$ ; твердости –  $H_6$ , кГс/мм<sup>2</sup>; общая работа до разрушения –  $A_o$ , кГс м; удельная объемная работа разрушения –  $A_y$ , кГс м/см<sup>2</sup>; коэффициент пластичности –  $K$ ;

Сами значения определялись с помощью осциллограмм изображенной на рисунке 3.4 [41]

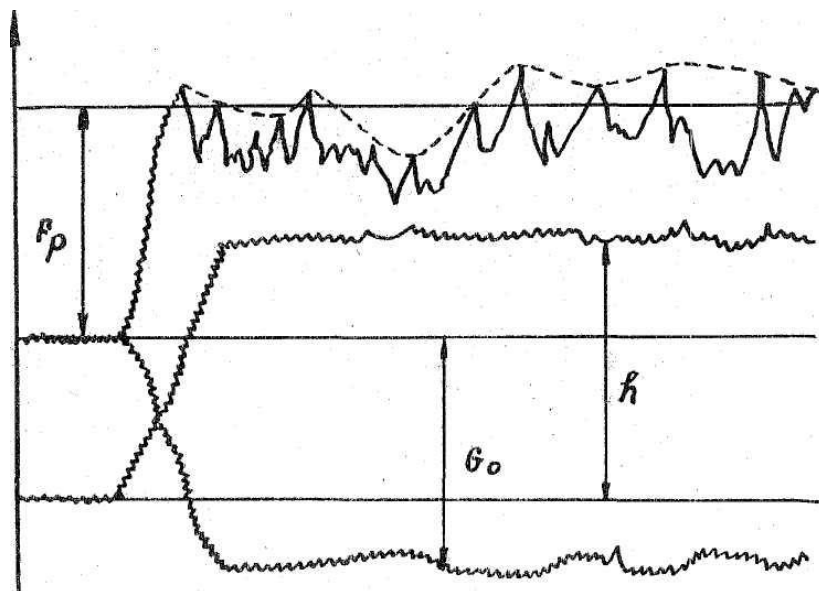


Рисунок 3.3 – Осциллограмма процесса динамического резания

Так как силы резания с вывода информации на экран замерялись по их максимальному значению, авторами было предложено брать среднюю арифметическую величину значений кривых, для этого проводилась кривая по максимумам сил, так чтоб средняя прямая линия по оси абсцисс и заключенные площади в заключенные между линией максимумов и средней прямой были равны. В точке О пересечения между средней линией и осью ординат и получалось средним значением максимального усилия. [37]

Значение находилось как среднее арифметическое:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (3.1)$$

где  $x_i$  –  $i$ -тый замер параметра;  $N$  - число опытов (замеров).

Среднее арифметическое значение  $\sigma_{\bar{x}}$  определялось не что иное, как доказательство надёжности определения  $\bar{x}$ .

$$\bar{x} \sigma_{\bar{x}} = \frac{1}{N} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{x} - x_i)^2}{N - 1,45}}. \quad (3.2)$$

Величина среднего арифметического значения  $\sigma_{\bar{x}}$  будет стремиться к нулю тогда, когда количество опытов  $N$  будет стремиться к бесконечности, так точнее будет определяться значение. [21]

Характеристика отдельных замеров в рассеивании оценивалось по формуле:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{1}{N} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{x} - x_i)^2}{N-1,45}}. \quad (3.3)$$

Коэффициент вариации  $\omega$  так же должен присутствовать в расчетах, для сравнения колебаний разнородных величин, к примеру если мы будем сравнивать значения твердости породы для разных пород:

$$\omega = \frac{\sigma}{\bar{x}} 100\%. \quad (3.4)$$

Так же, как и в любых расчетах будет присутствовать погрешность, которую тоже нужно учитывать, погрешность будет рассчитываться по формуле  $\Delta$ :

$$\Delta = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{x} - x_i)}{N} 100\%. \quad (3.5)$$

С вероятностью того, что могут присутствовать грубые ошибки такие как не правильное использование измерительной системы, неточности в отсчетах, автором было предложено отделять некачественные замеры с помощью метода Башинского: [21]

$$\varepsilon \leq \frac{t_k \sigma}{\sqrt{N-1}}, \quad (3.6)$$

где  $t_k$  - множитель, зависящий от надежности вероятности и от числа замеров  $N$ .

Исследуя переходный процесс динамического резания резцом, было предложено разделить силы на вертикальную силу вдавливания  $G_o$ , приложения силы  $F_p$  и при совместном действии сил резания  $G_o$  и  $F_p$  перемещения резца. [54]

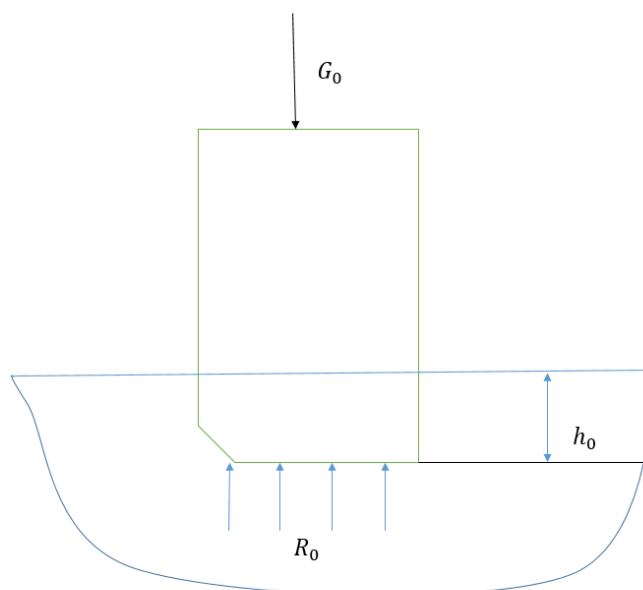


Рисунок 3.4– Схема нулевого равновесия сил при подаче осевой нагрузки на резец

При подачи осевой нагрузки  $G_o$  на резец порода либо деформируется либо резца углубится на  $h_o$  глубину,сам момент когда резец заверит внедрятся в породу будет говорить нам о том,что  $G_o \approx R_o$ .

Далее силовое равновесие будет нарушено путем подачи нагрузки  $F_p$ , изображенной на рисунке 3.6. Уравнение реакции принимает вид формула 3.7 или же 3.8: [54]

$$G_o \approx F_n + R_T; \quad (3.7)$$

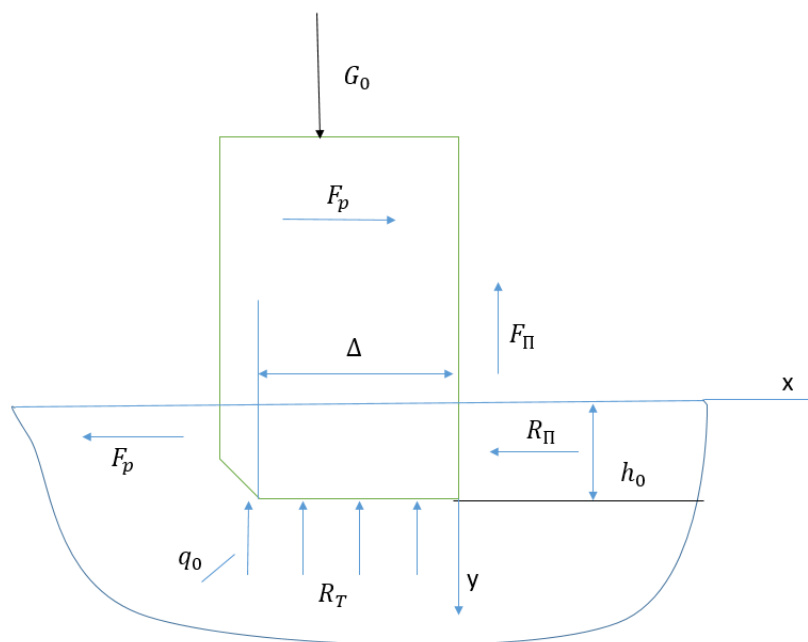


Рисунок 3.6– Схема действия сил в момент подачи силы резания на резец до момента перемещения вдоль породы

$$G_o \approx \Delta q_o + \mu b h_o \sigma, \quad (3.8)$$

Где  $R_T$  – сила реакции горной породы;  $h_o$  – глубина текущего внедрения резца;  $\Delta$  – размер притупления резца;  $b$  – ширина резца,  $q_o$  – распределенная силы возникающей в горной породе;  $\mu$  – коэффициент трения пары «резец-порода»;  $\sigma$  – сопротивление породы разрушению. [11]

Сила реакции горной породы  $R_n$  заменяет собой и компенсирует силу резания  $F_p$  и силу сопротивления трения под торцом резца  $F_T$ :

$$F_p \approx R_n + F_T, \quad (3.9)$$

Или:

$$F_p \approx b h_o \sigma + \mu \Delta q_o. \quad (3.10)$$

На рисунке 3.7 представлена схема перемещения резца вдоль плоскости резания по оси абсцисс на величину  $dx$ . [13]

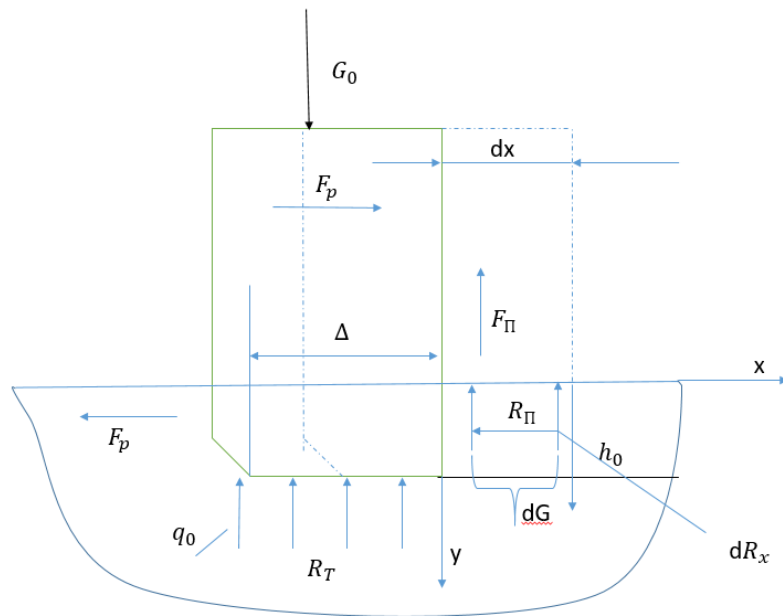


Рисунок 3.7– Схема нарушения силового баланса резца при перемещении его вдоль плоскости на величину  $dx$

За счет перемещения резца силовое взаимодействие нарушается так как уменьшится реакция породы на торце на величину  $dR_T$ :

$$dR_T = dG - dR_x, \quad (3.11)$$

Где  $dG$ -неуравновешенная нагрузка, которая возникает в следствии движения резца на целый участок породы  $dx$ ,  $dR_x$ -реакция породы, возникающая при деформации ее под элементом торца  $dx$  за счет нагрузки передней грани резца на слой породы. [16]

Элементарная реакция породы будет определяться по формуле 3.12

$$dR_x = R_x b \Delta dx. \quad (3.12)$$

Под действием силы  $dR_T$  резец внедряется в породу на высоту  $dh_y$ . Так же в этот момент происходит выравнивания сил  $dR_T$  и  $k dh_y$ .

$$dR_T = k dh_y, \quad (3.13)$$

где коэффициент —  $k$ -это пропорциональность величины внедрения.

Получается, что выражение 3.11 можно представить в виде формулы 3.14:

$$\Delta q_0 dx - R_x b \Delta dx = k dh_y. \quad (3.14)$$

После интегрирования потенцирования преобразований и разделения переменных наблюдается следующая зависимость: [10]

$$h_y = \frac{(G_0 - R_x - C \cdot e^{k \cdot x})}{b \cdot H_{\text{од}} \cdot \mu} \quad (3.15)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности;  $h_y$  – переменная величина внедрения резца в горную породу в переходном периоде резания (вдоль оси  $Y$ ), м;  $H_{\text{од}}$  – динамическая твердость горной породы, Н/м<sup>2</sup>;  $R_x$  – сила реакции породы на торец резца, возникающая за счёт воздействия его передней грани на разрушаемую горную породу при перемещении вдоль оси  $x$ , Н;  $b$  – ширина резца, м;  $\mu$  – коэффициент трения пары «резец-порода»;  $G_0$  – осевая нагрузка, Н;  $C$  – постоянная интегрирования. [17]

С помощью формулы авторы пришли к такому расчету аналитической траектории движения резца рисунок 3.8 [80]

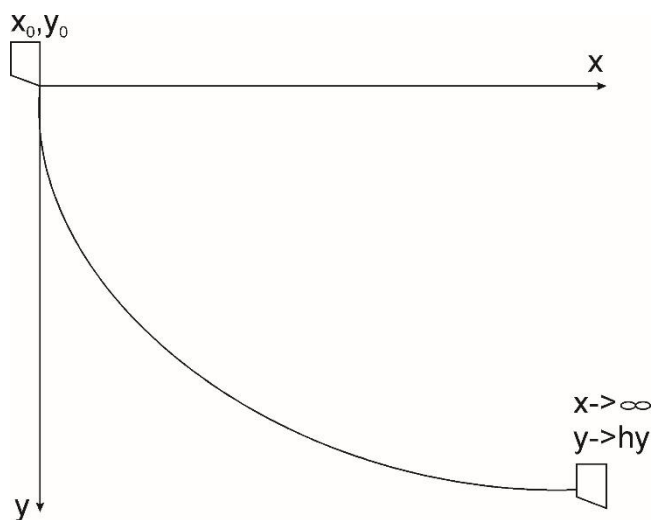


Рисунок 3.8– Аналитическая траектория перемещения режущего элемента от начала до завершения переходного периода резания

На основании аналитически рассчитанной траектории был сделан вывод, что имеет значимость переходный процесс от статического вдавливания элемента в горную породу к динамическому внедрению резца. [70]



При условии перемещения резца вдоль плоскости резания при  $x \rightarrow \infty$ , процесс резания выходит на стадию динамического резания, а выражение 3.15 будет иметь вид: [63]

$$h_y = \frac{(G_0 - R_x)}{b \cdot H_{\text{вд}} \cdot \mu}. \quad (3.16)$$

Автором было предложено что процесс перехода, когда уже началось динамическое резания породы, определяется величиной установившейся стружки снимаемой каждым резцом с горной породы.

А сам размер этой стружки, формируемый резцом, определяет траекторию инструмента и величину углубления если смотреть на формулу 3.16. Значит значение  $R_x$  есть ничто иное как динамическая реакция горной породы под действием осевой нагрузки. [61]

Исследования автора показали что величину динамической реакции математическим путем можно определить с помощью формулы Фламана-Буссинеска:

$$\sigma_h = \frac{3F \cos \varphi \sin \varphi}{2\pi r^2}, \quad (3.17)$$

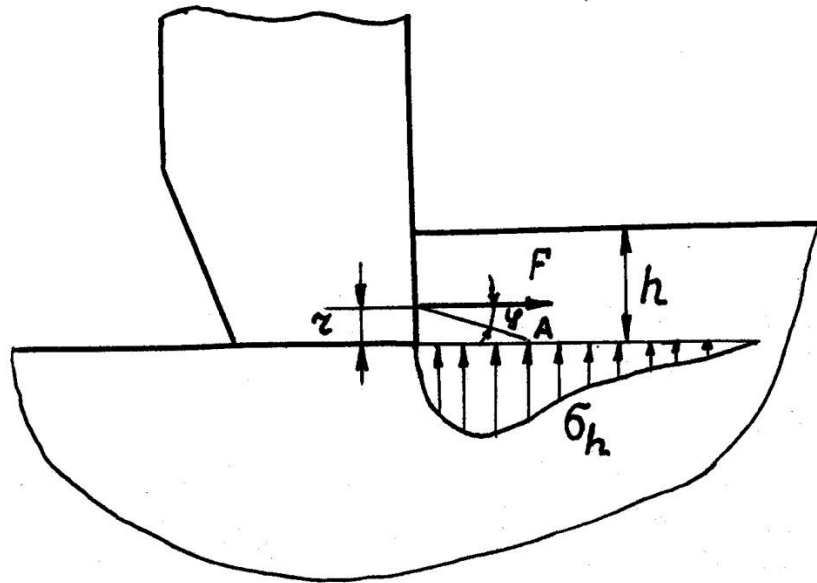


Рисунок 3.9 – Схема взаимодействия резца с породой для решения уравнения Фламана-Буссинеска [87]

Если проинтегрировать уравнение 3.17, то можно получить суммарное значение

$$\sigma_{h\Sigma} = R_x.$$

$$R_x = \frac{0,1F \cos 2\varphi}{r^2}, \quad (3.18)$$

Если подставить выражение  $R_x$  в формулу 3.16 и преобразуя его, получим :

$$h = \frac{G_o}{\mu b H_{вд} (1 + 0,1 K_1 S_k)}, \quad (3.19)$$

где  $G_o$  – осевая нагрузка, Н;  $H_{вд}$  – динамическая твердость горной породы, Н/м<sup>2</sup>;  $b$  – ширина резца, м;  $K_1$  – коэффициент, характеризующий положение точки приложения горизонтальной силы резания и угла точки расчета напряжений, 1/кв.м.;  $K_1 = \cos 2\varphi l/r^2$ ;  $S_k$  – площадь торцевого контакта ПРЭ (резца) с горной породой. [86]

Окончательным это выражение будет иметь вид формула 3.20

$$h = \frac{G_o}{b H_{вд} e^{kV_l} (\mu + 0,1 K_1 S_k)}, \quad (3.20)$$

где  $V_d$ -линейная скорость перемещения резца,  $K$ -коэффициент эмпиричности. [51]

Таким образом математическая модель формула 3.20 будет является формулой, для расчета твердости горной породы математическим путем.

Для экспериментального определения динамической твердости горной породы автором предложена следующая схема лабораторной установки УМР: [57]

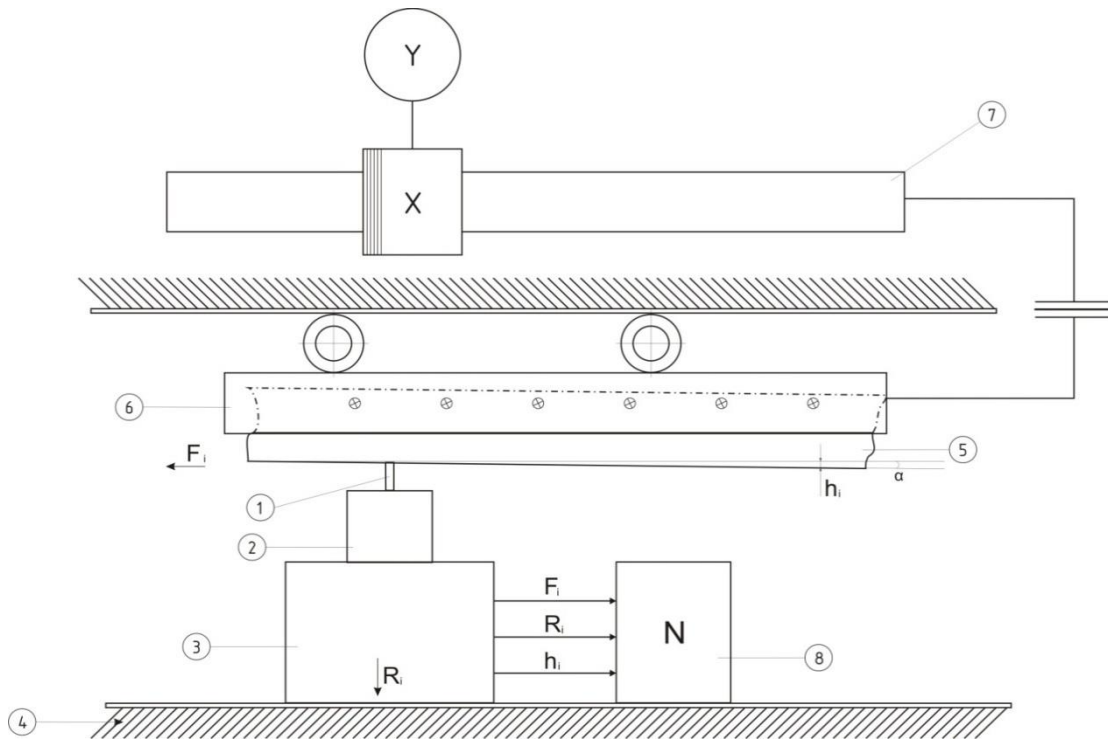


Рисунок 3.10– Установка УМР для определения динамической твердости пород

Если рассматривать более подробно, то на рисунке 3.10 видно как закреплен резец и как направлена порода к резцу и какие реакции действуют во время лабораторного эксперимента: [90]

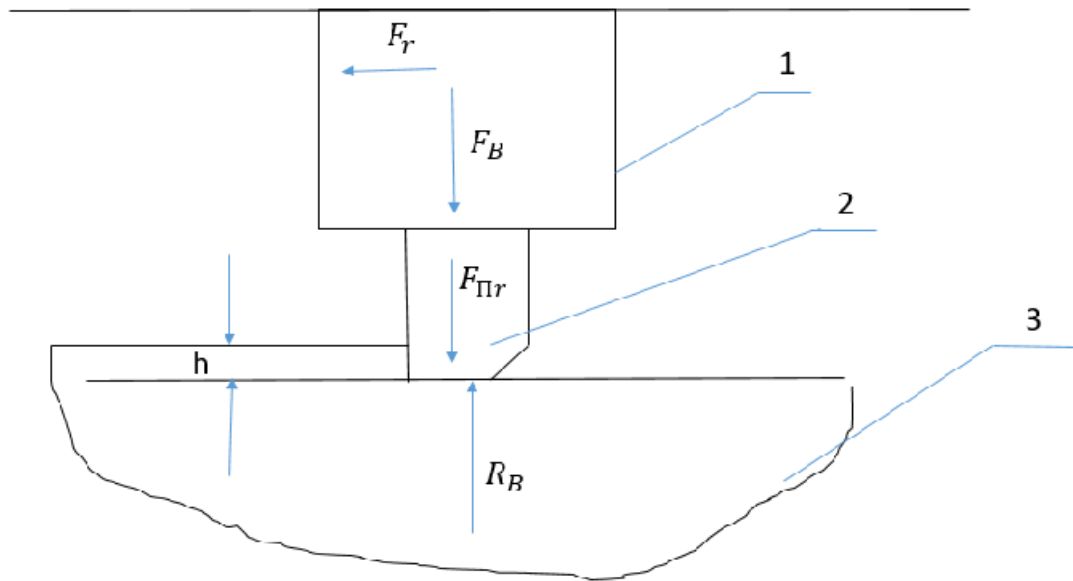


Рисунок 3.11– Схема установки резца и породу на жесткую

Где 1 – цифровой динамометр; 2 – породоразрушающий элемент (резец); 3 – исследуемый образец горной породы. [84]

Реализуя данную схему позволяет, физически смоделировать установившейся режим динамического процесса резания скалывания и определяя определенные параметры, рассчитывать твердость пород.

Для правильного получения данных в установку входит, силовое устройство которое подает осевую нагрузку на резец, сам режущий элемент 1 в держателе 2, закрепленный в устройстве крепежа 5 образец породы 6, перемещать специальным придуманным устройством-механизмом 7 относительно резца (смотри рисунок 3.9). [81]

Проводились разные эксперименты с диаметрами образцов от 40 до 100 мм и размером длины от 15 см, и определенным углом наклона резца. Стоит отметить что на такой лабораторной установки получалось смоделировать процессы резания-скалывания от растирания до объёмного разрушения. Далее силовые характеристики регистрировались с помощью цифровых динамометров

и выводились на компьютер 8 и преобразовывались на программных продуктах типа CAD. Линейную скорость подбирали относительно прочности пород и данных о частоте оборотов долот режуще скальвующего действия, на момент эксперимента линейную скорость брали равной 1,57 м/с. Полученными результатами эксперимента на установке УМР является силовая кривая, на рисунке 3.11 представлена силовая кривая для резания алевролита. [79]

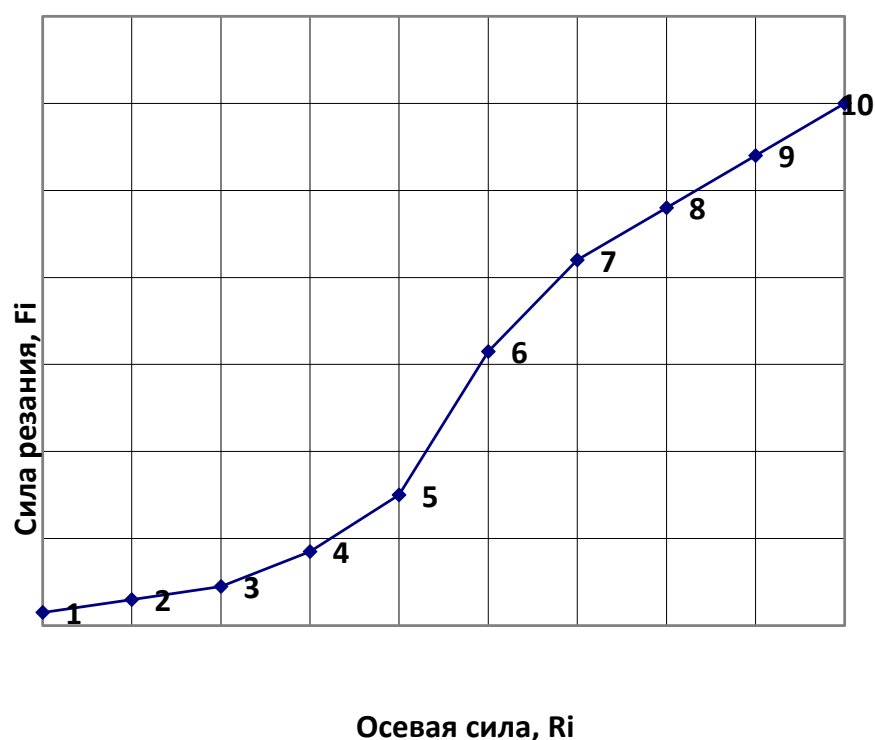


Рисунок 3.11 – силовая кривая для резания алевролита полученная на лабораторной аппаратуре УМР

В силовой кривой отмечаются несколько участков, к примеру 1-7 характеризуется как начальный этап истирания породы 1-3, а 3-7 как переходный истирающе-усталостный. [85]

Участок 7-10 характеризует деформацию породы как объёмное разрушение, стоит отметить что в эксперименте если не достигается участок 7-10 то принимается решение изменить угол наклона резца, так как процесс резания 7-10 характеризуется как участок количественной стабилизации коэффициента сопротивления  $K_p$ .

Так как говорилось раньше, что для определения твердости горной породы при процессе резания-скалывания важен участок объёмного разрушения, то для расчета показателя  $H_{вд}$  будем брать значения  $R_i$  с силовой кривой в точке 7, так как она характеризует начало объёмного разрушения.

В ходе эксперимента доказано, что в процессе максимальных моментов вращения резец склонен больше всего к деформации и сколам что приведет его в недееспособное состояние.

В ходе экспериментов автором регистрировались данные по породам и заносились в таблицу, часть таблицы представлена ниже таблица 3.1

Таблица 3.1 – данные по динамической твердости полученные в ходе лабораторных экспериментов на установке УМР. [21]

№ п/п	Краткое наименование горной породы	Сравнительные значения показателей твердости исследуемых горных пород, Н/мм <sup>2</sup>	
		Твердость по Л.А.Шрейнеру, $H_e$	Динамическая твердость, $H_{вд}$
1	Глина	не определяется	10,09
1	Суглинок	не определяется	10,12
2	Аргиллит	740,0	30,8
3	Песчаник	1740,0	80,4
4	Алевролит окварцованный	2630,0	140,4
5	Окварцованный песчаник	2750,0	150,8
6	Сиенит	3700,0	260,3

### 3.3. Применение результатов оценки характеристик динамической твердости для технологии бурения скважин долотами PDC.

При проектировании энергетических характеристик современных турбобуров и винтовых забойных машин широко используется параметр "удельный момент на долоте"  $m$ , который характеризует связь крутящего момента  $M$  с осевой нагрузкой на долоте  $G$ . Ученные обнаружили [], что величина  $m$  фактически определяет взаимодействие между динамическими силами резания, но до настоящего времени исследователи не придавали этому параметру объективно важного значения из-за отсутствия результативных данных. Кроме того, в некоторых работах считалось линейное взаимодействие сил резания как показано в формуле 3.21

$$M = mG. \quad (3.21)$$

Однако, исследования автора [25, 27], описанные в диссертации, показывают более сложную связь между силой резания (крутящим моментом) и осевой нагрузкой для породоразрушающих инструментов режуще-скалывающего действия (смотрите рисунок 3.8). Количественное взаимодействие сил резания изменяется в зависимости от режимов разрушения. Линейная связь между силами резания возникает только при объемном режиме разрушения пород режущими элементами долота (смотрите рисунок 3.8). В других режимах разрушения горных пород инструментами режуще-скалывающего действия линейная связь между силой резания и осевой нагрузкой отсутствует. Поэтому для достижения большей точности и объективности необходимо учитывать типоразмер долота, механические свойства горных пород [] и режим разрушения пород конкретным породоразрушающим инструментом.

Важно отметить, что  $K_p$  и  $m$  имеют взаимосвязь. [81]

$$m = K_p R_d, \quad (3.22)$$

где  $R_d$  – радиус долота.

Расчеты «удельного момента» были проведены на основе данных о горных породах месторождений Западной Сибири. В таблице 3.2 приведены усредненные значения удельных моментов, которые были рассчитаны по формуле 3.22 и результатам испытаний ГЗД и электробуров [88]. Расчетные

данные превышают испытательные результаты более чем в 2 раза, что говорит о том, что производственные испытания производились на режимах разрушения горных пород, отличных от оптимальных объемных режимов динамического резания. Для проверки этого факта были проведены вычисления, которые показали, что для истирающего или усталостно-истирающего режимов работы долот с АТП, фактические и расчетные данные практически совпадают (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Результаты исследования удельных моментов при разных режимах разрушения

Регион	Тип долота	Удельный момент, $m$	
		по формуле 7.2	по испытаниям ГЗД [88]
Западная Сибирь Объёмное разрушение	АТП (PDC – диаметром 195-295 мм)	0,09 – 0,15	0,040 – 0,050
Западная Сибирь Истирающее разрушение	АТП (PDC – диаметром 195-295 мм)	0,046 - 0,058	0,040 - 0,050

В данном тексте происходит рассмотрение твердости и абразивности горных пород как случайных величин, а также обсуждение диапазона применения долот как варьируемой случайной величины. В данном контексте принято оценивать границы размаха варьирования с вероятностью 0,95. Известно, что распределения твердости и абразивности горных пород измерены в категориях и соответствуют нормальному закону, что позволяет применить метод статистической обработки малых выборок. Следовательно, для оценки параметров от среднего до верхнего значения твердости и абразивности горных пород, для которых используются долота ООО «НПП «Буринтех», используется таблица 3.3. долота по твердости горной породы, при условии, что абразивность находится в диапазоне от 2 до 4 кат. [77]



Из графиков на рисунке 3.3 можно сделать вывод, что выбор долота для разбуривания горной породы зависит от ее твердости и абразивности. Чем выше эти показатели, тем больше лопастей должно быть у долота. Номограммы представлены в виде двух графиков для определения подходящего долота на основе твердости и абразивности горной породы. Для каждого типа долота на графике указаны диапазон применимости в зависимости от этих показателей. Для определенного типа долота (например, 3-лопастного) можно найти соответствующий диапазон на графике и выбрать подходящий вариант отталкиваясь от твердости и абразивности. [21]

Некоторые значения точки графиков могут совпадать, например, области твердости горных пород для 3- и 5-лопастных долот. При выборе долота следует учитывать параметры механических свойств горных пород, такие как твердость и абразивность. Для этого нужно отложить на оси абсцисс величину твердости  $\gamma$  и провести перпендикуляр до пересечения с диагональю номограммы. Затем из точки  $E$ , которая соответствует верхнему значению твердости, нужно восстановить перпендикуляр до пересечения с ближайшим отрезком, который соответствует области применения долота. Если перпендикуляр пересекает оба отрезка, то предпочтение отдается долоту на нижнем отрезке. Но если перпендикуляр пересекает только верхний отрезок, то перспективным будет только соответствующее долото. [22]

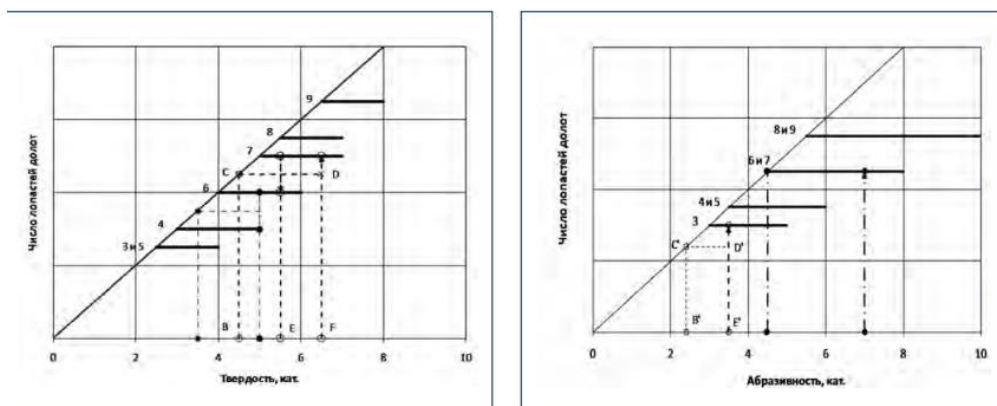


Рисунок 3.3 – Графики зависимости лопастей долота от твердости и абразивности

Таблица 3.3 – Области применения долот PDC изготавливаемых на заводе [71]

Количество лопастей долот Number of bit blades	Твердость горных пород Hardness of rocks		Абразивность горных пород Abrasive-ness of rocks	
	H, кат. H, cat.	H <sub>r</sub> , кат. H <sub>r</sub> , cat.	Ā, кат. Ā, cat.	A <sub>r</sub> , кат. A <sub>r</sub> , cat.
3	2,5	4	3,0	5
4	3,0	5	3,5	6
5	2,5	4	3,5	6
6	4,0	6	4,5	8
7	5,0	7	4,5	8
8	5,5	7	5,5	10
9	6,5	8	5,5	10

### 3.4 Выводы

Актуальность разработки нового способа оценки динамической твердости горной породы заключается в том, что в научной базе данных существует малое представление о определении динамической твердости для бурения интервалов долотами PDC. Разработанная установка УМР дает обособленное представление о действии сил режуще-скалывающего действия и исходя из реальных условий моделирует процесс разрушения горной породы поликристаллическими долотами. С помощью установки и выведенными формулами по образцу породы получилось определить динамическую твердость и рассчитать глубину резания реза, что позволяет благодаря достоверным знаниям твердости проектировать долото PDC под определенные виды горных пород, в зависимости от реальных условий, долота будут разных лопастей.

#### **4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Цель данного раздела заключается в аналитической оценке и составлении сметной стоимости строительства скважины на одном из месторождений Западной Сибири. В рамках данной работы производится оценка экономической составляющей при строительстве наклонно-направленной скважины глубиной 2670 метров на [КОНФИДЕНЦИАЛЬНО] месторождении.

##### **4.1 Расчет сметной стоимости подготовительных работ**

Первостепенной задачей при строительстве скважины является подготовка площадки, а именно ряд подготовительных работ, таких как валка лесного покрова на участке и трелевка. Данные о размерах выбранного участка определяются согласно СН-462-74 «Нормы отвода земель для сооружения геологоразведочных скважин» [86].

**Валка.** Операция – валка деревьев мягких пород с корня, диаметр стволов: до 16 см. Согласно ФЕР 01-02-099-01 [87] устанавливается оплата труда рабочих, эксплуатации машин (пила с карбюраторным двигателем) и общие трудозатраты.

**Трелевка.** Операция - трелевка древесины на расстояние до 300 м тракторами мощностью: 59 кВт (80 л.с.), диаметр стволов до 20 см. Согласно ФЕР 01-02-100-01 [88] определяется оплата труда рабочих, эксплуатации машин и общие трудозатраты.

Сводная сметная стоимость подготовительных работ представлена в таблице П.А.5.

##### **4.2 Расчет сметной стоимости монтажных-демонтажных работ**

Перечень работ по монтажным и демонтажным работам:

1. сооружение и подготовка фундамента под основание и дополнительное оборудование;
2. сооружение конструктивных узлов вышки и привышечных сооружений;
3. сооружение буровой установки;
4. установка дополнительного оборудования;
5. установка блока циркуляционной и пневмосистем;
6. обвязка емкостей трубопроводами.

Каждый перечень операций на данном этапе строительства скважины формирует сметную стоимость монтажных и демонтажных работ. Перечень операций включает монтаж и демонтаж технологических элементов.

Номера района работ определяется в соответствии со СНиП IV-5-82 Сборник 49 [89] и соответствует 22а. В соответствии с данным документом также определяем коэффициенты для расчета расценок на монтажные работы: 0,98 (прямые затраты) и 0,95 (основная заработная плата рабочих), также определяем коэффициенты к расценкам на строительство (монтаж) для расчета стоимости разборки (демонтажа) в соответствии с расценками, т.е. (к.р. и к.р.з.). Стоимость строительства и основную заработную плату рабочих определяем согласно СНиП IV-5-82 Сборник 49 в соответствии с выбранным районом.

Сводная сметная стоимость монтажных-демонтажных работ представлена в таблице П.А.5.

### **4.3 Расчет времени бурения и крепления скважин**

Расчет сметной стоимости бурения и крепления скважины является следующим этапом формирования общей сметной стоимости строительства скважины. При этом выделяются интервалы бурения, осуществляется подбор оборудования для бурения и его типоразмеров, подсчитывается общее время работ и операций, на основании которых формируется сметная стоимость бурения и крепления скважины.

Конструкция скважины определяется геологическими особенностями и пластовыми характеристиками, в соответствии с которыми подбираются типоразмеры инструмента и глубины спуска и цементирования колонн.

Направление спускается в скважину для предупреждения размыва и обрушения горных пород вокруг устья при бурении интервала под кондуктор. Рекомендуются спускать направление с учетом перекрытия интервала четвертичных отложений на 10 м. Глубину спуска направления принимаем равной 90 метров. Глубину спуска кондуктора принимаем равной 675 метров. Эксплуатационная колонна в вертикальной и наклонно-направленной скважине должна перекрывать подошву самого нижнего продуктивного пласта на высоту, рассчитываемую из условия, что на каждые 1000 м скважины величина перекрытия составляет 10 м. Глубина спуска эксплуатационной колонны будет составлять 2670 метров.

В таблице 4.1 представлены интервалы спуска и цементирования обсадных колонн.

Проведя анализ по времени работ были выделены следующие выводы, если правильно подобрать и использовать долота PDC с нужными диаметрами и верно рассчитанными характеристиками, можно добиться экономии времени на бурении 1 скважины, в данном случае если использовать долота PDC, можно увеличить скорость проходки на 20 % и добиться роста механической скорости на 15 %, и тем самым уменьшить время бурения и стоимость почасовой работы рабочих и эксплуатацию машин на производственном объекте, данные для сравнения представлены в таблицах 4.2 и 4.3.

Таблица 4.1 – Глубины спуска и интервалы цементирования обсадных колонн

<b>Обсадная колонна</b>	<b>Глубина спуска, м</b>	<b>Интервал цементирования, м</b>
Направление	90	0-90
Кондуктор	675	0-675
Эксплуатационная колонна	2670	175-2670

Для бурения интервалов в таблице 4.2 под обсадные колонны используются следующие долота:

1. направление – PDC долото диаметром 393,7 мм;
2. кондуктор – PDC долото диаметром 295,3 мм;
3. эксплуатационная колонна – PDC долото диаметром 215,9 мм.

Для бурения интервалов в таблице 4.3 под обсадные колонны используются следующие долота:

1. направление – шарошечное долото диаметром 393,7 мм;
2. кондуктор – шарошечное долото диаметром 295,3 мм;
3. эксплуатационная колонна – шарошечное долото диаметром 215,9 мм.

В таблице П.А.1 и П.А.2 представлены расчетные данные по времени бурения и креплению скважины (Приложение А.4).

Результаты подсчета продолжительности бурения и крепления скважины представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Продолжительность бурения долотами PDC и крепления скважины

Номер обсадной колонны	Название колонны	Продолжительность крепления, сут.	Интервал бурения, м		Продолжительность бурения, сут.
			от (верх)	до (низ)	
1	2	3	4	5	6
1	Направление	12,99	0	90	0,27
2	Кондуктор	29,97	90	675	6,3
3	Эксплуатационная	51,98	675	2670	10,7
<b>Всего, сут</b>	112,21	94,94			17,27

Таблица 4.3 – Продолжительность бурения шарошечными долотами и крепления скважины

Номер обсадной колонны	Название колонны	Продолжитель -ность крепления, сут.	Интервал бурения, м		Продолжитель -ность бурения, сут.
			от (верх)	до (низ)	
1	2	3	4	5	6
1	Направление	16,511	0	90	1,042
2	Кондуктор	31,105	90	675	7,805
3	Эксплуатационн ая	62,376	675	2670	25,367
<b>Всего, сут</b>	144,206	109,992			34,214

#### 5.4 Расчет сметной стоимости бурения и крепления скважин

В расценках на бурение скважин предусмотрены следующие работы: бурение, крепление, свободный спуск или подъем труб, цементирование, тампонаж глиной или цементом, откачки и другие, сопутствующие устройству скважин работы. В данном пункте производится расчет сметной стоимости бурения и крепления скважины на основании государственных элементных сметных норм на строительные работы [90, 91]. Таблицы П.А.3 и П.А.4 содержат перечень расчетных данных сметной стоимость бурения и крепления скважины.

#### 4.5 Расчет сметной стоимости освоения скважины

Освоение скважины (вызов притока) является важнейшей процедурой, поскольку успешное освоение скважины формирует стабильную проектную эксплуатацию скважины в процессе добычи. Сметная стоимость освоения скважины составляется на основе операций по вторичному вскрытию пласта и вызову притока. Сметная стоимость освоения скважины представлена в таблице П.А.5.

На основании работ по строительству скважины, в конечном итоге формируется сводный сметный расчет по всему перечню проделанных работ на каждом отдельном этапе (таблица П.А.6 и П.А.7). Общая стоимость строительства скважины глубиной 2670 метров на территории месторождения

Западной Сибири при бурении шарошечными долотами в районе работ 22а составляет **76,79** млн. рублей с учетом заработной платы рабочих [92], а при использовании оптимально рассчитанных долот PDC составило **71,3** млн рублей.



## 5 Социальная ответственность

Бурение нефтяных и газовых скважин – сложный технологический комплекс операций по строительству скважины. В процессе бурения используются различные технические и технологические средства. Одним из таких средств является использование специальных промывочных жидкостей, которые предназначены не только для очистки ствола скважины от выбуренной породы, но и для сохранения физико-механических и гидродинамических параметров пласта, в частности, исходной проницаемости. Такие жидкости называются буровыми растворами для первичного вскрытия продуктивных пластов, а непосредственным объектом исследования в данной работе является определенный вид таких жидкостей – биополимерный буровой раствор. Характерными особенностями этого раствора являются высокие технологические показатели эффективности и применение органических полимерных соединений (биополимеров).

Данные системы, непосредственно, применяются на промышленных объектах нефтегазовой отрасли. Тем не менее, данная исследовательская работа направлена на разработку и усовершенствование существующих биополимерных систем и осуществляется в рамках лабораторных исследований на базе Национального Томского политехнического университета в Научно-образовательном центре нефтегазовой химии и технологии. Оценка факторов, воздействующих на исполнительное лицо, будет проводится на основании деятельности исследователя – лаборанта. Химическими веществами, с которыми осуществляется непосредственная работа, являются: вода, каустическая сода, хлорид калия, ксантановый биополимер, крахмал, карбонат кальция, поверхностно-активные вещества. Основное применяемое оборудование: низкооборотные смесительные агрегаты, блендеры и миксеры, фильтр-прессы, нагревающие установки и печи.

Данный раздел посвящен оценке и анализу основных влияющих факторов на работоспособность и благосостояние исследовательского персонала.

## **5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

### **5.1.1 Правовые нормы трудового законодательства**

Рабочий и исследовательский состав, в лице лаборантов, допускается к работе с химическими веществами и всему соответствующему оборудованию после вводного и первичного инструктирования и проверке необходимых знаний, при этом исполнительные лица должны иметь среднее профессиональное образование без стажа работы или начальное профессиональное образование со стажем работы по специальности не менее 2 лет.

Допуск к работе осуществляется в том случае, если исполнительное лицо ознакомлено и прошло проверку знаний следующего перечня инструктажей и контролирующих документов [55]:

- 1) действующую инструкцию по оказанию первой помощи пострадавшим в связи с несчастными случаями;
- 2) проверку знаний инструкции по охране труда;
- 3) первичный инструктаж на рабочем месте;
- 4) инструктаж по применению средств защиты, необходимых для безопасного выполнения работ.

Режим рабочего времени регламентирован и установлен в рамках трудового кодекса Российской Федерации [56], в соответствии с которым, лабораторно-исследовательский персонал осуществляет трудовую деятельность согласно следующему графику: будние дни (с понедельника по пятницу) с 9:00 до 18:00 по местному времени с учетом обеденного перерыва в интервале времени 13:00-14:00. Таким образом, регламентированный объем рабочего времени в неделю составляет 40 часов. Дополнительное время работы обозначается необходимостью проведения плановых исследований и соответствующим контролем.

При работе в лаборатории в проведении исследовательской деятельности, обеспечивается как защита персональных данных работника, так и устанавливаемая конфиденциальность.

Деятельность студента-магистра, как лаборанта, в рамках лабораторной и исследовательской работы, ввиду отсутствия трудового договора, заработной платой не облагается.

Лаборанту химического анализа бесплатно должны выдаваться согласно отраслевым нормам следующие средства индивидуальной защиты [57, 58]:

- 1) халат хлопчатобумажный для защиты от общих производственных загрязнений и механических воздействий (1 шт на 12 мес);
- 2) сапоги резиновые (на 12 мес);
- 3) фартук прорезиненный из полимерных материалов с нагрудником (на 6 мес);
- 4) перчатки резиновые и трикотажные (на 1 мес, по 12 пар; до износа);
- 5) средство индивидуальной защиты органов дыхания: фильтрующее или изолирующее (до износа);
- 6) портянки (на 3 мес);
- 7) очки защитные (до износа).

При выдаче двойного сменного комплекта спецодежды срок носки должен удваиваться.

В зависимости от характера работ и условий их производства лаборанту бесплатно временно должна выдаваться дополнительная спецодежда и защитные средства для этих условий.

Условия труда в лаборатории являются допустимыми (2 класс), при которых на работника воздействуют вредные и (или) опасные производственные факторы, при этом уровни воздействия не превышают уровни, установленные гигиеническими нормативами условий труда, а измененное функциональное состояние организма восстанавливается во время регламентированного отдыха или к началу следующего рабочего дня (смены). Согласно ст. 92, ст. 117, ст. 147

и ст. 219 ТК РФ при допустимых условиях труда (2 класс) повышения оплаты труда по сравнению с нормальными условиями труда не предоставляется [56]:

- 1) дополнительный отпуск «за вредность»;
- 2) сокращение рабочего времени;
- 3) льготное пенсионное обеспечение.

### **5.1.2 Эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны**

В целях оценки и контроля оптимальных условий работ, уровни физических и химических опасных и вредных производственных факторов, генерируемых производственным оборудованием в рабочую зону, а также воздействующих на работающего при непосредственном контакте с элементами конструкции, должны соответствовать требованиям безопасности, установленным нормативно-технической документацией, утвержденной в установленном порядке.

Рабочим местом лаборанта является помещение лаборатории со всем комплексом соответствующего исследовательского стендового оборудования. Лаборатория должно быть оснащена всеми необходимыми ресурсными линиями, а также удовлетворять ряду определенных требований и условий [55]:

- 1) энергоснабжение;
- 2) подводка холодной и горячей воды;
- 3) электрооборудование должно быть заземлено;
- 4) разводка коммуникаций к переносным приборам и нестационарному оборудованию должна проводиться открыто при помощи гибких проводов и шлангов, укрепленных на металлических трубопроводах зажимами;
- 5) электроосвещение помещения и вытяжных шкафов должно быть выполнено во взрывобезопасном исполнении;

6) выключатели должны быть установлены вне вытяжных шкафов;

7) помещение лаборатории должно быть оборудовано системами локального удаления воздуха из вытяжных шкафов или отдельных приборов и оборудования помимо общей приточно-вытяжной вентиляции;

8) рабочие столы и вытяжные шкафы для работы с химически активными веществами (кислотами, щелочами и др.) должны быть покрыты материалами, стойкими к агрессивной химической среде (как правило, металлические), и иметь бортики, предотвращающие стекание жидкости на пол;

9) вытяжные шкафы, в которых происходит выделением вредных и горючих паров и газов при проведении работ, должны быть оборудованы верхними и нижними отсосами воздуха, а для обеспечения тяги дверцы вытяжных шкафов следует держать закрытыми с небольшим зазором внизу во время работ;

10) металлические шкафы для хранения химических веществ должны быть зарыты на ключ и опечатаны;

11) входящие в конструкцию производственного оборудования специальные технические и санитарно-технические средства (ограждения, экраны, вентиляторы и др.), обеспечивающие устранение или снижение уровней опасных и вредных производственных факторов до допустимых значений, не должны затруднять выполнение трудовых действий;

12) размещение в пределах лаборатории средств первой помощи (аптечка), пожаротушения, индивидуальной и коллективной защиты.

## **5.2 Производственная безопасность**

### **5.2.1 Анализ выявленных вредных и опасных факторов**

Вредным производственным фактором (ВПФ) называется такой фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях может вызвать нарушение состояния здоровья, временное или стойкое снижение работоспособности, а также соответствующее профессиональное заболевание.

Опасным производственным фактором (ОПФ) называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к травме или к другому внезапному резкому ухудшению здоровья.

Вредное воздействие, которому подвержены исполнительные лица, классифицируется согласно ГОСТ 12.0.003-2015 [59] (таблица 5.1). В таблице приведены возможные вредные и опасные производственные факторы, которые могут оказать непосредственное влияние на работников, а также их основные источники.

Таблица 5.1 – Вредные и опасные факторы при приготовлении буровых растворов

Факторы	Этап работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1. Отсутствие или недостаток естественного света	+	+	–	ГОСТ 12.1.007-76 [60] ГОСТ 12.1.038-82 [61] ГОСТ 12.1.019-2017 [62] СП 52.13330.2016 [63] СанПиН 1.2.3685-21 [64] ПНД Ф 12.13.1-03 [65] ГОСТ 12.4.124-83 [66] СП 9.13130.2009 [67] СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [68]
2. Недостаточная освещенность рабочей зоны	–	+	+	
3. Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	
4. Повышенная температура поверхности оборудования	–	+	+	
5. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	+	+	
6. Раздражающие и токсические факторы	–	+	+	

Нерациональная расстановка рабочих столов в лаборатории может привести к тому, что в рабочей зоне будет пониженная естественная освещенность. Также возможен вариант, когда лаборатория находится в

помещении без окон. Негативно скажется и недостаточное количество источников искусственного освещения рабочего места лаборанта.

Несовершенное освещение оказывает воздействие на функционирование зрительного аппарата, то есть определяет зрительную работоспособность. Также оказывается влияние на психику человека, его эмоциональное состояние. В результате прилагаемых усилий для опознания четких или сомнительных световых сигналов происходит усталость центральной нервной системы. Люди могут ощущать усталость глаз и переутомление, работая при освещении низкого уровня, что приводит к снижению работоспособности. В некоторых случаях это приводит к головным болям.

Нормы освещенности для аналитической лаборатории, согласно СП 52.13330 [63], представлены в таблице 5.2.

$\Gamma^*$  – горизонтальная плоскость. Коэффициент естественной освещенности (КЕО) представляет собой выраженное в процентах отношение освещенности в данной точке помещения к одновременной освещенности точки, находящейся на горизонтальной плоскости вне помещения и освещенной рассеянным светом всего небосвода.

В лаборатории окна находятся только на одной стороне, поэтому в помещении необходимо произвести планировку мебели таким образом, чтобы ни один из элементов лабораторной мебели не создавал тень для любой из рабочих зон. Лаборатория буровых растворов оборудована светильниками «Армстронг», каждый из которых содержит по 4 электролюминесцентные лампы. Каждый светильник имеет световой поток равные 5200 Лм. Все 6 светильников создают благоприятную для работы освещенность рабочей зоны.

Показатели микроклимата должны обеспечивать сохранение теплового баланса человека с окружающей средой и поддержание оптимального или допустимого теплового состояния организма.

Оптимальные микроклиматические условия установлены по критериям оптимального теплового и функционального состояния человека. Они обеспечивают общее и локальное ощущение теплового комфорта в течение

рабочей смены при минимальном напряжении механизмов терморегуляции, не вызывают отклонений в состоянии здоровья, создают предпосылки для высокого уровня работоспособности и являются предпочтительными на рабочих местах.

Допустимые микроклиматические условия установлены по критериям допустимого теплового и функционального состояния человека на период 8-часовой рабочей смены. Они не вызывают повреждений или нарушений состояния здоровья, но могут приводить к возникновению общих и локальных ощущений теплового дискомфорта, напряжению механизмов терморегуляции, ухудшению самочувствия и понижению работоспособности.

Показателями, характеризующими микроклимат в производственных помещениях, являются:

- 1) температура воздуха;
- 2) температура поверхностей;
- 3) относительная влажность воздуха;
- 4) скорость движения воздуха;
- 5) интенсивность теплового облучения.

В качестве категории работ выбрана категория Ib, к которой относятся работы с интенсивностью энергозатрат 121-150 ккал/ч (140-174 Вт), которые сопровождаются некоторыми физическими напряжениями и производятся сидя, стоя или связанные с ходьбой.

Оптимальные и допустимые нормативные значения показателей микроклимата согласно СанПин 1.2.3685–21 [64] приведены в таблицах 5.3 и 5.4.

Помещение аудитории не оборудовано системами кондиционирования или вентиляции, воздухообмен в нем обеспечивается путем естественного проветривания помещения (открытие окон) на основании субъективных ощущений персонала. Вследствие этого температура в помещении неравномерно колеблется в пределах от 20 до 25°C, влажность от 30 до 60 %. В лаборатории имеется различное оборудование, в том числе и нагревательного действия (печь), и, при ее применении, возможен нагрев воздуха в лаборатории и снижение влажности. Из таблиц 5.3 и 5.4 можем сделать вывод, что рабочее



место находится в диапазоне допустимых величин показателей микроклимата для работы. Для соблюдения и поддержания оптимальных показателей микроклимата необходимо использовать систему кондиционирования, увлажнитель воздуха.

Таблица 5.2 – Нормы освещения для аналитической лаборатории

Помещение (рабочее место)	Плоскость нормирования освещенности и КЕО, высота плоскости над полом, м	Естественное освещение		Совмещенное освещение		Искусственное освещение				
		КЕО $e_n$ , %		КЕО $e_n$ , %		Освещенность, лк			Показатель дискомфорта (не более)	Коэффициент пульсации освещенности (не более), %
		при верхнем или комбинированном освещении	при боковом освещении	при верхнем или комбинированном освещении	при боковом освещении	При комбинированном освещении		При общем освещении		
						Всего	От общего			
Аналитическая лаборатория	Г-0,8 (горизонтальная)	4,0	1,5	2,4	0,9	600	400	500	40	10

Таблица 5.3 – Оптимальные величины показателей микроклимата в лаборатории

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Iб (140-174)	21-23	20-24	60-40	0,1
Теплый		22-24	21-25		

Таблица 5.4 – Допустимые величины показателей микроклимата в лаборатории

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С		Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	
		Диапазон ниже оптимальных величин	Диапазон выше оптимальных величин			Для диапазона температур воздуха ниже оптимальных величин, не более	Для диапазона температур воздуха выше оптимальных величин, не более
Холодный	Iб (140-174)	19,0-20,9	23,1-24,0	18,0-25,0	15-75	0,1	0,2
Теплый		20,0-21,9	24,1-28,0	19,0-29,0			

Опасность поражения электрическим током несут все электрические приборы, подключенные к сети (вискозиметры, мешалки, печь). Это может произойти либо при повреждении изоляции токоведущих проводов или частей оборудования, либо при отсутствующем заземлении оборудования. Ток в теле человека оказывает термическое, электролитическое и биологическое действие. Термическое воздействие выражается в ожогах, нагреве и повреждении капилляров, сосудов и вен. Электролитическое воздействие выражается в разложении крови и нарушении её состава. Биологическое воздействие выражается в нервных судорогах и раздражении тканей [69].

Значения напряжений прикосновения и токов при нормальном (неаварийном) режиме электроустановки согласно ГОСТ 12.1.038-82 [61] имеют следующие значения (не более):

- 1) переменный ток 50 Гц: напряжение – 2 В, сила тока – 0,3 мА;
- 2) постоянный ток: напряжение – 8 В, сила тока – 1 мА.

Согласно ПУЭ [70], по классификации помещений и по опасности поражения людей электрическим током лаборатория относится к помещениям без повышенной опасности, поскольку отсутствуют условия, которые бы создавали повышенную или особую опасность:

- 1) влажность воздуха не превышает 75%;
- 2) полы керамические нетокопроводящие;
- 3) отсутствие возможности одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам и т.п., с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования – с другой;

- 4) напряжение менее 380В переменного и 440В постоянного тока.

Для исключения поражения электрическим током согласно ГОСТ Р 12.1.019-2009 [62] в качестве коллективных средств защиты необходимо применить усиленную изоляцию токоведущих частей электрооборудования. Также по всей лаборатории обязательно к применению защитное заземление всех электроустановок. Для обеспечения защиты от поражения электрическим

током при прикосновении к металлическим нетоковедущим частям, которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции, необходимо применять диэлектрические перчатки (поскольку все электрооборудование в лаборатории является настольным и касание электроустановок возможно только руками, проводов на полу в зоне перемещения лаборанта нет).

Раздражающее и токсическое воздействие на организм человека оказывают химические вещества, с которыми ведется непосредственная работа в лаборатории при приготовлении систем буровых растворов из различных компонентов. По степени воздействия на организм человека все вредные вещества подразделяются согласно ГОСТ 12.1.007-76 [60] на четыре класса:

- 1) чрезвычайно опасные (1 класс);
- 2) высокоопасные (2 класс);
- 3) умеренно опасные (3 класс);
- 4) малоопасные (4 класс).

Часть используемых при исследовании веществ относится к 4 классу опасности (хлорид калия, ксантановая камедь, крахмал, карбонат кальция), ко второму классу – гидроксид натрия (каустическая сода). По характеру физиологического воздействия они проявляют раздражающее действие, т.е. действуют на поверхность тканей дыхательного тракта, слизистых оболочек, кожу, глаза, что определяет средства индивидуальной защиты (СИЗ).

### **5.2.2 Расчет системы искусственного освещения**

В Приложении А приведен расчет системы искусственного освещения для рабочей зоны (химической лаборатории), в рамках которой проводится исследовательская работа. Согласно размерам (10,0x8,5x4,0 м) и особенностям помещения, был произведен выбор светильника (в данном случае – ПВЛ), произведен расчет всех требуемых параметров, а также представлена планировка размещения светильников искусственного света (рисунок А).

### **5.3 Экологическая безопасность**

#### **5.3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду**

Как и любые отходы промышленности, отходы лабораторных исследований могут оказывать значительное отрицательное влияние на все компоненты природной среды – биосферу, атмосферу, гидросферу и литосферу. Под воздействием отходов разрушаются и гибнут флора и фауна, происходит загрязнение воздуха, почвы и воды. При этом в природе возникают не свойственные ей негативные явления. Примерами могут служить кислотные осадки в атмосфере, возникающий парниковый эффект, разрушение озонового слоя, нарушение кислотности почв и другие явления. Все это значительно снижает качество окружающей среды и негативно влияет на здоровье населения. Воздействие на атмосферу происходит при вытягивании химических испарений через вытяжную вентиляцию. Однако стоит отметить, что объемы реагентов, применяемых при одном эксперименте, генерируют незначительное количество вредных газов/аэрозолей.

Модели буровых растворов утилизируются через систему водоотведения и канализации, воздействие на гидросферу характеризуется качеством обработки стоков городскими очистными сооружениями. Воздействие на литосферу может быть также оценено качеством обработки стоков, после очистки вода попадает в окружающую среду.

#### **5.3.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды**

При выполнении опытов следует соблюдать инструкции и правила техники безопасности, производственной санитарии и пожарной безопасности, разработанные для данной лаборатории. Поскольку концентрации генерируемых газов небольшие, то достаточным методом защиты атмосферного воздуха будет рассеивание очищенных газов в атмосферном воздухе благодаря вытяжной вентиляции. Для очистки от возможных примесей можно применить фильтр воздушный абсолютной очистки ФВА (для фильтрующего модуля медицинских, лабораторных и общественных помещений) (рисунок 5.1).



Рисунок 5.1 – Фильтр воздушный абсолютной очистки (ФВА)

Для защиты гидросферы в условиях лаборатории необходимо применение устройств с физико-химическими методами очистки. Широко распространена адсорбционная технология с применением активированных углей, которая позволяет получать остаточные концентрации основных загрязняющих веществ ниже нормативных значений. Также необходимы процессы флотации и ионного обмена. Поскольку площади помещения лаборатории недостаточно для установки полноценных очистных сооружений, то достаточным будет заключение договора с предприятием, занимающимся очисткой сточных вод. Предполагается установка емкости объемом суточного потребления воды в подвальном помещении, куда будут поступать стоки из лаборатории. Оттуда стоки будут забираться специальной машиной для проведения очистки сточных вод от химикатов и загрязнений.

#### **5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

К возможным ЧС в лаборатории можно отнести пожар. Данная ситуация может возникнуть в случае короткого замыкания электропроводки

либо при неисправности электроприборов. Также возникновение пожара возможно при неправильной эксплуатации печи. Стандарты и требования по пожарной безопасности установлены ГОСТ 12.1.004-91 [71]. Согласно НПБ 105-03 [72] исследовательскую лабораторию можно отнести к категории помещения В-4 «пожароопасные», так как в ней находятся твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы (деревянная мебель, бумага и прочее).

Для предупреждения проявления вышеописанной чрезвычайной ситуации необходимо проведение организационных, технических, эксплуатационных и режимных мероприятий по пожарной профилактике. К организационным мероприятиям относится проведение противопожарного инструктажа раз в год.

Сотрудники лаборатории должны знать места расположения средств пожаротушения и уметь их применить при возникновении пожара. В лаборатории запрещается: – загромождать проход, а также проход к средствам пожаротушения; – мыть полы с использованием горючих жидкостей; – оставлять в рабочей зоне бумагу и ветошь; – хранить в помещении лаборатории любые вещества с неизвестными пожароопасными свойствами; – пользоваться электронагревательными приборами с открытой спиралью; – при включенных электронагревательных приборах убирать случайно пролитые горючие жидкости.

Технические мероприятия предполагают монтирование и эксплуатацию электроустановок в соответствии с правилами устройства электроустановок [70]. Обязательным является наличие противопожарной сигнализации, которая при срабатывании осуществит оперативное оповещение людей о необходимости эвакуации. Лаборатория должна быть оборудована такими противопожарными средствами, как огнетушители. Углекислотные огнетушители ОУ-2 предназначены для тушения загораний различных веществ, за исключением тех, горение которых происходит без доступа воздуха, а также электроустановок, находящихся под напряжением до



1000В. Порошковые огнетушители ОП-10 предназначены для тушения нефтепродуктов, электроустановок, находящихся под напряжением до 1000В.

К режимным мероприятиям относятся запрет курения в лаборатории.

### 5.5 Расчет воздухообмена для расчистки воздуха

Для расчета воздухообмена будем исходить из того что в лаборатории одновременно проводят лакокрасочные работы 3 человека. Принимаем что количество, выделяемое при работе 1 человека равным 68 г/ч.

Для расчета количества  $\text{CO}_2$  воспользуемся формулой :

$$G = N_{\text{людей}} * g_{\text{CO}_2} = 3 * 68 \text{ л/ч} = 204 \text{ л/ч.} \quad (5.1)$$

Для расчета потребного воздухообмена воспользуемся формулой

$$L = \frac{1000 * G}{x_B - x_H} = \frac{1000 * 204}{0,5 - 0,3} = 1,02 * 10^4 \text{ м}^3/\text{ч} \quad (5.2)$$

Рассчитаем кратность воздухообмена, который будет нам показывать сколько раз в течении одного часа воздух полностью сменится в помещении.

$$n = \frac{L}{V} = \frac{1,02 * 10^4 \text{ м}^3/\text{ч}}{35 \text{ м}^3} = 291,4 \text{ раз/ч} \quad (5.3)$$

Определим воздухообмен при испарении растворителей и лаков по формуле:

$$G = \frac{aAmn}{100} \frac{\text{г}}{\text{ч}} = \frac{12 * 200 * 92 * 3}{100} = 6624 \text{ г/ч} \quad (5.4)$$

## **Заключение**

В данной научно-исследовательской работе был проведен общий обзор мирового использования поликристаллических долот для бурения скважин на нефть и газ. Так как увеличения популярности на данный инструмент для разрушения горной породы все больше и больше набирает обороты, в силу своих достоинств по качеству высокой прочности, меньшему количеству сборных деталей, а соответственно уменьшенному времени бурению и увеличенной скорости проходки процентовка составляет от 15 до 20%. В связи с тем, что 60 % мировой добычи нефти и газа используют в своих буровых задачах долота PDC, требуется отчетливое понимание проектирования таких долот с целью эффективного бурения. В современном мире не хватает достаточных знаний для определения твердости горной породы, так как самые известные методы, рассмотренные в данной работе, не подходят для выполнения задач по исследованию твердости интервалов бурения. Если при бурении интервалов с некачественной определенной твердостью, использовать долота PDC бурения становится неэффективным, а как следствие за этим стоит увеличения времени и средств на 1 скважину, соответственно нужен новый метод для определения количественной оценки динамической твердости горных пород для правильной корректировки вооружения долота и эффективной проходки интервалов.

Методы, рассмотренные в работе, не подходят для определения твердости в силу отсутствия сил резания, воздействующие на горную породу. Шрейнер Л. А. описал более подробно метод определения твердости он тоже не является подходящим, в силу этого метод определения динамической твердости на установки УМР остается наиболее актуальным и описывающим более близко силы, действующие на породу при режуще-скалывающем воздействии. Благодаря правильно определенной твердостью, буровые подрядные организации смогут подобрать поликристаллические долота с

нужным количеством лопастей и углом направления резца, что позволит качественно и эффективно произвести разрушения горной породы.

В ходе работы были проведено исследования по проценту применимости вооружению буровых вышек поликристаллическим инструментом PDC, рассмотрена разработка установки УМР созданной для определения динамической твердости горной породы, которая точно моделирует процесс режуще-скалывающего воздействия на горную породу, с целью определения твердости и в дальнейшем проектирования долота для реальных условий, во избежание траты лишних средств и времени буровыми компаниями.

## Список использованной литературы

1. Барон Л.И., Глатман Л.Б. Методика определения коэффициента трения горных пород. – М.: Гостехиздат, 1961. – 10с.
2. Борисов К.И. Методика оценки эффективности процесса динамического резания горных пород инструментами режуще-скалывающего действия // Нефтяное хозяйство. – НХ. – № 8. – 2008. – С.112–113.
3. Борисов К.И. Исследование сил резания горных пород твердосплавными резцами // В сб. Технология и техника геологоразведочных работ. – М.: изд. МГРИ. – вып. 5. –1982. – С. 117–126.
4. Борисов К.И. Основные положения научной методики оценки процесса динамического резания горных пород при бурении скважин. – В сб.: «Минерально-сырьевая база Сибири: история становления и перспективы»: Изд. ТПУ. – 2009. – Том 1. – С.38–40.
5. Борисов К.И. Методика оценки динамических прочностных свойств горных пород и эффективности процесса разрушения горных пород инструментами режуще-скалывающего действия // Бурение и нефть. – М.: Бурнефть. – 2008. – № 1. – С.24–27.
6. Борисов К.И., Сулакшин С.С. Исследование закономерностей разрушения горных пород резцами в динамическом режиме резания // В сб. Разрушение горных пород при бурении скважин. Т.1. – Вып. 3. – Уфа. – 1982. – С. 137–141.
7. Борисов К.И. Определение сопротивляемости породы разрушению при резании // В сб. Технология и техника геологоразведочных работ. – М.: изд. МГРИ. – вып. 10. –1987. – С.28–30.
8. Борисов К.И. Экспериментальная количественная оценка силовых характеристик резания горных пород // Известия ВУЗов. – ТПУ. – Т 305. –Вып. 8. – 2002. – С. 216–219.
9. Борисов К.И. Экспериментальная количественная оценка силовых характеристик резания горных пород // В сб.: «Нефтегазовому образованию в Сибири – 50 лет». – Изд. ТПУ. – 2002. – С.255–257.

10. Борисов К.И. Количественная оценка важнейших силовых характеристиках разрушения горных пород при резании // В сб.: «Проблемы научно-технического прогресса в бурении скважин. – Изд. ТПУ. – 2004. – С.38–42.
11. Борисов К.И. Влияние скорости движения породоразрушающих элементов на величину сил резания // Механика горных пород при бурении: Труды научно-практ. конф. п. Агой. – 1986. – Грозный. – 1986. – С.47–49.
12. Борисов К.И. Прикладные аспекты нового научного метода оценки свойств и эффективности процесса разрушения горных пород // Бурение и нефть. М.: изд. Бурнефть. – 2010. – № 3. – С.24–27.
13. Борисов К.И. Динамика работы резцов в процессе разрушения горных пород инструментами режуще-скалывающего действия типа PDC // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т.317. – №1. – С. 161–164.
14. Борисов К.И. Актуальные научные и прикладные вопросы развития нового научного метода оценки свойств и эффективности динамического разрушения горных пород инструментами режуще-скалывающего действия типа «PDC» // Вестник Ассоциации Буровых подрядчиков. – 2010. - №3. – С.8–16.
15. Борисов К.И. Разработка научного метода объективной оценки процессов динамического разрушения горных пород инструментами режуще-скалывающего действия класса PDC (часть I) // Инженер-нефтяник. – 2010. – №4. – С. 23–26.
16. Борисов К.И. Разработка научного метода объективной оценки процессов динамического разрушения горных пород инструментами режуще-скалывающего действия класса PDC (часть II) // Инженер-нефтяник. – 2011. – № 1. – С. 31–35.
17. Борисов К.И. Влияние скорости резания на коэффициент сопротивления резанию горных пород // В сб.: «Нефтегазовому образованию в Сибири - 50 лет». – Изд. ТПУ. – 2002. – С.254–255.

18. Борисов К.И., Паласухин А.Н. Изучение параметров износа долотных материалов // В сб.: «Проблемы научно-технического прогресса в бурении скважин». – Изд. ТПУ. – 1991. – С.102–106.
19. Борисов К.И. Исследование работы коронок режуще-скальвающего действия с целью повышения эффективности их применения при бурении геологоразведочных скважин: дис. ...канд.техн.наук. – Томск. – 1981. – 206с.
20. Борисов К.И. Научная база нового метода оценки эффективности процессов разрушения горных пород современными инструментами режуще-скальвающего действия // Вестник ЦКР Роснедра. – 2011. – № 4. – С.51–58.
21. Будюков Ю.Е., Власюк В.И., Спиринов В.И. Алмазный породоразрушающий инструмент. – ИПП Гриф и К. – Тула. –2005. –288с.
22. Че В.В., Заливин В.Г. Эффективность применения долот РДС на нефтяных месторождениях Западной и Восточной Сибири: сб. тр. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012. Вып. 12. 180 с.
23. Породоразрушающий инструмент РДС: каталог НПП «Буринтех». – Оренбург: Изд-во НПП «Буринтех», 2010. – 52 с.
24. Попов А.Н., Спивак А.И., Акбулатов Т.О. и др. Технология бурения нефтяных и газовых скважин: Учебник для вузов / Под общ. ред. А.И. Спивака и Л.А. Алексеева. – 3-е изд. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. – 508 с.
25. Ганджумян Р.А. Математическая статистика в разведочном бурении: Справочное пособие. – М.: Недра, 1990. – 218 с.
26. Ашмарин И.П., Васильев Н.Н., Абросов В.А. Быстрые методы статистической обработки и планирования экспериментов. – Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1975. – 78 с. 5. Абатуров В.Г., Овчинников В.П. Физико-механические свойства горных пород и породоразрушающий инструмент: Учебное пособие для вузов. – Тюмень: Изд-во «Экспресс», 2008. – 240 с.

27. Ворожцов М.И., Гусман А.М., Драганчук О.Т., Реутов В.А. Экспериментальные и теоретические исследования процесса разрушения горных пород алмазно-твердосплавными пластинами // Сб.матер.5-й Всесоюзной научно-технич. Конф. «Разрушение горных пород при бурении скважин». – Уфа, 1990. – С. 81–82.
28. Жлобинский Б.А. Динамическое разрушение горных пород при вдавливании . – М.: Недра. – 1970. – 151с.
29. Журков С.Н., Томашевский Э.В. Временная зависимость прочности при различных режимах нагружения // В кн.: Некоторые проблемы прочности твердого тела. – М-Л. – 1959. – С.66–73.
30. Зварыгин В.И. Исследование процессов разрушения пород твердосплавными резцами с целью выявления оптимальных условий работы коронок, применяемых при колонковом бурении геологоразведочных скважин // Автореф. дисс. ... канд.техн.наук. – Томск. – 1965. – 16с.
31. Зварыгин В.И., Сулакшин С.С. К вопросу разрушения пород при вдавливании резцов // Изв. ТПИ. – Т.138. – 1965.
32. Зварыгин В.И., Сулакшин С.С. Некоторые замечания к теории резания горных пород // Изв. ТПИ. – Т138. – 1965. – С.249–254.
33. Казьмин В.С. Справочник по геологоразведочному бурению на нефть и газ. – М.: Гостоптехиздат. – 1962. – 507с.
34. Козловский Е.А. и др. Применение математических методов планирования эксперимента для определения оптимальных режимов бурения // Изв.ВУЗов. – Геология и разведка. – 1971. – №3. – С.146–151.
35. Кузнецов В.Д. Физика твердого тела. – Томск.: Красное знамя. – 1941. – Т.2. – 771с.
36. Кузнецов В.Д. Физика твердого тела // Томск.: Красное знамя. – 1944. – Т.3. – 742с.
37. Кулаков М.В., Макаров Б.И. Измерение температуры поверхности твердых тел // М.: Энергия. – 1979. - 96С.

38. Кучерявый Ф.И., Кожушко Ю.М. Разрушение горных пород. – М.: Недра. – 1972. – 240с.
39. Липницкий Р.В. Исследования технологии вращательного бурения разведочных скважин в условиях Восточного Забайкалья // Автореф. Дисс. ... канд.техн.наук. – 1969.
40. Любимов Н.И., Морозов В.И. Роль удельной насыщенности резцами в твердосплавных коронках // Разведка и охрана недр. – 1954. – №6.
41. Любимов Н.И., Носенко Л.И. Справочник по физико-механическим параметрам горных пород рудных районов. – М.: Недра. – 1978. – 285с.
42. Мавлютов М.Р. Разрушение горных пород при бурении скважин. – М.: Недра. – 1978. – 209с.
43. Макаров И.В. К вопросу о контактной прочности горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1972. – №6. – С.79-82.
44. Мак Клинтон Ф., Аргон А. Деформация и разрушение материалов. – М.: Мир. – 1970. – 443с.
45. Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ. – ИрГТУ. – Иркутск. – 2008. – 300с.
46. Остроушко И.А. Разрушение горных пород при бурении. – М.: Госгеолиздат. – 1952. – 253с.
47. Павлова Н.Н., Шрейнер Л.А. Разрушение горных пород при динамическом нагружении. – М.: Недра. – 1964. – 160с.
48. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. – М.: Недра. – 1964. – 206с.
49. Регель А.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М.: Наука. – 1974. – 560с.
50. Рожков В.П. Методические указания к обработке статистического материала лабораторных работ. – Томск. – ТПИ. – 1977. – 24с.



51. Рожков В.П. Разработка метода определения твердости горных пород применительно к бурению мелкоалмазными коронками // В сб. Технология и техника геологоразведочных работ в Сибири. – ТПИ. – 1979. – С.36.
52. Романовский В.И. Основные задачи теории ошибок. –ГИТТЛ. – 1947. – 114с.
53. Румишский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента . – М.: Наука. – 1977.
54. Ставрогин А.Н., Певзнер Е.Д. Механические свойства горных пород при объемных напряженных состояниях и разных скоростях деформирования // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1974. - №5. – С.204–206.
55. Сулакшин С.С. Современные способы разрушения горных пород при бурении скважин. – М.: Недра. – 1964. – 105с.
56. Сулакшин С.С., Борисов К.И. Результаты аналитического и экспериментального определения глубины внедрения единичного резца в горную породу. – В сб. «Технология и техника геологоразведочных работ, №8, изд. МГРИ, 1985 г. С. 61–66.
57. Третьяк А.Я., Литкевич Ю.Ф., Асеева А.Е. Исследование подачи и модуля скорости при вращательном бурении горных пород // Интервал. – 2006. – №2. – С. 25–27.
58. Федоров В.С. Проектирование режимов бурения. – М.: Гостоптехиздат. – 1958. – 220с.
59. Фридман Я.Б. Единая теория прочности материалов. – М.: Оборонгиз. – 1943. – 94с.
60. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука. – 1974. – 640с.
61. Шамшев Ф.А. Курс разведочного бурения. – ГНТИ. – 1933. – 223с.
62. Шеферд Р. Физические свойства и буримость горных пород. – Угдетехиздат. – 1956. – 48с.

Шрейнер Л.А. Вопросы механики горных пород. – М.: Гостоптехиздат. – 1945. – 195с.

Шрейнер Л.А. Механические и абразивные свойства горных пород. – М.: Углетехиздат. – 1958. – 201с.

63. Шрейнер Л.А. Физические основы механики горных пород. – М.: Гостоптехиздат. – 1950. – 211с.

64. Эванс И. Основы теории разрушения угля стругом // В сб.: Разрушение и механика горных пород. – Госгортехиздат. – 1962. – С.39–47.

65. Эйгелес Р.М. Основные направления исследований разрушения горных пород при бурении // В сб.: Разрушение пород при бурении скважин. – Уфа. – 1973. – С.11–16.

66. Эйгелес Р.М. Разрушение горных пород при бурении скважин. – М.: Недра. – 1971. – 231с.

67. Эйгелес Р.М., Ворожцов М.И., Корольков Е.И. Исследование начального периода внедрения резца при разрушении горной породы // В сб.: Разрушение горных пород при бурении скважин. – Уфа. – 1973. – С.211–217.

68. Эйгелес Р.М., Стрекалова Р.В. Расчет и оптимизация процессов бурения скважин // М.: Недра. - 1977. – 200С.

69. Эйгелес Р.М., Стрекалова Р.В., Мустафина Н.Н. Разрушение забоя группой призматических инденторов с различной взаимной ориентацией // В сб.: Разрушение пород при бурении скважин. – Уфа. – 1973. – С.89.

70. Эпштейн Е.Ф. Износ твердых сплавов при трении до горным породам при колонковом бурении. – М. –Л.: Гостехиздат. – 1952. – 172с.

71. Эпштейн Е.Ф. Основы технологии бурения разведочных скважин на уголь. – М. –Л.: Углетехиздат. – 1953. –202с.

72. Эпштейн Е.Ф. Теория бурения-резания горных пород твердыми сплавами. М.:– ГОНТИ. – 1939. -180с.

73. Эпштейн Е.Ф., Андреев В.Д., Лукаш В.А. Фильтрация промывочной жидкости через поверхность забоя и влияние ее на процесс износа

породоразрушающего инструмента // В сб.: Разрушение горных пород при бурении скважин. – Уфа. – 1973. – С.426–431.

74. Яворский.Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука. – 1979. – 949с.

75. Wojnar K., Wladislawlew W. “Wiertnistwo”.: Warshawa. – 1976. – 350s.

76. Guzev M.A. Non-classical solutions of a continuum model for rock descriptions. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 2014; 6: 180-185.

77. Dorovsky, V.N., E.I. Romensky, and A.V. Sinev. 2015. Spatially non-local model of inelastic deformations: applications for rock failure problem. *Geophysical Prospecting*. 63(4): 1198-1212.

78. Vtorushin, E. V. and V. N. Dorovsky. Non-Euclidean Model of Inelastic Deformations Applied to Rock Cutting. 50th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. ARMA-2016-400.

Endres, L.A. 2007. Computation modeling of drill bits: A new method for reproducing bottom hole geometry and a second-order explicit integrator via composition for coupled rotating rigid bodies. Dissertation for Ph.D., University of California - San Diego, San Diego, CA.

79. Borisov, K.I. 1981. A Study of Drill Bits with Shearing Cutters with the Goal of Improving their Effectiveness While Drilling Exploratory Wells. Dissertation for Ph.D. in Engineering. Tomsk, Russia.

80. Borisov, K.I. 2012. A Scientific Approach to Evaluating Effectiveness of Dynamic Processes of Rock Failure While Drilling Wellbores Using Modern Shearing Tools. Dissertation for Doctor of Science in Engineering. Tomsk, Russia.

81. Myasnikov V.P. and M.A. Gusev. 2000. Thermomechanical model of elasticplastic materials with defect structures. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 33(3): 165–171.

82. Guzev M.A. and A.A. Paroshin. 2001. NonEuclidean Model of the Zonal Disintegration of Rocks around an Underground Working. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 42(1): 131–139
83. De Groot S.R. and P. Mazur. 1962. Non-equilibrium thermodynamics. North-holland publishing company, Amsterdam.
84. Blokhin A.M. and V.N. Dorovsky. 1995. Mathematical Modelling in the Theory of Multivelocity Continuum. Nova Science Publishers.
85. Renard Y., Pommier J. Getfem++. An open source generic C++ library for finite element methods, [home.gna.org/getfem](http://home.gna.org/getfem).
86. СН 462-74 Нормы отвода земель для сооружения геологоразведочных скважин.
87. ФЕР 01-02-099-01 Валка деревьев мягких пород с корня, диаметр стволов: до 16 см.
88. ФЕР 01-02-100-01 Трелевка древесины на расстояние до 300 м тракторами мощностью: 59 кВт (80 л.с.), диаметр стволов до 20 см.
89. СНиП IV-5-82 Сборник 49. Скважины на нефть и газ. Часть I и II.
90. ГЭСН 04-01-005-04. URL: [https://www.defsmeta.com/rgsn/gsn\\_04/giesn-04-01-005-04.php](https://www.defsmeta.com/rgsn/gsn_04/giesn-04-01-005-04.php) (дата обращения: 03.05.2022).
91. ГЭСН 04-02-001-12. URL: [https://www.defsmeta.com/rgsn14/gsn\\_04/giesn-04-02-001-12.php](https://www.defsmeta.com/rgsn14/gsn_04/giesn-04-02-001-12.php) (дата обращения: 03.05.2022).
92. Индексы изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ, индексы изменения сметной стоимости проектных и изыскательных работ для строительства [Электронный ресурс]. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_39473/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_39473/) (дата обращения: 02.05.2022).
93. Vtorushin E.V., Dorovsky V. N., Cutting Forces Estimation with Non-Euclidean Model of Inelastic Deformations applied to Rock Cutting, Baker Hughes, Novosibirsk, Russia, ARMA, American Rock Mechanics Association, 2017.

94. Reza Majidi, Stefan Z. Miska, Sandeep Tammineni: PDC SINGLE CUTTER: THEEFFECTS OG DEPTH OF CUT AND RPM UNDER SIMULATED BOREHOLE CONDITIONS; WIETNICTWO NAFTA GAZ, TOM 28, ZESZYT 1-2,2011 YEAR.

95. Clayton R., Chen S., Lefort G., New Bit Design, Cutter Technology Extend PDC Applications to Hard Rock Drilling, paper SPE/IADC 91840 presented at the 2005 SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, Feb. 23-25

96. Glowka D.A., “Use of Single Cutter Data in the Analysis of PDC Bit Designs: Part 1 – Development of a PDC cutting Force Model”, SPE Journal of Petroleum Technology, 41 (1989), 797-849.

97. Clayton R., Chen S., Lefort G., “New Bit Design, Cutter Technology Extend PDC Applications to Hard Rock Drilling”, paper SPE/IADC 91840 presented at the 2005 SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, Feb. 23-25

# Приложение А

Таблица П.А.1 – Расчетное время бурения скважины долотами PDC

Наименование работ	Интервалы нормирования				Долото		Время Бурения мех, час		Количество долблений		Наращивание			СПО			Промывка	Проверка превентора	Сборка/разборка УБТ				Установка /вывод УБТ за палец	Опрессовка свечей бурильных труб	Подготовительно-заключительные работы	Заканчивание скважин	Итого времени без учета заканчивания, час	Время бурения 1 метра, час		
	№ пп.	От, м	До, м	Прходка в интервале, м	Прходка, м	размер	метра	всего	Расчетное	Нормативное	Количество труб	Время наращивания 1 трубы, час	Время наращивания, час	Время спуска, час	Время подъема, час	Время, час			Время, час	При спуске инструмента, час	При наращивании, час	Разборка, час							Время, час	Время, час
Бурение под направление	1	0	40	40	480	393,7	0,034	1,36	0,083	1	1,96	0,2	0,392	0,018	0,020	0,038	0,034	1,750	0,196	0,327	0,147	0,670	0,147	1,862	0,45	12,99	4,952	0,124		
Разборка ЦКОД							1,65																						1,650	
Бурение под кондуктор	2	40	148	108	780	295,3	0,0306	3,3048	0,138	1	3,04	0,2	0,608	0,028	0,030	0,058	0,064			0,380	0,583	0,329	1,292	0,304	2,888		0,45	29,97	8,969	0,083
Смена долота																														0,467
Бурение под кондуктор	3	148	1018	870	780	295,3	0,0306	26,622	1,115	2	64	0,2	12,8	0,587	0,640	1,227	0,441			8,000	12,267	6,933	27,200	12,8	60,8		0,9	51,98	142,790	0,164
Разборка ЦКОД							1,65																							1,650
Бурение под ЭК	4	1018	1925	907	2400	215,9	0,022	19,954	0,378	1	62,88	0,2	12,576	0,576	0,629	1,205	0,578			7,860	12,052	6,812	26,724	6,288	59,736		0,45	51,98	127,511	0,141
Смена долота																														0,467
Бурение под ЭК	5	1925	2523	598	2400	215,9	0,022	13,156	0,249	1	38,16	0,2	7,632	0,350	0,382	0,731	0,757			4,770	7,314	4,134	16,218	3,816	36,252		0,45	51,98	79,012	0,132
Бурение под ЭК	6	2523	2950	427	2400	215,9	0,022	9,394	0,178	1	24,48	0,2	4,896	0,224	0,245	0,469	0,885			3,060	4,692	2,652	10,404	2,448	23,256		0,45			52,202
<b>ИТОГО</b>	6	0	2950	2950				77,091		7	194,520		38,904							24,266	37,234	21,008	82,508	25,803	184,794	3,15	94,94	419,670	0,766	
																							Итого по скважине		597,934					
																							Ремонтные работы		41,85536757					
																							Прочие работы		304,063					
																							Прием и сдача вахты		8,969007336					



№	Шифр	Наименование	Единицы измерения	Расход	Стоимость единицы	Всего
					Руб.	Руб.
1	2	3	4	5	6	7
2	060337	Экскаваторы одноковшовые дизельные на пневмоколесном ходу при работе на других видах строительства 0,25 м3	маш.-ч	3,23	9993,4938	32278,985
3	070149	Бульдозеры при работе на других видах строительства 79 кВт (108 л.с.)	маш.-ч	2,4	11287,4766	27089,9438
4	100204	Установки и агрегаты буровые для роторного бурения скважин	маш.-ч	132,25	93165,579	12321147,8
5	110501	Глиномешалки, 4 м3	маш.-ч	78,94	3782,7004	298606,37
6	400001	Автомобили бортовые, грузоподъемность до 5 т	маш.-ч	10,85	12442,9192	135005,673
<b>Итого</b>						<b>12929706,2</b>
<b>Расход материалов</b>						
7	103-0592	Трубы бурильные из стали группы Д с высаженными внутрь концами и муфты к ним наружный диаметр 127 мм	м	3,1	11411,172	35374,6332
8	103-1023	Трубы бурильные утяжеленные с резьбой на концах, наружный диаметр 229 мм	м	0,18	0	0
10	109-9032	Долота PDC	шт.	3,32	11563,062	38389,3658
<b>Итого</b>						<b>73763,999</b>
<b>Трудозатраты</b>						



№	Шифр	Наименование	Единицы измерения	Расход	Стоимость единицы	Всего
					Руб.	Руб.
1	2	3	4	5	6	7
11		Затраты труда рабочих-строителей Разряд 4	чел.-ч	451,44	5807,2654	2621631,89
12		Затраты труда машинистов	чел.-ч	224,05	5033,4741	1127749,87
Итого						<b>3749381,76</b>
		<b>Итого (Всего, при бурении 2670 метров)</b>				<b>382469885</b>

Таблица П.А.4 – Сметная стоимость крепления скважины

№	Шифр	Наименование	Единицы измерения	Расход	Стоимость единицы	Всего
					Руб.	Руб.
1	2	3	4	5	6	7
<b>Эксплуатация машин и механизмов</b>						
1	021141	Краны на автомобильном ходу при работе на других видах строительства 10 т	маш.-ч	0,16	1399,875	223,98
2	040202	Агрегаты сварочные передвижные с номинальным сварочным током 250-400 А с дизельным двигателем	маш.-ч	1,1	175	192,5
3	100204	Установки и агрегаты буровые для роторного бурения скважин	маш.-ч	3,33	8158,5	27167,805
4	400001	Автомобили бортовые, грузоподъемность до 5 т	маш.-ч	0,23	1089,625	250,61375
Итого						<b>27834,89</b>
<b>Расход материалов</b>						

№	Шифр	Наименование	Единицы измерения	Расход	Стоимость единицы	Всего
					Руб.	Руб.
1	2	3	4	5	6	7
5	101-0782	Поковки из квадратных заготовок, масса 1,8 кг	т	0,0003	95649,2	28,69476
6	101-1518	Электроды диаметром 4 мм Э50А	т	0,0011	95649,2	105,21412
7	103-9001	Трубы	м	0	0	0
8	109-9058	Башмаки колонные для обсадных труб	шт.	0	0	0
9	109-9180	Центраторы пружинные для обсадных труб	шт.	3	1348,95	4046,85
<b>Итого</b>						<b>4180,5</b>
<b>Трудозатраты</b>						
10		Затраты труда рабочих-строителей Разряд 4	чел.-ч	14,49	4782,79464	69302,6943
11		Затраты труда машинистов	чел.-ч	3,49	6890,80392	24048,9057
<b>Итого</b>						<b>27538722</b>
<b>Итого (Всего, при креплении 2670 метров)</b>						<b>8250798,25</b>

Таблица П.А.5 – Сметная стоимость освоения скважины

№	Номер расценки ЕРЕР и коэффициенты, др обосновывающие источники	Затраты	Освоение			
			измерения	единицы	кол-во	Всего
				основная зарплата		основная зарплата
		<u>Затраты, зависящие от времени</u>				
1	49-2008	Оплата труда буровой бригады	сут.	27,10	6,20	168,02
				27,10		168,02
		<u>Затраты, зависящие от времени</u>				

№	Номер расценки ЕРЕР и коэффициенты, др обосновывающие источники	Затраты	Освоение			
			измерения	единицы	кол-во	Всего
				основная зарплата		основная зарплата
2	49-2046, к=0,89 п 1.14	Оплата труда слесаря по обслуживанию буровой и электромонтера	сут.	8,86	6,20	54,90
				8,86		54,90
3	49-4369	Спецтранспорт автомобильный на 40 км	сут.	16,24	6,20	100,69
4	См. расчет №2.1.2	Амортизация	сут.	415,68	6,20	2577,22
5	49-2457 Приложение №1 к см.р.3.1 и 3.2 с к=0,189	Стоимость материалов и запасных частей	сут.	12,93	6,20	80,16
6	49-2424	Содержание бурового оборудования и инструмента (3 станка)	сут.	246,55	6,20	1528,61
				94,37		585,09
7	49-2676 т.7стр.10, к=0,62	Эксплуатация ДВС ((313,69-32,42)/1,3*1,396+32,42)*0,5*0,62	сут.	83,78	6,20	519,42
				32,42		201,00

№	Номер расценки ЕРЕР и коэффициенты, др обосновывающие источники	Затраты	Освоение			
			измерения	единицы	кол-во	Всего
				основная зарплата		основная зарплата
8	49-2706	Эксплуатация ПЭС ТМЗ-ДЭ-104-СЗ	сут.	32,73	6,20	202,93
				0,00		
9	49-2443	Содержание средств контроля и диспетчеризации	сут.	28,33	6,20	175,65
				12,60		78,12
10	49-4432	Дежурный бульдозер	час	4,60	49,60	228,16
11	49-2417 с к=0,63	Износ инструмента	сут.	6,27	6,20	38,90
12	49-2420 с к=0,63	Износ ловильного инструмента	сут.	1,70	6,20	10,55
13	См. Р. №4.4.1	Транспортировка грузов	руб			76,00
		Итого по затратам, зависящим от времени, без транспортировки вахт:	руб			8799,66
		8799,66				1525,55
		1525,55				
		<b>Корректировка зарплаты</b>				
		основная зарплата рабочих				1525,55
		дополнительная зарплата рабочих 7,9%				120,52
		отчисления от ФОТ 30,4%				500,40
		Итого зарплата с учетом корректировки				2146,47

№	Номер расценки ЕРЕР и коэффициенты, др обосновывающие источники	Затраты	Освоение			
			измерения	единицы	кол-во	Всего
				основная зарплата		основная зарплата
		<b>ИТОГО по затратам, зависящим от времени с учетом корректировки зарплаты</b>				9420,58
		9420,58				2146,47
		2146,47				
		Стоимость одних суток испытания	руб			1011,46
						175,35
		Стоимость одних суток испытания с учетом корректировки зарплаты				1082,83
						346,20
		<u>Затраты, зависящие от объема работ</u>				
25	49-2740, к=0,6	Дежурство ЦА-320	сут.	16,70	104,4	1743,27
		(27,83*0,6*12)		14,67		20,00
		Итого по затратам, зависящим от объема работ				1743,27
						20,00
		Всего по затратам, зависящим от объема работ				
		1743,27				
		20,00				

№	Номер расценки ЕРЕР и коэффициенты, др обосновывающие источники	Затраты	Освоение			
			измерения	единицы	кол-во	Всего
				основная зарплата		основная зарплата
		<b>Корректировка зарплаты</b>				
		основная зарплата рабочих				20,00
		дополнительная зарплата рабочих 7,9%				1,58
		отчисления от ФОТ 30,4%				6,56
		Итого зарплата с учетом корректировки				28,14
		<b>ИТОГО по затратам, зависящим от объема работ с учетом корректировки зарплаты</b>				1751,41
		1751,41				28,14
		28,14				
		ИТОГО по сметному расчету без транспортировки вахт				10542,93
		10542,93				1545,55
		1545,55				
		<b>ИТОГО по сметному расчету без транспортировки вахт с учетом корректировки зарплаты</b>				11172,00
		11172,00				2174,61
		2174,61				

Таблица П.А.6 – Сводный сметный расчет строительства скважины на месторождении Западной Сибири

№ п/п	№ сметных расчетов и др. обосновывающие источники	Наименование работ или затрат	Полная сметная стоимость в ценах 1984г.	в том числе заработная плата рабочих
1	2	3	4	5
		<b>ГЛАВА 1</b>		
		Подготовительные работы к проведению мероприятий по строительству скважины		
1	1.1.	Подготовка площадки (валка, трелевка)	163 161,83	12 951,71
		<b>ИТОГО по главе 1:</b>	<b>163 161,83</b>	<b>12 951,71</b>
		ИТОГО по главе 1 с учетом коэффициента перерасчета сметной стоимости (К1=1,445, К2=61,09) Кп=85,526:	13887978,72	1321939,461
		<b>ГЛАВА 2</b>		
		Строительство и разборка вышки, привышечных сооружений, монтаж и демонтаж бурового оборудования, монтаж и демонтаж установки для испытания скважины		
2	2.1.	Строительство и монтаж	18 650,00	1 343,00
3	2.1.	Разборка и демонтаж	1 179,91	297,15
		<b>ИТОГО по главе 2:</b>	<b>19 829,91</b>	<b>1 640,15</b>
		ИТОГО по главе 2 с учетом коэффициента перерасчета сметной стоимости:	2000025,51	176354,612
		<b>ГЛАВА 3</b>		
4	3.1.	Работы по строительству скважины	17 644 599,61	2 271 821,44
5	3.2.	Работы по креплению скважины	392 352,55	39 963,81
		<b>ИТОГО по главе 3:</b>	<b>18 036 952,15</b>	<b>2 311 785,25</b>

№ п/п	№ сметных расчетов и др. обосновывающие источники	Наименование работ или затрат	Полная сметная стоимость в ценах 1984г.	в том числе заработная плата рабочих
1	2	3	4	5
		ИТОГО по главе 3 с учетом коэффициента перерасчета сметной стоимости:	18 036 952,15	2 311 785,25
		<b>ГЛАВА 4</b>		
		Освоение скважины на продуктивность		
6	4.1.	Освоение скважины на продуктивность в эксплуатационной колонне	11 172,00	2 174,61
		<b>ИТОГО по главе 4:</b>	<b>11 172,00</b>	<b>2 174,61</b>
		ИТОГО по главе 4 с учетом коэффициента перерасчета сметной стоимости:	629812,6087	133229,837
		<b>ГЛАВА 5</b>		
		Дополнительные затраты при строительстве скважины в зимнее время		
	пп.6.1., 6.2. (ВСН 39-86) приложение 2 зона к=1	Дополнительные затраты при производстве строительных и монтажных работ в зимнее время		
7		Зимнее удорожание при СМР от суммы 1,6% $\times$ 1,0*1,08	239984,2723	22843,11389
		<b>ИТОГО по главе 5:</b>	<b>239984,2723</b>	<b>22843,11389</b>
		<b>ИТОГО по главам 1-5</b>	<b>48656635,14</b>	<b>5030284,99</b>
		<b>ГЛАВА 6</b>		
		Накладные расходы		



№ п/п	№ сметных расчетов и др. обосновывающие источники	Наименование работ или затрат	Полная сметная стоимость в ценах 1984г.	в том числе заработная плата рабочих
1	2	3	4	5
8	Пояснительная записка	Накладные расходы на итог прямых затрат по главам 1-5 (20%)	9731327,027	1006056,998
		<b>ИТОГО по главам 1-6</b>	<b>58387962,16</b>	<b>6036341,99</b>
		<b>ГЛАВА 7</b>		
9	Пояснительная записка	Плановые накопления (8%) на итог прямых затрат по главам 1-5 и главы 6	4671036,973	482907,3588
		<b>ИТОГО по главам 1-7</b>	<b>63058999,14</b>	<b>6519249,34</b>
		<b>ГЛАВА 8</b>		
		Прочие работы и затраты		
10	Расчет-обоснование ООО "Геосервис"	Затраты на выплату премий, льготы и надбавки за работу в районах, приравненных к районам Крайнего Севера, полевое довольствие - 23,5%	14818864,8	1532023,596
11	П. 9.6. (ВСН 39-86) Пояснительная записка	Лабораторные работы (0,15%) по итогам глав 3 и 4 ССР	48792,96995	5263,721702
		<b>ИТОГО по главе 8</b>	<b>14867657,77</b>	<b>1537287,318</b>
		<b>ИТОГО по главам 1-8</b>	<b>77926656,90</b>	<b>8056536,66</b>
		<b>ГЛАВА 9</b>		
		Авторский надзор		
12	п. 10 пр. 12 ВСН 39-86	Авторский надзор - 0,2%	155853,3138	
		<b>ГЛАВА 10</b>		

№ п/п	№ сметных расчетов и др. обосновывающие источники	Наименование работ или затрат	Полная сметная стоимость в ценах 1984г.	в том числе заработная плата рабочих
1	2	3	4	5
		Проектные и изыскательные работы		
		Проектные работы, без НДС в ценах 1985 г.		
		<b>ИТОГО по главам 1-10</b>	<b>78082510,22</b>	<b>8056536,66</b>
		<b>ГЛАВА 11</b>		
13	ВСН 39-86	Резерв средств на непредвиденные работы и затраты - 2%	1561650,204	161130,7332
		<b>Всего с учетом резерва</b>	<b>79644160,42</b>	<b>8217667,40</b>
	Мин. нефт. пром-ти.	Возврат материалов - всего	533017,5623	
		Прочие работы и затраты в текущих ценах		
14	Коммерческое предложение от ООО "Геофизсервис"	Промыслово-геофизические работы	2924576	
15	Локальный сметный расчет	Обустройство скважины	3072737	
		ИТОГО прочих работ и затрат в текущих ценах	5997313	
		<b>ВСЕГО по сводному сметному расчету</b>	<b>86174490,98</b>	<b>8217667,40</b>
		Кроме НДС 18%	15511408,38	
		<b>Всего с НДС</b>	<b>101685899,36</b>	<b>8217667,40</b>

Таблица А.7 – Сводный сметный график расчет строительства скважины на месторождении Западной Сибири

№ п/п	№ сметных расчетов и др. обосновывающие источники	Наименование работ или затрат	Сметная стоимость выполнения операции в ценах 1984г.	в том числе заработная плата рабочих
1	2	3	4	5
<b>ГЛАВА 1</b>				
		Подготовительные работы к проведению мероприятий по строительству скважины		
1	1.1.	Подготовка площадки (валка, трелевка древесины)	162383,12	15456,58
		<b>ИТОГО по главе 1:</b>	<b>162383,12</b>	<b>15456,58</b>
		ИТОГО по главе 1 с учетом коэффициента перерасчета сметной стоимости (K1=1,4, K2=61,09) Kп=85,526:	13887978,72	1321939,461
<b>ГЛАВА 2</b>				
		Строительство и разборка вышки, привышечных сооружений, монтаж и демонтаж бурового оборудования, монтаж и демонтаж установки для испытания скважины		
2	2.1.	Строительство и монтаж	19853	1405
3	2.1.	Разборка и демонтаж	1690	459
		<b>ИТОГО по главе 2:</b>	<b>21543</b>	<b>1864</b>
		ИТОГО по главе 2 с учетом коэффициента перерасчета сметной стоимости:	1842486,618	159420,464
<b>ГЛАВА 3</b>				
4	3.1.	Работы по строительству скважины	28764590,00	2987678,00
5	3.2.	Работы по креплению скважины	456789,02	55390,73
		<b>ИТОГО по главе 3:</b>	<b>29221379,02</b>	<b>3043068,73</b>
		ИТОГО по главе 3 с учетом коэффициента перерасчета сметной стоимости:	29221379,02	3043068,73
<b>ГЛАВА 4</b>				
		Освоение скважины на продуктивность		

6	4.1.	Освоение скважины на продуктивность в эксплуатационной колонне	5987,00	1557,77
		<b>ИТОГО по главе 4:</b>	<b>5987,00</b>	<b>1557,77</b>
		ИТОГО по главе 4 с учетом коэффициента перерасчета сметной стоимости:	512044,162	133229,837
<b>ГЛАВА 5</b>				
		Дополнительные затраты при строительстве скважины в зимнее время		
	пп.6.1., 6.2. (ВСН 39-86) приложение 2 зона к=1	Дополнительные затраты при производстве строительных и монтажных работ в зимнее время		
7		Зимнее удорожание при СМР от суммы 1,6% $\times$ 1,0*1,08	239984,2723	22843,11389
		<b>ИТОГО по главе 5:</b>	<b>239984,2723</b>	<b>22843,11389</b>
		<b>ИТОГО по главам 1-5</b>	<b>45703872,80</b>	<b>4680501,61</b>
<b>ГЛАВА 6</b>				
		Накладные расходы		
8	Пояснительная записка	Накладные расходы на итог прямых затрат по главам 1-5 (20%)	9140774,559	936100,322
		<b>ИТОГО по главам 1-6</b>	<b>54844647,36</b>	<b>5616601,93</b>
<b>ГЛАВА 7</b>				
9	Пояснительная записка	Плановые накопления (8%) на итог прямых затрат по главам 1-5 и главы 6	4387571,788	449328,1546
		<b>ИТОГО по главам 1-7</b>	<b>59232219,14</b>	<b>6065930,09</b>
<b>ГЛАВА 8</b>				
		Прочие работы и затраты		
10	Расчет-обоснование ООО "Геосервис"	Затраты на выплату премий, льготы и надбавки за работу в районах, приравненных к районам Крайнего Севера, полевое довольствие - 23,5%	13919571,5	1425493,57
11	П. 9.6. (ВСН 39-86) Пояснительная записка	Лабораторные работы (0,15%) по итогам глав 3 и 4 ССР	44600,13478	4764,447857
		<b>ИТОГО по главе 8</b>	<b>13964171,63</b>	<b>1430258,018</b>

		<b>ИТОГО по главам 1-8</b>	<b>73196390,78</b>	<b>7496188,10</b>
<b>ГЛАВА 9</b>				
		Авторский надзор		
12	п. 10 пр. 12 ВСН 39-86	Авторский надзор - 0,2%	146392,7816	
<b>ГЛАВА 10</b>				
		Проектные и изыскательные работы		
		Проектные работы, без НДС в ценах 1985 г.		
		<b>ИТОГО по главам 1-10</b>	<b>73342783,56</b>	<b>7496188,10</b>
<b>ГЛАВА 11</b>				
13	ВСН 39-86	Резерв средств на непредвиденные работы и затраты - 2%	1466855,671	149923,7621
		<b>Всего с учетом резерва</b>	<b>74809639,23</b>	<b>7646111,87</b>
	Мин. нефт. пром-ти.	Возврат материалов - всего	533017,5623	
		Прочие работы и затраты в текущих ценах		
14	Коммерческое предложение от ООО "Геофизсервис"	Промыслово-геофизические работы	2924576	
15	Локальный сметный расчет	Обустройство скважины	3072737	
		ИТОГО прочих работ и затрат в текущих ценах	5997313	
		<b>ВСЕГО по сводному сметному расчету</b>	<b>81339969,79</b>	<b>7646111,87</b>
		Кроме НДС 18%	14641194,56	
		<b>Всего с НДС</b>	<b>95981164,36</b>	<b>7646111,87</b>

## Приложение Б (справочное)

### Design of PDC drill bits and their operating modes using a new method for quantifying the dynamic hardness of rocks

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2ВМ13	Валегдинов Назар Андреевич		08.05.2023

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОНД	Борисов Константин Иванович	Д-р тех наук		08.05.2023

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ	Айкина Татьяна Юрьевна	Кнд-т филологических наук		08.05.2023

According to the authors [93], the traditional theory of continuum is insufficient to explain rock behavior when stresses reach the tensile strength and rock fractures are accompanied by zonal disintegration. To develop a non-classical model of rock fracturing, grain boundaries in the rock structure must be taken into account, and solid bodies with microscopic flaws can be described using non-Euclidean geometry. A new continuum model is presented in the paper, which predicts the fractured zones that are initiating and developing as a periodic structure. This non-Euclidean description leads to the appearance of two unusual material constants called “inelastic” moduli. The model combines a fourth-order parabolic equation on the disintegration thermodynamic parameter and a classical hyperbolic system of equations for the continuous medium dynamics. In contrast to the classic approach, the presented model enables the prediction of chip size in rock cutting analysis and determines the lateral and axial cutting forces and their dependence on cutter velocity and depth of cut.

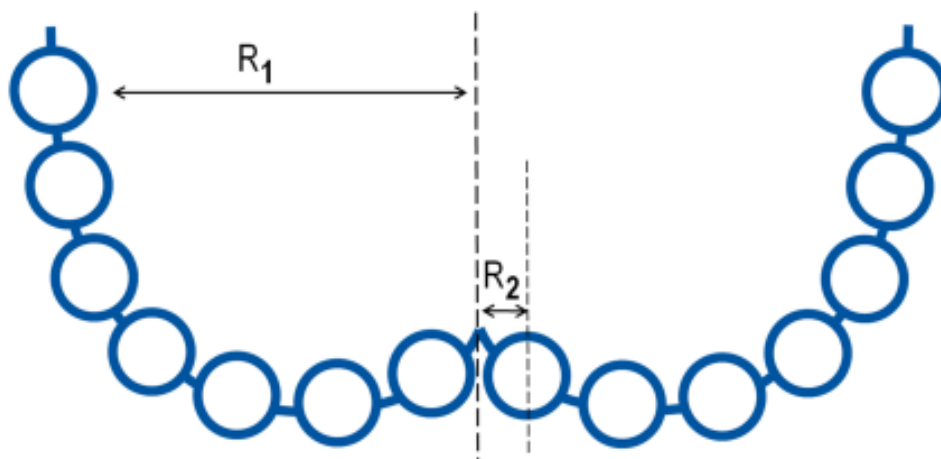


Figure 1– Typical bit profile provides different linear velocities

The authors of the article highlight that one crucial factor that affects rock fracturing during drilling with PDC bits is the distance between the bit center and the cutter center. Even a slight change in this distance can have a significant impact on the cutter linear velocities, as shown in Figure 1. This raises questions about how cutter velocity affects cutting forces and bit dynamics. Currently, the force applied to a cutter is determined based on its area of cut, back rake, rock properties, and environmental conditions, with the linear velocity factor often being neglected. However, laboratory experiments by K.I. Borisov [96] demonstrate that the reaction axial force on a cutting

tool must be considered in any mathematical description of the cutting/chipping process. Figure 2 illustrates that the resistance to cutter intrusion into rock increases exponentially with linear velocity. This rock dynamic reactive force can be mathematically described as  $kV R R e = 0$ , where  $V$  is the cutter linear velocity,  $k$  is the power ratio, and  $R_0$  is the constant force.

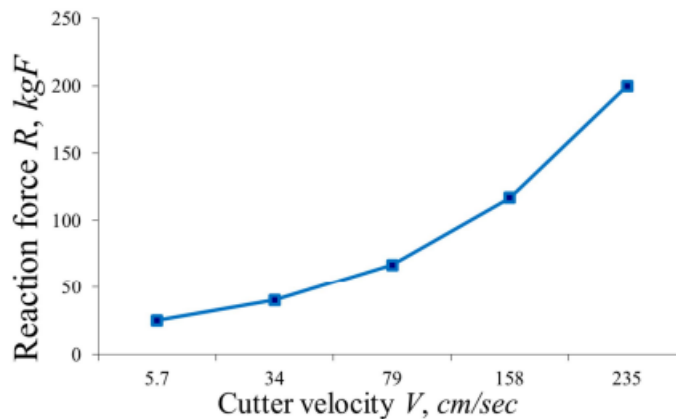


Figure 2 – Dependence of axial reaction force on cutter velocity (borrowed from K.I. Borisov)

To accurately predict the axial reaction force in rock cutting, the new model for bit dynamics must incorporate Borisov's force and its relationship to cutter velocity. This dynamic model has already been utilized to forecast chip size, optimal depth of cut, and possible rock fragmentation scenarios. In the paper, the model was applied to examine the cutting forces in both lateral and axial directions and their dependency on cutter velocity and depth of cut. Guzev and Mysnikov and Guzev and Paroshin [94] introduced a non-Euclidian approach to describe rock fracture and obtained a structure of periodical fractured zones that were observed experimentally. Dorovsky and Romensky [95] utilized a dynamic model of inelastic deformations, which stemmed from non-equilibrium thermodynamics and was applied to various problems of continuous mechanics. The theoretical grounds and a detailed description of the non-Euclidian model can be found in Dorovsky et al. [94] A linear two-dimensional theory was presented, taking into account the dynamics of the solid medium and the evolution of the destruction field with small deformations. The body being considered must consume an open connected domain with a smooth boundary.



To obtain six variables in the elastic medium, including the stress tensor components and velocity vector components, a strain tensor denoted by  $\epsilon_{ik}$  is assumed, based on the symmetry of the tensor. The density, elastic moduli  $\lambda$  and  $\mu$ , and new non-classic moduli  $\alpha$  and  $\beta$  are assumed constant. Shear and volumetric kinetic coefficients,  $\xi$  and  $\zeta$  respectively, are denoted in equations (4) and (5). Equations (1-5) and (9) create a closed system of differential equations for  $\sigma_{ik}$ ,  $v_i$  and  $\gamma$  to analyze plastic deformations. The model identifies four non-classic parameters in  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\xi$ , and  $\zeta$ . In laboratory rock failure experiments,  $\alpha$  and  $\beta$  are determined to demonstrate the connection between destruction parameters. The non-classic  $\alpha$  modulus causes failure scale, while the non-classic  $\beta$  modulus dictates the destruction field rate of evolution. Although shear stresses mostly cause rock failure, the volumetric kinetic coefficient  $\zeta$  should not be ignored because it can create irreversible volumetric deformations. This coefficient can significantly impact destruction magnitude in a non-linear manner and is considered as the rock disintegration capacity.

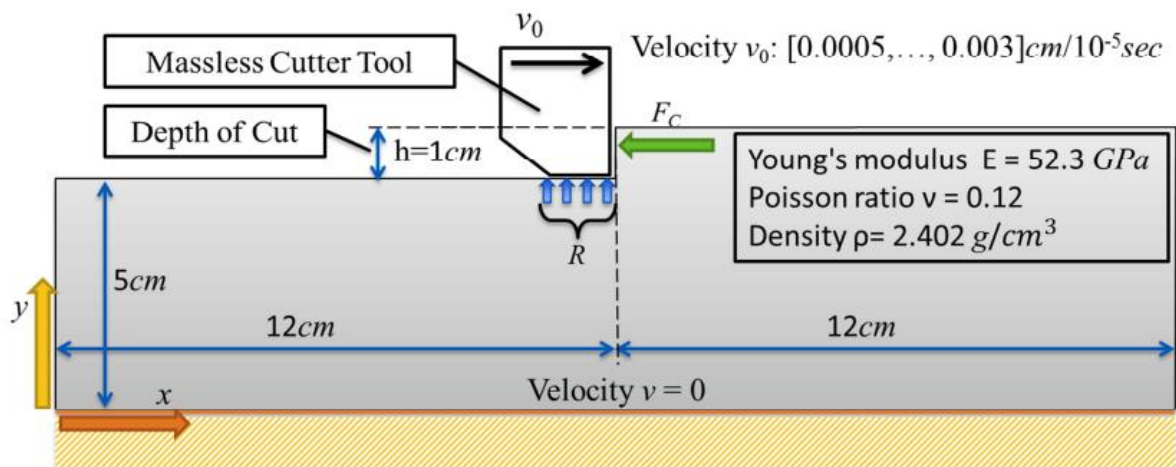


Figure 3 – Stair step sample of rock with moving riser face

The authors describe a finite-element mixed numerical algorithm and weak formulation were presented in [94] to address the problem (1-5), (9). The paper applies the simulator mentioned in [95] to model rock behavior near a massless rigid cutter. The details of the numerical technique can be found in [96]. The computational domain is a 1cm step on a 5cm high and 24cm long rectangle (Figure 3), where external boundaries do not significantly impact the process. The base of the step is fixed rigidly,

and the surface of the riser moves with a given constant velocity  $0v$ . Equations with physical variables,  $52$ ,  $9t$ ,  $tx$ ,  $x10$ ,  $10'$ , and  $10\sigma$ , are used assuming linear velocities typical for a drilling bit at 90/120/150rpm. Material constants such as sandstone elastic moduli and density with  $\rho=2.402\text{g/cm}$  and Young's can be used. The paper indicates that the modulus and Poisson's ratio of a material are 52.3GPa and 0.12, respectively. This information is used to calculate the sound velocity, which is 4.7445 cm/sec/10-. Based on this velocity, it takes 2.53 units of custom time for a wave to go from the riser face to the boundary and back. To calculate the time needed for wave counts to travel there and back, it is appropriate to consider the calculation time. The system numerical solution was described in detail in [94], and the analysis focused on the sensitivity of the model to cutter velocity and depth of cut. Lateral and axial cutting forces are the dynamic characteristics of the rock fracturing process being observed.

Figure 5 illustrates the potential use of the dynamic non-Euclidean theory in predicting rock fragmentation. By applying the shear deformation criteria and allowing the deviatoric portion of the irreversible deformation source from Eq. (3) to reach its critical value, possible fragmentation lines can be identified. These lines are indicated by dash lines for the accumulated shear plastic deformations at time  $t^*$ . All simulations displayed a peak destruction rate  $\gamma$  at the same time  $t^*$ , indicating that the rate of destruction is independent of cutter velocity. It is worth noting that the failure scale remains constant regardless of the cutter velocity as well. Figure 6 further supports this by showing a strong linear correlation between the first peak destruction magnitude and cutter velocity  $0 v$ .

This means that cutters with higher linear velocities accumulate critical shear deformations leading to chip formation faster. Figure 7 shows the reactive cutting force formation over time for a cutter with a velocity of 0.001525 cm/10-5 sec, with the  $Re(t)$  curve representing the average of  $\sigma n$  for the cutter bottom. The area between the minimum and maximum of  $\sigma n$  for the cutter bottom and the  $Re$  chart is shown. The  $FC(t)$  curve represents the cutting force defined for the cutter face. The results were compared with previous studies, with a discrepancy in  $Re$  versus velocity behavior

requiring further investigation. One possible explanation is a massive cutting tool dynamics simulation where the Re curve changes its behavior.

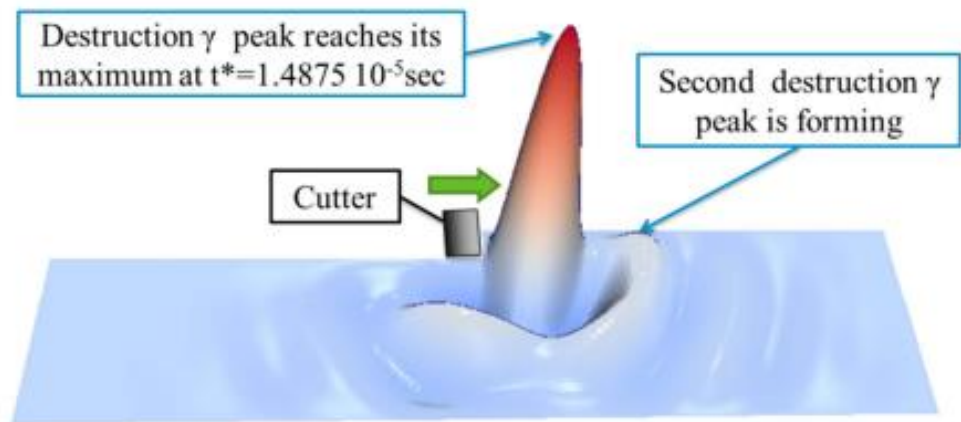


Figure 4 – The destruction  $\gamma$  at the moment of time  $t^*$ (the first peak reaches its maximum)

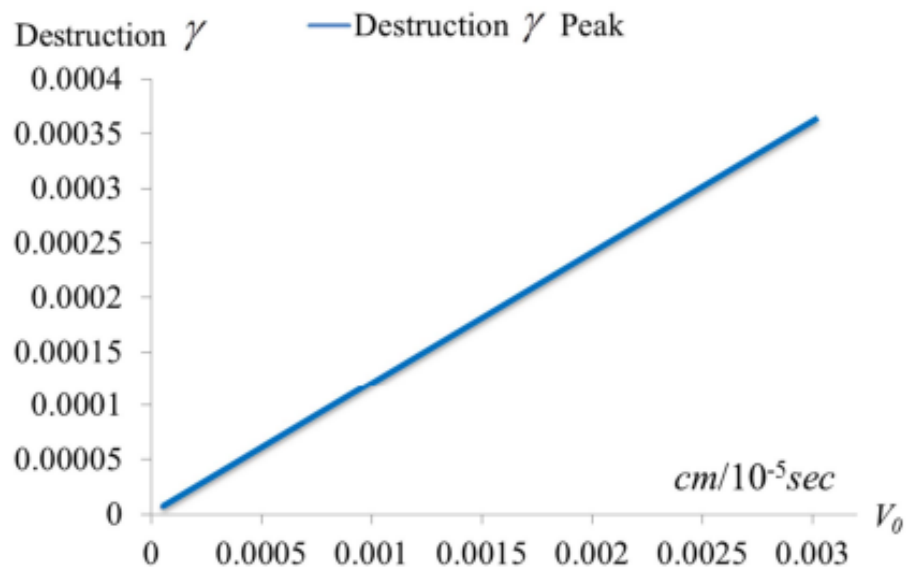


Figure 5 – The magnitude of the destruction  $\gamma$  maximum at the moment of time  $t^*$  for various  $v_0$  cutter velocities

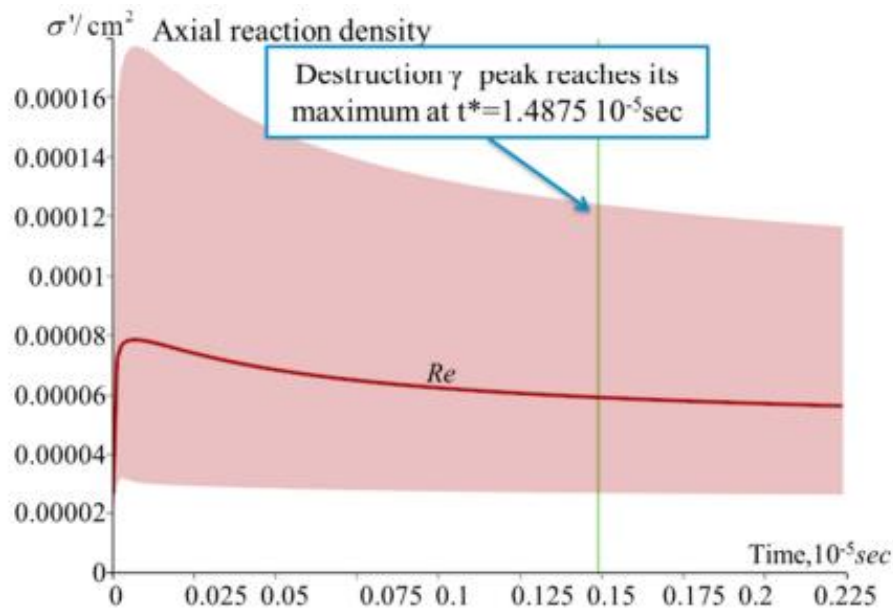


Figure 6 – Formation of axial reaction force

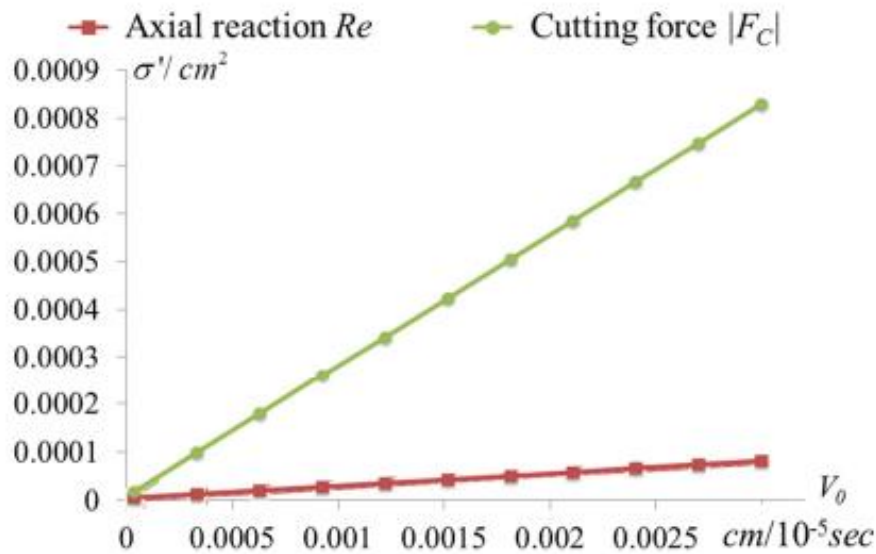


Figure 7 – Reaction and cutting forces dependence on cutter velocity

The authors of the article claim that due to the current unsatisfactory rates of penetration in hard formations, there is a growing necessity for a deeper understanding of the interaction between the cutter and the rock, and the factors that impact penetration rate. Mechanical specific energy (MSE) is a measurement of drilling efficiency that quantifies the energy required to cut through a unit volume of rock. Teale (1965) was the first to introduce the concept of MSE to the drilling industry as the work necessary to remove a unit volume of rock. Recording torque, rotary speed, weight on bit, and rate of penetration are the key parameters during drilling operations

that directly relate to MSE, which has the same unit as pressure, N/m<sup>2</sup> or psi. MSE measurement helps monitor the amount of mechanical energy involved in drilling and determines the minimum energy required to drill through rock. Teal's [95] lab experiments demonstrated that the energy required to destroy a unit volume of rock remains relatively constant despite changes in other variables such as rotary speed, weight on bit, or rate of penetration. Furthermore, experiments have shown MSE values to be comparable to the Uniaxial Compressive Strength (UCS) of the rock, which means MSE can objectively evaluate drilling efficiency by comparing the numerical value of the MSE during drilling and the rock's UCS.

$$MSE = \frac{480 \cdot \text{Torque} \cdot \text{RPM}}{d^2 \cdot \text{ROP}} + \frac{3 \cdot \text{WOB}}{\pi \cdot d^2} \quad (1)$$

Tests conducted at the University of Tulsa in 2010 revealed that cutting efficiency significantly decreases even at low pressure levels. A confining pressure of just 150 psi can reduce efficiency by half by increasing the mechanical specific energy of the cutting process. Traditional practices establish a linear relationship between rotational speeds and rate of penetration, without considering specific energy. However, it is believed that high rotational speeds may actually decrease the specific energy required to cut rock. The paper [94] examines the potential causes and outcomes of experiments conducted at varying RPM and depth of cut in different borehole pressures. The study investigated the impact of depth of cut and RPM on MSE under diverse pressure conditions using the University of Tulsa's high pressure cell facility. By conducting tests on single cutters in controlled environments, the industry can obtain valuable information about cutter-rock interaction that would be difficult to obtain through full scale experimentation.

The researchers conducted a scientific experiment on the installation, at the University of Tulsa North Campus, a high-pressure cell facility (seen in Fig. 8) was utilized to conduct single cutter experiments with varying pressurized environments, RPM, and depth of cut. The facility comprises five modules: pressure cell, pressure supplying system, rotary system, cutter engagement system, and data acquisition system.

The pressure cell has the capacity to exert borehole pressure identical to the confining pressure in the experiment. The rock sample is housed within a sample holder inside the pressure cell and attached to the rotary system through a shaft. A 10 horsepower AC motor with a gearbox powers the rotary system, while a variable frequency drive controls the speed of rotation. The cutter engagement system indents a single cutter into the rock as it rotates, generating one round of cutting. The actuation system, which utilizes a pneumatic piston, produces up to 2800 lbs vertical force with 100 psi air pressure.

During cutting, the forces acting on the cutter are measured in three directions through strain gauges situated above the cutter in the shaft (seen in Fig. 9). These forces include the cutting force, vertical force, and side force. The current design aims to conduct almost one round of cutting at a fixed depth of cut.



Figure 8 – HIGH pressure cell at The University of Tulsa

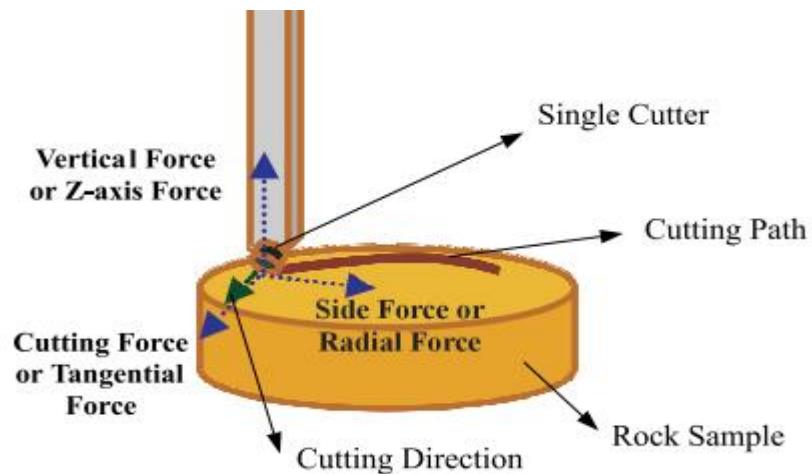


Figure 9 – Direction of forces acting on the cutter

Experiments were conducted using a PDC cutter measuring 0.512 inches (13mm) in diameter with a 0.017 inch (440) chamfer. The cutter was brazed onto a stem with a back rake angle of 20 degrees and a side rake angle close to zero. Two types of rocks were used in the experiment: Carthage Marble, which has low permeability and Indiana Limestone, which has relatively high permeability. The samples of Carthage Marble had a porosity of 1&2', a permeability of less than 0.1 md, and a UCS range of 9,000-11,700 psi. The Indiana Limestone samples had porosities of 11-16' and permeabilities of 10-15 md. The UCS of this rock is around 7,000 psi. The experiments aimed to investigate the effect of RPM and depth of cut on MSE under varying borehole pressure. The side rake angle was set to zero, and the back rake angle was set to 20 degrees. Table 1 provides a summary of the test performed along with the range of parameters. While the Carthage Marble had a very low permeability, the Indiana Limestone samples were soaked with mineral oil of viscosity 45 cp for 30 minutes before the experimentation to ensure consistency. A sample of measured cutting force on Indiana Limestone is shown in Figure 4, indicating a spike in forces around 100 lbs for 1 second at 60 RPM, atmospheric pressure, and 0.047 in. depth of cut.

Table 1 – Range of variables of the tests performed

Rock type	Confining pressure (psi)	Depth of cut (inches)	RPM	Drilling fluid
Indiana Limestone & Carthage Marble	Atmospheric, 50, 150 and 250	0.01–0.12	30–200	Mineral oil with viscosity 45 cp.

In short, the authors attributed improvements in hard rock drilling to advancements in PDC drill bit technology. Bit designers focus on achieving high performance by balancing the bit, achieving uniform wear, and adjusting cutter characteristics. However, previous cutter rock interaction models only considered three forces, which are no longer valid for modern PDC cutters with chamfer and special shape. The paper [97] presented a new model that accounts for the build-up edge of crushed materials and the influence of the chamfer on the bit rate of penetration. Back forces due to rock deformation and material flow are also considered. The model has been used to optimize cutting efficiency, bit steerability, and minimize specific energy. Field results have shown that the use of an accurate cutter rock interaction model can greatly improve drillability, stability, steerability, and wear in hard rock drilling.

Since the 1970s, improvements in PDC technology, cutting structure, dynamic stability, hydraulic systems, and steerability have led to continuous increases in drill bit performance. Real-time performance analysis now plays a key role in improving drilling performance, allowing for optimization of drilling parameters and selection of the best bit for a given application. However, understanding the cutter rock interaction process remains crucial for estimating drillability and correcting imbalances. Despite abundant literature on PDC bit design, cutter rock interaction modeling has seen no significant progress in recent years. Current models assume that cutting force is proportional to cut surface area, which works for sharp cutters but fails to match experimental results for chamfered cutters or varying back rake angles. Improving PDC bit performance and design requires considering these effects on cutting forces.

The paper [94] introduced a new model for cutter-rock interaction that takes into account the effect of side and back rake angles by incorporating a build-up edge of



crushed materials on the cutting face, leading to better force estimation. The model also considers chamfer size and shape effects and rock deformation on the back cutter. The application of this new model to drill bit design has resulted in significant improvements in bit drillability through the optimization of cutting efficiency, cutter shape, and orientation. The authors concluded with the presentation of several design concepts and features such as energy minimization, balancing, and steerability. To illustrate the importance of back and side rake angles in determining cutting forces, the model considers a cylindrical chamfered PDC cutting into a rock sample at a constant depth of cut. The force applied by the cutter on the rock is divided into three categories: forces acting on the cutting face surface, forces acting on the chamfer surface, and forces acting on the back cutter surface. Previous models have overestimated the effects of these angles, while the new model provides a more accurate estimation of the total force acting on the PDC cutter.

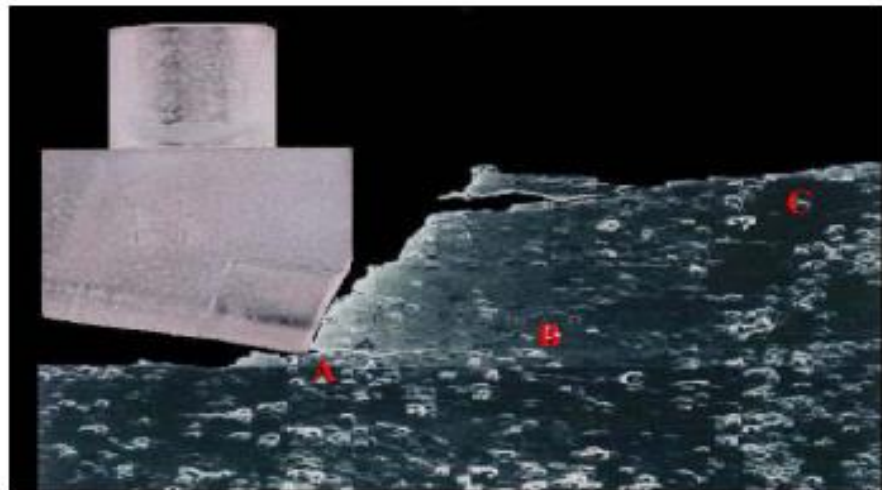


Figure 10 – View of chip formation

Delineated by the intrinsic specific energy or rock equivalent strength as  $R_{eq}$  and the rock-cutter friction angle at the rock-cutter interface as  $\theta_f$ , laboratory findings have indicated that a buildup of crushed materials on the cutting face dictates the flow of failed material. The revised cutting force model takes this phenomenon into consideration by incorporating the crushed material. In the model under consideration, the force exerted by the cutting face is transmitted to the rock via the buildup of crushed material, leading to a consistent single chip failure plane that is not influenced by PDC

orientation and marked by the  $\Psi$  angle. The back and side rake angles have an impact on the force of the cutting face only via the frictional contact between the buildup of crushed material and the rock surface. By accounting for the large width of the cutter as compared to the cut depth and employing a Mohr-Coulomb criteria, equations 3 can be utilized to represent the cutting face force. The ratio between the horizontal contact surface of the crushed zone and the product  $A \cdot \tan(\omega c)$  is  $k$ ,  $\sigma_0$  is the hydrostatic tension in the crushed material, and  $\phi'$  is the friction angle between the crushed rock and the virgin rock. The Chamfer force, defined by the equilibrium of the chip (figure 3), is represented by  $\sigma_0$ . The chamfer, situated on the PDC cylindrical tip, was introduced to prevent diamond chipping when drilling hard formations. Although all PDC cutters are chamfered, the chamfer forces are seldom discussed in literature. Two distinct processes occur at the chamfer based on the depth of the cut. If the depth of cut surpasses the chamfer height, crushed rock is ensnared between the cutting face and the rock, triggering additional forces in the same way as for the cutting face crushed material. As shown in figure 4, the chamfer forces stem from the added friction surface on the base of the groove and can be expressed.

The Chamfer surface area projection on a horizontal plane is referred to as  $A_{ch}$ . When the depth of cut is less than that of the chamfer height, the cutting face with a higher back rake angle is the chamfer and its forces become the cutting face forces. This is exemplified by a  $45^\circ$  chamfer angle and  $15^\circ$  back rake angle where the real back rake angle for a small depth of cut is  $60^\circ$ . Apart from cutting face forces and chamfer forces, it has been demonstrated that the back of the cutter experiences deformation during cutting, consequently resulting in additional forces being applied to the cutter. This observation is backed by a rock behavior model that shows some part of the crushed material being pushed on the back of the cutter. The applied stresses vary linearly from the crushed rock zone hydrostatic pressure  $\sigma_0$  at the cutter tip to 0 at the repression end point, with an assumed rock property angle  $\alpha$ , according to laboratory observations.

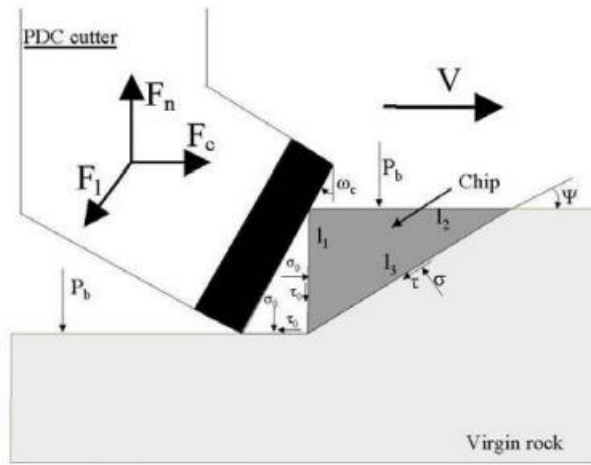


Figure 11 – Build up edge of crushed material model