

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждения высшего образования

**«Российский государственный геологоразведочный университет
имени Серго Орджоникидзе»
(МГРИ-РГГРУ)**

На правах рукописи



Нахангов Хожиакбар Нурмаатович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ОДНОШАРОШЕЧНЫХ
ДОЛОТ ДЛЯ БУРЕНИЯ РАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН**

**Специальность 25.00.14 – Технология и техника геологоразведочных
работ**

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

**канд. техн. наук,
доц. И.Д. Бронников**

Москва – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЫ ОДНОШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ	9
1.1. Одношарошечные долота. для бескернового бурения геологоразведочных скважин.....	9
1.2. Анализ различных подходов к построению моделей работы бурового долота.....	18
1.3. Динамические критерии оценки работоспособности вооружения одношарошечных долот	25
Основные выводы по главе 1	27
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЗУБКА ШАРОШЕЧНОГО ДОЛОТА С ЗАБОЕМ СКВАЖИНЫ.....	28
2.1. Методика исследования.....	28
2.2. Исследование закономерностей изменения относительного усилия, разрушения горных пород при вдавливании зубка породоразрушающего инструмента на различных расстояниях от стенки скважины	37
2.3. Исследование закономерностей изменения относительного усилия разрушения горных пород в зависимости от угла атаки зубка шарошки	43
2.4. Исследование закономерностей изменения относительного усилия разрушения горных пород в зависимости расстояния до границы открытой поверхности	47
Основные выводы по главе 2	52
3. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ БУРОВЫХ ДОЛОТ В ОДНОШАРОШЕЧНОМ ИСПОЛНЕНИИ.....	54
3.1. Общая постановка вопроса	54
3.2. Динамика вооружения одношарошечных долот	59
3.3. Уравнения траекторий движения зубков одношарошечных долот	61

3.4. Определение скорости движения вершины зубка одношарошечного долота.....	63
3.5. Определение пути контакта зубка венца одношарошечного долота на сферическом забое скважины	63
3.6. Методика вычисления передаточного отношения одношарошечного долота.....	65
3.7. Технологические критерии оценки работоспособности одношарошечных долот	68
Основные выводы по главе 3	73
4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ОДНОШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ	74
4.1. Алгоритм вычисления кинетических характеристик одношарошечных долот	74
4.2. Кинетические паспорта одношарошечных долот нового образца диаметров 112 и 140 мм шарошки сферической формы.....	80
4.3. Усовершенствование одношарошечных долот диаметров 112 мм и 140 мм	84
4.4. Кинетические паспорта усовершенствованных одношарошечных долот I 112 С – СН и I 140 Т – СН	86
Основные выводы по главе 4	89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	91
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	93

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и востребованность темы диссертации. Бурение разведочных скважин как сложнейший технологический процесс немислим вне связи с научно-техническим прогрессом в области исследования буровых процессов, связанных с разрушением горных пород и совершенствованием породоразрушающих инструментов.

Породоразрушающий инструмент, являющийся основным забойным механизмом, непосредственно разрушающий горную породу и формирующий форму забоя и ствола изучается учеными и специалистами, с целью его совершенствования и разработки новых конструкций.

За последние 30-40 лет производительность породоразрушающих буровых инструментов всех типоразмеров, возросла кратно. Однако такие достижения базировались в основном на использовании новых сверхпрочных и стойких к абразивному износу материалов и на технологии изготовления буровых долот.

Основная задача геологоразведочного бурения заключается в получении исходных данных для подсчета запасов полезных ископаемых, выявлении формы, размеров и условий залегания полезного ископаемого, а также во всестороннем изучении свойств горных пород и полезных ископаемых.

Прогрессивным способом бурения геологоразведочных скважин является бескерновое бурение, позволяющее увеличить проходку на долото по сравнению с бурением скважин с отбором керна и значительно сократить время на спускоподъемные операции.

Удельный вес бескернового бурения в общем объеме разведочного бурения составляет свыше 20%. Кроме поисково-разведочных работ, бескерновое бурение широко применяется и при детальной разведки месторождений полезных ископаемых с использованием долот для бурения твердых и крепких пород.

Есть основание утверждать, что с увеличением глубины поисков и разведки месторождений твердых полезных ископаемых возрастет и объем бескернового бурения.

Повышение эффективности бескернового бурения позволит значительно увеличить объём геологоразведочных работ.

Наиболее производительным является бескерновый способ бурения шарошечными долотами. Особенно эффективно бурение шарошечными долотами по крепким, разрушенным и трещиноватым породам.

Эффективность одношарошечного долота для бескернового бурения геологоразведочных скважин характеризуется наличием крупногабаритной шарошки, диаметр которой незначительно уменьшен по сравнению с диаметром долота, имеется опора, позволяющая достичь значительно большей осевой нагрузки и большей надёжности долота, а также приближенных к забое каналов для подачи потоков промывочной жидкости. Поэтому проходка на долото одношарошечных долот превышает время пребывания на забое других типов долот.

При бескерновом бурении долота работают в основном в породах различной категории по буримости, поэтому целесообразно разработать конструкции одношарошечных долот, которые эффективно будут работать практически в породах разных категорий твердости.

На сегодняшний день буровые долота для бурения разного рода скважин закупаются из-за рубежа по довольно высокой цене и количество таких закупок, возрастает. Поэтому актуальным в настоящее время является вопрос, хотя бы, по частичному замещению буровым инструментом собственного производства.

При возрастающих объемах бескернового бурения геологоразведочных скважин разработка одношарошечных долот является весьма актуальной научной задачей.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является бескерновое бурение геологоразведочных скважин. Предмет исследования – эффективность применения одношарошечных долот, позволяющих бурить геологоразведочные скважины в широком диапазоне по твердости горных пород.

Цель и задачи работы: Повышение эффективности бескернового бурения скважин путем разработки теоретических основ геометрических параметров

породоразрушающих элементов одношарошечных долот, обеспечивающих снижение энергоемкости бурения при одновременном увеличении скорости бурения геологоразведочных скважин.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

– установление закономерностей изменения относительных усилий разрушения горных пород в зависимости от характеристик стесненных условий забоя скважины, геометрической формы плоскости забоя, угла атаки зубка и наличия рядом дополнительной открытой поверхности;

– вывод уравнений движения работы одношарошечного долота с учетом внедрения его зубка на забой скважины, в основе которых определяются кинетические параметры в виде удельной контактной и объемной работы разрушения;

– разработка новой усовершенствованной конструкции одношарошечного долота, образующую оптимальную сферическую форму забоя скважины, которая позволяет бурить геологоразведочные скважины горных пород разной твердости;

Научная новизна:

• Разработаны математические 3D модели, имитирующие работу зубка на забое скважины в различных породах, для инженерного анализа в программном пакете ANSYSWorkbench позволяют, найти зависимости относительных усилий разрушения горных пород при вдавливания зубка от расстояния до стенки скважины.

• Определены закономерности изменения усилия разрушения горных пород в зависимости от стесненных условий забоя скважины, геометрической формы поверхности забоя, угла атаки зубка и наличия рядом расположенной дополнительной открытой поверхности, на основе которых разработана методика определения оптимальных параметров расстановки рабочих органов на долоте;

• Найдены зависимости удельной и объемной работы разрушения горных пород одношарошечных долот диаметрами 112 мм и 140 мм от траектории зубка на забое скважины, позволяющие наиболее равномерно распределить энергетические затраты по венцам долота.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования заключается в том, что разработана методика, которая позволяет оценивать эффективность и разрабатывать конструкции одношарошечных долот.

Практическая значимость позволяет повысить эффективность бурения геологоразведочных скважин за счет внедрения более эффективных одношарошечных долот.

Методы исследований. Применение комплексных методов теоретических и экспериментальных исследований, включающих: напряженное и деформированное состояние горных пород и рабочих органов породоразрушающих инструментов при их взаимодействии в условиях забоя скважины и определение закономерностей их контакта и параметров внедрения в породу забоя скважины; сравнительные производственные испытания опытных долот с серийными шарошечными долотами при соблюдении горно-технических и технологических условий бурения; обработка результатов сравнительных производственных испытаний на основе методов математической статистики и регрессионного анализа с использованием компьютерной техники.

Научные положения выносимые на защиту.

1. При проектировании одношарошечных долот, необходимо учитывать закономерности разрушения горных пород в зависимости от расположения зубка в плоскости забоя скважины, геометрической формы зубка, наличия дополнительной открытой поверхности, а также от угла атаки зубка.

2. Для разработки кинетических паспортов одношарошечных долот необходимо учесть величины удельной и объемной работы разрушения пород, а также скорости и пути контакта зубка с породой.

3. Найденные закономерности разрушения горных пород в зависимости от параметров вдавливания зубка на забое скважины позволяют найти такую расстановку зубков одношарошечных долот, которая образует оптимальную сферическую форму забоя скважины и позволяет бурить геологоразведочные скважины в горных породах разной твердости.

Достоверность полученных результатов, обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций не вызывает сомнений, так как они установлены на основе современных методов математических исследований, разработки новых конструкций породоразрушающих инструментов для бурения скважин.

Личный вклад автора заключается в разработке и создание математической модели на базе пакета конечно элементного моделирования ANSYS Workbench, которая позволила осуществить экспериментальные исследования механизма взаимодействия рабочих элементов породоразрушающего инструмента непосредственно в условиях забоя скважины и определить относительные усилия разрушения при вдавливании зубка.

Апробация и внедрение результатов исследования: Основные положения и содержание работы были доложены на международных научно-технических конференциях «Новые идеи в науках о земле» - 2014, 2015, 2016, 2017» в МГРИ-РГГРУ, на научных семинарах кафедры «СТБС» МГРИ-РГГРУ (2014, 2015, 2016 и 2017).

Публикации по теме диссертации: Основные результаты работы изложены в 10 печатных работах, в том числе 5 научных статьях, вошедших в перечень ВАК Минобрнауки РФ и 5 тезисах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 105 страниц, 14 таблиц, 28 рисунка и список литературы из 116 наименований.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю к.т.н., доценту И.Д. Бронникову и к.т.н., доценту Ж.Б. Тошову за ценные советы и консультации при подготовке диссертации.

Автор выражает искреннюю благодарность зав. кафедрой СТБС им. Б.И. Воздвиженского д.т.н., профессору Соловьеву Н.В., а также профессору Р.А. Ганджумяну, доценту А.П. Назарову и профессору В.В. Куликову за помощь при проведении анализов исследования и всему коллективу кафедры за помощь в выполнении работы и подготовке ее к защите.

1. ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЫ ОДНОШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ

1.1. Одношарошечные долота. для бескернового бурения геологоразведочных скважин.

Основная задача геологоразведочного бурения заключается в получении исходных данных для подсчета запасов полезных ископаемых, выявлении формы, размеров и условий залегания полезного ископаемого, а также во всестороннем изучении свойств горных пород и полезных ископаемых.

Бурение геологоразведочных скважин без отбора керна - основной вид геологоразведочных работ. В настоящее время затраты средств на разведочное бурение вместе с сопутствующими ему работами составляют более 55% от всех расходов на геологоразведочные работы, при этом на бескерновое бурение затрачивается более 20% всех расходов. Объемы бескернового бурения непрерывно возрастают, одновременно повышается средняя скорость проходки скважин [96].

Высокий рост скоростей, проходки скважин бескерновым способом объясняется внедрением новых высокоэффективных типов породаразрушающего инструмента.

Один из важнейших резервов повышения технико-экономических показателей проходки геологоразведочных скважин — применение бурения без отбора керна (бескерновое).

Бескерновое бурение скважин можно применять во всех случаях, когда для решения геологических задач не нужен керновый материал [66, 96]:

- 1) при детальной разведке месторождений с хорошо изученными геологическими разрезами;
- 2) для бурения по вмещающим породам, не представляющим геологического интереса, когда эти породы изучены на предшествующих стадиях разведки;
- 3) для сооружения сейсмических и гидрогеологических скважин.

В настоящее время бескерновое и комбинированное бурение широко применяют при разведке месторождений угля, рудных и других твердых полезных ископаемых, а также при бурении структурно-поисковых скважин на нефть и газ.

Наиболее широкое использование при бурении геологоразведочных скважин бескерновым способом нашли шарошечные долота, которые различаются по типам в зависимости от категорий буримых пород, а также от физико-механических свойств и режимов бурения. Поэтому повышение эффективности использования долот зависит от правильного применения каждого типа долота.

На сегодняшний день за рубежом серийным производством шарошечных долот занимаются около 20 фирм. Из них лидерами по техническому уровню и качеству выпускаемой продукции по-прежнему является четверка фирм из США: Hughes Christensen, Smith, Reed, Security DBS. В последнее время к ним приближается фирма Varel. Кроме того, шарошечные долота в меньших объемах выпускаются такими фирмами США, как RockBit, Walker-McDonald и др., а также фирмами Японии (TIX), Румынии (Industrial), Венгрии (DKG) и других стран.

В России и СНГ основными являются производители долот: ОАО «Волгабурмаш», ОАО «БУРИНТЕКС», ОАО «Уралбурмаш», ОАО «СМЗ», ОАО «ДДЗ» (Украина). Среди них лидирующее положение занимает ОАО «Волгабурмаш», выпускающее практически полную гамму современных конструкций долот с герметизированной опорой, в ряде случаев успешно конкурирующих с долотами фирмы Varel и ведущих зарубежных фирм [116].

Одношарошечные долота (ОД) используют для бескернового бурения геологоразведочных скважин в породах средней крепости (типа С) и в твердых породах (типа Т). Одношарошечные долота характеризуются наличием крупногабаритной шарошки (рисунок 1.1), диаметр которой незначительно уменьшен по сравнению с диаметром долота, а также наличием увеличенных опорных подшипников и приближенных к забою каналов для подачи потоков промывочной жидкости. Поэтому продолжительность работы на забое у одношарошечных долот значительно превышает время пребывания на забое у других типов долот [96].

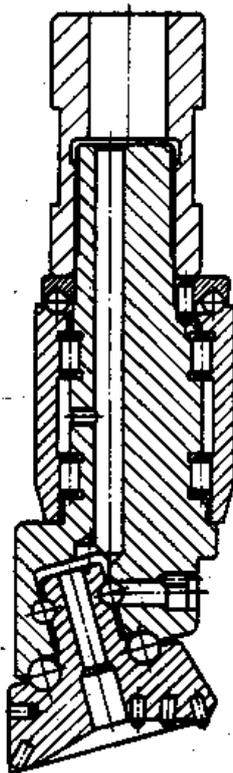


Рисунок 1.1. Одношарошечное долото с центрирующей втулкой

В зависимости от конфигурации шарошек и кинематических схем, разработано несколько конструкций одношарошечных долот: с плоскими шарошками, с коническими шарошками, с шаровидными шарошками, с вогнутыми и с дисковыми шарошками. Все эти конструкции можно подразделить на типы в зависимости от назначения и характера зубчатого или штыревого вооружения шарошек.

Буровые одношарошечные долота с плоскими шарошками предназначены для бурения геологоразведочных скважин в породах средней крепости без отбора керна с получением забоя плоской горизонтальной формы (рисунок 1.2а). Это долото разработано в СКБ ВПО «Союзгеотехника» под шифром ОДШ-93 и состоит из корпуса с резьбовым ниппелем и цапфой, на которой с помощью шарикового замкового подшипника и центрального радиально-упорного шарикового подшипника смонтирована плоская шарошка, вооруженная твердосплавными зубками со сферической рабочей поверхностью. Тыльная часть шарошки армирована твердосплавными зубками с плоской рабочей поверхностью. Промывка забоя и очистка зубьев шарошки от разбуренного шлама осуществляются через центральный канал, расположенный вдоль оси шарошки и

соединенный с внутренней полостью корпуса долота. Ось шарошки имеет наклон к оси долота 10° . Для восприятия радиальных сил, действующих на шарошку со стороны стенки скважины, на корпусе установлено упорное кольцо, смонтированное с помощью цилиндрических роликовых подшипников. Передаточное отношение частоты вращения бурового вала и шарошки равно 18:1.

Буровые одношарошечные долота с коническими шарошками предназначены для бурения геологоразведочных скважин в породах средней крепости с пропластками твердых пород с получением забоя плоской горизонтальной формы (рисунок 1.2 б). Кинематическая схема долота обеспечивает передачу частоты вращения бурового вала на коническую шарошку с передаточным отношением 20:1.

Коническая шарошка оснащена твердосплавными зубками со сферической рабочей поверхностью на основном рабочем конусе и цилиндрическими зубками с плоской рабочей поверхностью на затылочном конусе. Ось шарошки наклонена к оси долота под углом 35° . Над шарошкой на корпусе долота установлено упорное эксцентричное кольцо со стороны, противоположной цапфе шарошки, для восприятия нагрузок со стороны стенки скважины. Промывку производят через боковой канал, соединенный с внутренней полостью долота.

Буровые одношарошечные долота с шаровидными шарошками предназначены для бурения геологоразведочных скважин в мягких породах и в породах средней крепости с получением забоя сферической формы (рисунок 1.2в). Шарошка долота шаровидной формы наклонена к оси долота под углом 20° и армирована твердосплавными зубками со сферической рабочей поверхностью. Забой промывают через центральный боковой канал. В отдельных вариантах предусматривают промывку через канал, проходящий вдоль оси цапфы. На корпусе долота установлено эксцентричное упорное кольцо для восприятия нагрузок, действующих со стороны стенки скважины.

Буровые одношарошечные долота с вогнутыми шарошками предназначены для бурения геологоразведочных скважин в твердых породах с пропластками средних и крепких пород (рисунок 1.2г). Рабочая поверхность шарошки вогнутой формы оснащена твердосплавными зубками со сферическими рабочими головками. Вогнутая поверхность шарошки выполнена по радиусу с

центром, расположенным в плоскости над торцом шарошки. При вращении вокруг оси долота рабочая поверхность шарошки создает забой выпуклой формы, что позволяет сконцентрировать ударные силы торцевых зубков на разрушении периферийного участка забоя, а также частично воспринимать нагрузки со стороны стенки скважины. Вогнутая шарошка наклонена к оси долота под углом 20° и имеет передаточное отношение частоты вращения бурового вала к шарошке 20:1. На корпусе долота против цапфы шарошки установлено упорное эксцентричное кольцо, упирающееся в стенку скважины и воспринимающее силы, действующие на калибрующее вооружение шарошки.

Забой очищают от разбуренной породы через боковой канал, соединенный с внутренней полостью долота. Частично потоки промывочных агентов подаются через каналы в цапфе долота

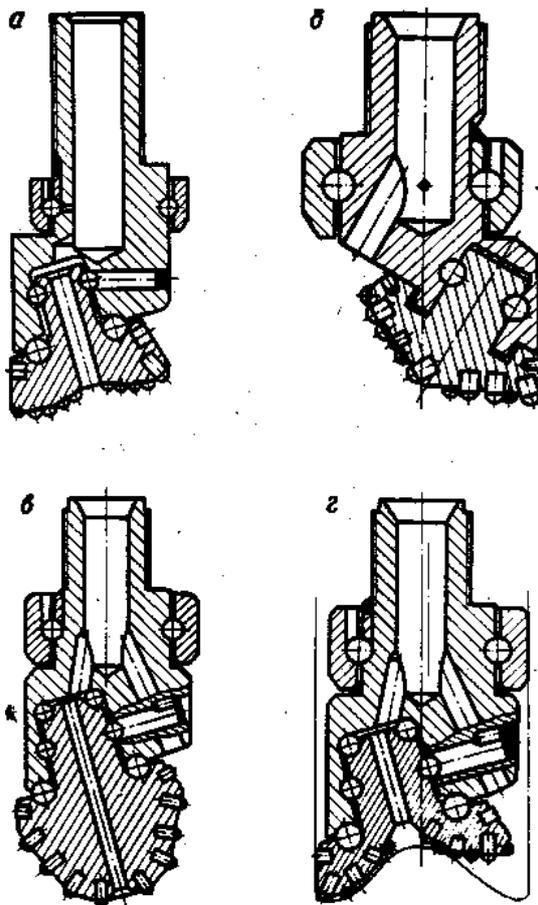


Рисунок 1.2. Одношарошечные буровые долота:

a — с плоскими шарошками; *б* — с коническими шарошками;
в - с шаровидными шарошками; *г* - с вогнутыми шарошками

Буровые одношарошечные долота с дисковыми шарошками предназначены для бурения геологоразведочных скважин в твердых породах с пропластками крепких.

Шарошка долота состоит из набора отдельных дисковых с твердосплавным вооружением, самостоятельно вращающимся относительно цапфы долота или относительно корпуса шарошки. Ось дисковой шарошки наклонена к оси долота от 55 до 75°, что обеспечивает равномерное перекатывание каждого отдельного диска по своей траектории на поверхности забоя, исключая проскальзывание ударных зубков по поверхности забоя. Разрушение забоя с проскальзыванием и со срезом породы осуществляет только калибрующий периферийный диск. Рабочие поверхности дисков оснащены твердосплавными зубками цилиндрической формы со сферической или клиновой головкой. Забой очищается от бурового шлама потоками очистных агентов через центральный канал, расположенный над шарошкой.

Рациональность уменьшения количества шарошек при конструировании новых малогабаритных долот подтверждают также и прекрасные результаты полученные при использовании в объединении Грознефть при разбуривании твердых пород на глубинах 1500м и 5000 м ОД диаметром 140 мм конструкции ГрозНИИ. Показатели их работы значительно превышают показатели, полученные при бурении трехшарошечным долотам (таблица 1.1).

Сравнительные данные о работе долот различных типоразмеров в объединении Грознефть при бурении на глубинах 1500-5000 м.

Таблица 1.1

Тип и размер долота	Средняя проходка на долота, м	Средняя механическая скорость проходки, м/ч	Средняя рейсовая скорость проходки, м/ч
Трехшарошечные №8	6	1,25	0,4
1В-6АС	9	1,58	0,6
4В-6АС	8,8	1,38	-
ДФК (140)№6	25	1,2	0,9
БФГ (140) №6	27,5	1,16	1,1
ОДГ-6	40,5	2,14	-
Алмазное №6	186	1,6	1,5

Диаметр цапфы долота ОДГ-6 равен 74,4 мм, у трехшарошечного долота 4В-6АС всего лишь 30 мм, длина цапфы и диаметр шаров замкового подшипника у ОД соответственно 93 и 19,05 мм вместо 47 и 9,5 мм.

Вооружение ОД выполнено в виде твердосплавных цилиндрических штырей с рабочей кромкой клиновидной формы, заделанных в тело шарошки на глубину 8-10 мм холодной запрессовкой либо заправкой латунью.

ОД №6 впервые были изготовлены в 1963 г. на Поваровском опытном заводе под шифром ОДГ-6 и на Верхне-Сергинском машиностроительном заводе под



Рисунок 1.3. Одношарошечное долото ОДГ-6

шифром 7В-140Т. ОД применялись в Грознефти в эксплуатационном и разведочном бурении на глубинах 1500-5500 м в самых различных по возрасту и литологическому составу отложениях, представленных комплексом пород различной твердости и абразивности (плотные глины, мергели, аргиллиты, известняки, песчанистые глины)

ОАО «Уралбурмаш» освоил производство одношарошечных долот типов I 161 СЗ-Н и 139,7; 161; 190,5; 215,9 типа СЗ-АУ.

Долото I 161 СЗ-Н (рисунок 1.4) предназначено для бурения в абразивных породах средней твердости. Опора шарошек долота диаметром 161 мм типа СЗ состоит из трех подшипников скольжения и двух шариковых подшипников, один из которых замковый. Шарошка оснащена 64 твердосплавными зубками, которые

расположены по двухзаходной спирали. Для подачи бурового раствора на забой в корпусе долота предусмотрено наклонное промывочное отверстие круглого сечения, а на корпусе шарошки выполнены дополнительные продольные пазы.

Долота типов I 139,7 СЗ-АУ, I 161 СЗ-АУ, I 190,5 СЗ-АУ и I 215,9 СЗ-АУ также предназначены для бурения абразивных пород средней твердости. Герметизированные маслonaполненные опоры этих долот состоят из трех подшипников скольжения и одного шарикового (замкового) подшипника (рисунок 1.5). Шарошки указанных долот оснащены твердосплавными зубками с заостренной копытообразной рабочей поверхностью соответственно в количестве 54, 63, 50 и 51.

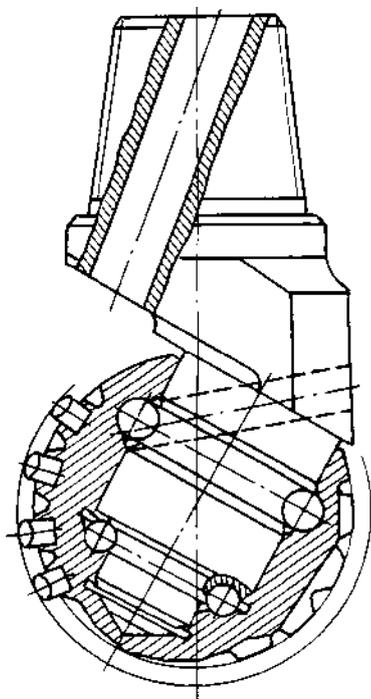


Рисунок 1.4. Одношарошечное долото типа I 161 СЗ-Н ОАО «Уралбурмаш»

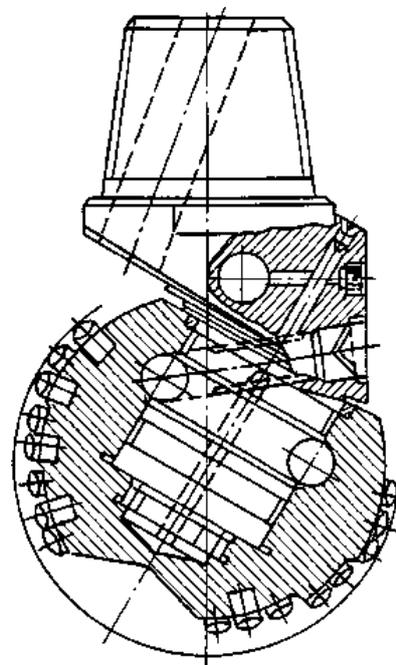


Рисунок 1.5. Одношарошечное долото типа I 139,7 СЗ-АУ с герметизированной маслonaполненной опорой ОАО «Уралбурмаш»

Для принудительной подачи смазки в опору в корпусе лапы предусмотрен маслonaполненный резервуар с уравнителем давления и система каналов, соединяющих резервуар с полостью опоры. Герметизация внутренней полости шарошки у ее торца осуществляется с помощью резинового кольца круглого сечения.

Для подачи бурового раствора на забой в корпусе долота предусмотрено наклонное промывочное отверстие круглого сечения, а на корпусе шарошки

выполнены дополнительные продольные пазы.

ОАО «Волгабурмаш» выпускает одношарошечные долота типа I 190,5 СЗ-АУ и I 215,9 СЗ-АУ (рисунок 1.6), предназначенные для бурения абразивных пород средней твердости.

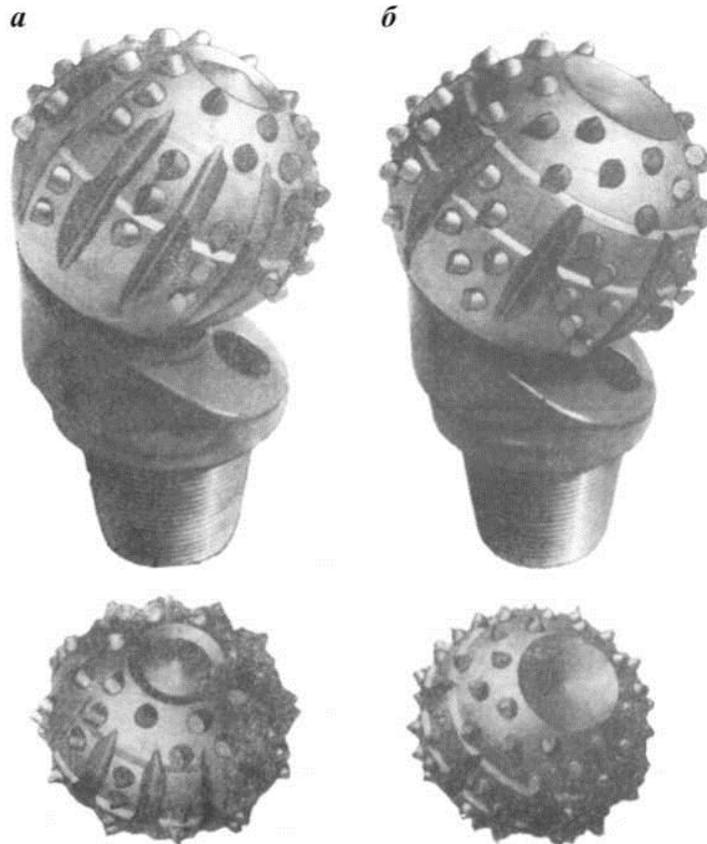


Рисунок 1.6. Одношарошечные долота типов I 190,5 СЗ-АУ (а) и I 215,9 СЗ-АУ (б) с герметизированными маслonaполненными опорами ОАО «Волгабурмаш»

Шарошка долота выполнена в виде сферы большого диаметра, которая оснащена крупными твердосплавными зубками копытообразной формы.

Герметизированная маслonaполненная опора этих долот выполнена по схеме: подшипник скольжения - шариковый (замковый) подшипник - подшипник скольжения - упорный шариковый подшипник - концевой подшипник скольжения.

Подача бурового раствора на забой осуществляется с помощью наклонного промывочного отверстия круглого сечения, а на корпусе шарошки профрезерованы продольные пазы.

1.2. Анализ различных подходов к построению моделей работы бурового долота

Известно, что эффективность процесса разрушения горной породы при бурении скважин является многофакторным объектом и требует всестороннего изучения.

Поэтому в теоретическом плане, в процессе оптимизации разрушения горной породы при бурении скважин явно просматриваются несколько независимых подходов к решению этой проблемы.

Одним из основных критериев эффективности бурения является стоимость метра проходки, так называемый обобщенный критерий [1, 2, 3, 4, 19]:

$$C = \frac{C_1(T_1 + T_2 + T_3) + C_2}{H}, \quad (1.1)$$

где C - стоимость метра проходки при бурении скважин, руб.; C_1 - стоимость одного часа работы буровой установки, руб.; T_1 - время подготовительных операций, час; T_2 - время бурения, час; T_3 - время спуско-подъемных операций, час; C_2 - стоимость бурового долота, руб.; H - проходка на долото, м.

Где величины C_1 , C_2 , T_1 и T_3 заранее известны.

Формула (1.1) дает возможность оценивать экономическую эффективность того или иного бурового долота и, следовательно, проводить сравнительные оценки разных конструкций буровых долот в процессе бурения скважин и выбор долота, которое покажет меньшую величину C , и будет лучшим в заданных геолого-технических условиях.

Первый подход – оптимизация режимов бурения. В этом случае строится эмпирическая зависимость механической скорости бурения от осевого давления и числа оборотов долота, т.е.

$$V_m = f(P, n) \quad (1.2)$$

где V_m – механическая скорость бурения, м/час; P – осевая нагрузка, кН; n – число оборотов долота, об/мин.

Исследователи В.А. Вопияков и другие работы приводят несколько таких зависимостей [116].

В предложении совершенно чистого забоя скважины В. Маурер получил следующее уравнение для механической скорости проходки (V_M)

$$V_M = \frac{n P_D^2}{D^2} K_B \quad (1.3)$$

где n - частота вращения долота, мин^{-1} ; P_D - осевая нагрузка на долота, кН; D - диаметр долота, м; K_B - коэффициент буримости, зависящий от свойств породы, параметров промывочной жидкости, перепада давлений, типа долота, износа его вооружений и т.д.

С учетом того, что большинстве случаев совершенной очистки забоя скважины добиться на практике достаточно сложно, окончательное выражения для V_M :

$$V_M = \frac{n^x P_D^y}{D^z} \quad (1.4)$$

Различными исследователями была изучена зависимость V_M от изменения P_D и n при различных степенях очистки забоя. В результате этих исследований установлены уравнения для V_M :

По Г. Вудсу

$$V_M = an \left(\frac{P}{D} \right)^b, \quad (1.5)$$

где b изменяется от 1,1 до 2,4;

по Р. Канингхэму

$$V_M = a \frac{n^{0.5} P_D}{D}, \quad (1.6)$$

Где a - опытный коэффициент, для определения которого требуется постановка соответствующих экспериментов;

По В.С. Федорову

$$V_M = an^x P_D^y, \quad (1.7)$$

По М. Бингхему (на основании обширного материала стендовых и промысловых наблюдений)

$$\frac{h}{n} = a \left(\frac{P_D}{D} \right)^b, \quad (1.8)$$

где h/n – критерий эффективности процесса бурения (углубление долота за один оборот); a и b – постоянные, характеризующие каждую породу

Из приведенных выше зависимостей следует, что с уменьшением диаметра долот V_m возрастает и все другие буквенные обозначения, кроме V_m , P и n , являются эмпирическими коэффициентами.

В настоящее время продолжают попытки построения таких зависимостей. Однако, вполне очевидно, что универсальной зависимости такого плана быть не может, потому что, во - первых, постоянно изменяются условия разрушения горной породы по мере роста глубины бурения скважин, во - вторых, постоянно идет интенсивное перевооружение буровых предприятий долотами новых, более совершенных конструкций. Поэтому, можно брать любую из этих зависимостей и каждый раз при изменившихся условиях определять экспериментально коэффициенты незнания. Но в таком случае не может быть и речи о прогнозировании и, следовательно, об оптимизации самого процесса разрушения горной породы в общем случае. Это видно и из совместного анализа формул (1.1) и (1.2). Из (1.1) следует, что для прогнозирования стоимости метра проходки необходимы возможности прогнозирования переменных T_2 и H , что связано с V_m соотношением

$$V_m = \frac{H}{T_2}. \quad (1.10)$$

Отсюда следует, что прогнозирование V_m следует искать через эти переменные.

Второй подход – оптимизация разрушения горной породы.

Суть второго подхода, основоположниками которого были В.С. Федоров и Л.А. Шрейнер [102, 103, 105], заключается в минимизации энергии при отделении от массива единицы объема породы. Впоследствии в этом направлении работало несколько научных школ. Лидирующее место здесь занимала школа ВНИИБТ, руководимая Р.М. Эйгелесом [110, 111, 112]. Значительный вклад в развитие этого

направления внесла Уфимская школа, руководимая Р.М. Мавлютовым [8, 39, 40, 67]. Плодотворные исследования разрушения горной породы в экспериментальных условиях были проведены Н.А. Колесниковым в Грозненской школе [32, 33]. Следует отметить, что это научное направление является более прогрессивным в вопросе понимания процесса разрушения горной породы при бурении скважин. Доказательством этому может служить тот факт, что при определении эффекта выкола объема горной породы наблюдается не только количественное соотношение разрушения горной породы и энергии, но и зависимость от характера приложения внешних нагрузок, что вскрывает некоторые аспекты по взаимодействию вооружения долот с поверхностью забоя скважины. При этом необходимо отметить, что и это направление не сопоставляется, как и первое, с обобщенным критерием в форме (1.1). К тому же многие исследователи этого направления склонны через призму своих исследований непосредственно видеть процесс углубки, т.е. механическую скорость. Но, все - таки, это направление имеет ценность в процессе понимания механизма взаимодействия рабочих элементов долота с теми или иными областями поверхности забоя скважины.

Третий подход – использование информационного банка данных.

Суть этого подхода заключается в накоплении промысловых данных по обработке буровых долот тех или иных модификаций в различных геолого-технических условиях и использовании этих данных при оптимизации выбора типов и конструкций с заданными параметрами отработки в известных уже условиях. Очевидно, что при этом необходимо выполнение следующих условий:

- наличие объективной промысловой информации;
- наличие быстродействующей электронно-вычислительной техники;
- эффективная методология поиска и обработки информации;
- оперативная связь промыслов с базой данных.

По косвенным данным [42, 43], на этой основе уже несколько десятилетий

осуществляется оптимизация выбора буровых долот и режимов их обработки в заданных геолого-технических условиях в США.

Не имея иной, более эффективной альтернативы, в свое время ВНИИБТ пытался подобную методику распространить по территории бывшего СССР [4]. Если обратиться к необходимым условиям, то станет очевидным, что объективных предпосылок для формирования и функционирования такой или иной подобной информационно-поисковой системы так и не было построено. Исключение могут составить лишь некоторые общеизвестные теоретические наработки в плане формирования и обработки информации. При этом, не имея достаточно мощной технической базы, советские исследователи искали иные пути выхода на решение важных практических задач в области породоразрушающего бурового инструмента.

Несмотря на малую эффективность рассмотренных выше направлений в вопросах познания общего механизма взаимодействия вооружения буровых долот с породой и практического использования при оптимизации разрушения горной породы в процессе бурения скважин, последние оказались чрезвычайно полезными при построении детерминированных моделей работы буровых долот для самых различных конструкций и модификаций. В процессе этих исследований накапливались знания и опыт в построении таких моделей.

Четвертый подход – построение и функционирование аналитических детерминированных моделей.

В этом подходе построена аналитические структуры критериев оценки работоспособности буровых долот в форме явно выраженных параметров процесса разрушения горной породы и соответствующих или не противоречащих обобщенному критерию в форме (1.1). Как известно, критерии оценки работоспособности буровых долот должны быть явными или неявными функциями от параметров триады: долото-порода-энергия.

Основными этапами построения аналитической детерминированной модели

работы ОД на забое скважины являются [80, 82, 87, 89, 91, 92]:

- 1) Вывод и анализ параметрических уравнений траектории движения зубков ОД.
- 2) Разработка методики вычисления путей контакта зубков ОД с породой на заданном участке поверхности забоя скважины.
- 3) Разработка методики вычисления передаточных отношений ОД любых геометрий и ориентаций на цапфе.
- 4) Построение аналитических структур критериев (во многокритериальном аспекте) оценки работоспособности ОД.

Первые попытки вывода параметрических уравнений траектории движения в форме:

$$\left. \begin{aligned} x &= x(R, r, \varphi, \psi) \\ y &= y(R, r, \varphi, \psi) \\ z &= z(R, r, \varphi, \psi) \end{aligned} \right\} \quad (1.11)$$

были предприняты ранее Г.И. Маньковским [41], А.В. Зубаревым [28], Л.В. Назаровым [44, 45].

Во всех уравнениях этих исследователей была допущена практически одна и та же ошибка, хотя подходы к выводу уравнений были различными. Эти вопросы достаточно подробно освещены в работе И.И. Шамансурова и Б.Л. Стеклянова [99].

Ошибка эта долгое время не была обнаружена, вероятно, по той простой причине, что эти уравнения для расчетов динамических параметров зубков ОД в то время не были востребованы. Аналитические структуры для таких вычислений были очень громоздкими и требовали надлежащих вычислительных средств, которыми исследователи в то время не располагали.

Первую попытку вычисления пути контакта зубка шарошки малогабаритного бурового долота предпринял Л.В. Назаров [44]. Но как уже было замечено ранее, этот расчет был ориентирован на маломощные технические средства, и потому автор прибег к упрощению формулы, содержащей

эллиптический интеграл

$$S = \int_{\psi_0}^{\psi_1} V(\psi) d\psi, \quad (1.12)$$

где

$$V(\psi) = \sqrt{\left(\frac{dx}{d\psi}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\psi}\right)^2 + \left(\frac{dz}{d\psi}\right)^2}.$$

Это послужило серьезным препятствием на пути постановки и решения следующих задач построения аналитических структур критериев оценки работоспособности буровых долот. А следующей задачей являлась задача аналитического вычисления передаточного отношения шарошки.

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2}, \quad (1.13)$$

где ω_1 - скорость вращения шарошки, 1/сек; ω_2 - скорость вращения долота, 1/сек.

Следовательно, передаточное отношение показывает, сколько оборотов вокруг своей оси совершает шарошка за полный оборот долота. Разрешению этой задачи посвящено очень большое количество теоретических и экспериментальных работ.

Первые теоретические работы, посвященные вычислению передаточного отношения шарошек, принадлежат А.Ф. Егереву [26], В.Г. Сократову [65], В.В. Симонову [63].

Все ранее разработанные методики вычисления передаточного отношения в основе своей базировались на идеальных посылах теоретической механики. Иными словами, допущения при построении этих методик были весьма жесткими. И самым жестким из них было допущение - недеформируемость поверхности забоя скважины. И тем не менее эти работы и, особенно, исследования А.Ф. Егереву [26] содержали хорошую перспективу для перехода к разработке методики вычисления передаточного отношения шарошки на деформируемом забое скважины, т.е. в условиях, близких к реальным. Учитывая последнее и была разработана методика вычисления передаточного

отношения для реальных условий [99].

1.3. Динамические критерии оценки работоспособности вооружения одношарошечных долот

Общим недостатком анализов построения аналитической детерминированной модели буровых долот, в выше перечисленных исследованиях является то, что решения искались без учета деформируемости забоя скважины [19]. Этот недостаток впоследствии был устранен исследователями Ташкентской школы, руководимой докт. техн. наук Б.Л. Стегляновым [20,21, 22, 52, 53, 54, 69, 70, 72, 75, 76, 77, 78, 79, 81, 83,84, 94, 95]. Все эти исследования исходили из чрезвычайно важной предпосылки - функциональной связи триады: долото-порода-энергия. В модели этой школы аналитические структуры критериев оценки работоспособности бурового долота выделены в форме явных функций от его геометрических параметров, определяющих кинематику и соответствующую ему форму забоя скважины.

Но при этом, в силу неопределенности границ и пределов физико-механических свойств горных пород и энергетических параметров от внешних усилий на заданном промежутке времени, параметры «порода-энергия» в модель включены в неявной форме. Эти параметры триады функционируют в модели как аргументы функции глубины погружения зубков ОД в породу. А величина углубки определяется и задается в расчетах в пределах высоты вылета зубков из тела шарошки. Таким образом, удалось построить математическую модель работы ОД на деформируемом забое скважины, т.е. в условиях, близких к реальным.

Важными условиями исследований этой школы являются:

- глубокая теоретическая проработка каждой отдельно взятой задачи;
- неременная автоматизация вычислительного эксперимента на базе ЭВМ;
- классификация теоретических наработок и алгоритмов;
- проведение вычислительных экспериментов на реально существующих конструкциях ОД;

Критерии оценки работоспособности, построенных на основе аналитической модели ОД, представленных в монографии О.Н. Голубинцева [24] в форме удельных контактных и удельных объемных работ разрушения.

Исследователями Узбекской школы, принята за аналоги своих динамических критериев с соответствующими постулатами:

1) Удельные контактные и объемные работы разрушения должны быть критериями динамическими и относительными.

2) Вычисления относительных критериев в форме контактных и объемных работ разрушения должны осуществляться при прочих равных условиях, а именно:

при одинаковых величинах внедрения зубков в породу - δ ;

при единичных контактных площадках вершин породоразрушающих элементов - ΔS ;

при одинаковых силах сопротивления единичных площадок в контакте с породой - $F = 1$.

3) Относительные динамические критерии должны быть сориентированы на вычисляемые пути контакта элементарных площадок с достаточно высокой точностью и оперативностью на базе электронно - вычислительной техники.

4) Объем породы на кольцевых забоях скважины должен вычисляться не как разрушенный, а как приходящийся на разрушение, что, очевидно, и придает динамическим критериям в форме удельных контактных и объемных работ разрушения породы на забоях скважины статус относительных.

5) Принимая, что относительные удельные контактные A' и относительные удельные объемные A'' работы разрушения, соответственно, по экстремальным величинам пропорциональны абразивной стойкости и механической скорости, т.е.

Если динамические критерии A' и A'' будут вычисляться достаточно точно в форме явных функций от геометрических параметров долот, то формула (1.18) будет уже с явными причинно-следственными связями, т.е. будет являться детерминированной.

Основные выводы по главе 1

На основе теоретических и экспериментальных исследований отечественных и зарубежных источников в области породоразрушающего инструмента можно сделать следующие выводы.

1. В области исследований динамики разрушения горной породы при бурении геологоразведочных скважин в России и других странах за последние десятилетия проведено большое количество исследований.

2. Для бескернового бурения геологоразведочных скважин использование одношарошечных долот эффективно, так как продолжительность работы на забое одношарошечных долот превышает время пребывания на забое других типов долот.

3. Критерии оценки работоспособности буровых долот должны быть функциями от параметров триады: долото-порода-энергия.

4. Преимуществом вычисляемых критериев оценки работоспособности одношарошечных долот на детерминированной модели является то, что заранее, т.е. на уровне проектирования можно оценить положительные и отрицательные стороны вооружения конструкции одношарошечного долота, но только в относительных величинах, - это позволяет заранее внести конструктивные изменения в геометрию с целью получения положительного эффекта.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЗУБКА ШАРОШЕЧНОГО ДОЛОТА С ЗАБОЕМ СКВАЖИНЫ

2.1. Методика исследования

Критерии оценки работоспособности ОД должны быть функции триады долото-порода-энергия. Для установления закономерностей процесса разрушения горных пород при взаимодействии зубка ОД в условиях забоя скважины, изучались основные физико-механические и горно-технологические свойства горных пород [12, 90, 93, 47].

Исследования проводились по методике [102, 103, 105], разработана математическая модель на базе пакета конечно элементного моделирования ANSYS Workbench, которая позволяет осуществить экспериментальные исследования, имитирующие механизм взаимодействия рабочих элементов породоразрушающего инструмента непосредственно в условиях забоя скважины, на различных породах [12, 47,49].

Фирма ANSYS, Inc., начиная с 10-той версии продукта, предлагает новую платформу Workbench, которая реализует современный графический интерфейс и позволяет эффективно управлять отдельными модулями и продуктами ANSYS [16].

Для геометрического моделирования в эту платформу встроен новый модуль Design Modeler, реализованный на базе ядра Parasolid. Модуль симуляции Mechanical обеспечивает пользователя необходимыми инструментами моделирования. CAE-системы, приобретенные фирмой ANSYS, Inc. за последние годы, такие как CFX, FLUENT, AUTODYN и др., удобно интегрированы в Workbench и могут использоваться для решения связанных задач. С помощью Workbench практически весь комплекс программных продуктов ANSYS может быть объединен с мощными CAD-системами, такими как SolidWorks, Unigraphics, Inventor и др., в единую расчетно-проектировочную среду. На базе Workbench

реализованы инструменты для обмена и эффективного управления расчетными данными пользователей (ANSYS EKM) [16].

Программа ANSYS, как и многие другие CAE-продукты, для математического моделирования различных физических процессов использует метод конечных элементов. Этот метод сочетает в себе универсальность алгоритмов решения различных краевых задач с эффективностью компьютерной реализации вычислений. Работа с пакетом ANSYS предполагает наличие у пользователя базовых знаний в области метода конечных элементов.

Метод конечных элементов (МКЭ) позволяет приближённо численно решать широкий спектр физических проблем [27], которые математически формулируются в виде системы дифференциальных уравнений или в вариационной постановке. Этот метод можно использовать для анализа напряжённо деформированного состояния конструкций, для термического анализа, для решения гидро - газодинамических задач и задач электродинамики.

Исходным объектом для применения МКЭ является материальное тело (в общем случае - область, занимаемая сплошной средой или полем), которое разбивается на части - *конечные элементы* (КЭ) (рисунок 2.1). В результате разбивки создаётся *сетка* из границ элементов. Точки пересечения этих границ образуют *узлы*. На границах и внутри элементов могут быть созданы дополнительные узловые точки. Ансамбль из всех конечных элементов и узлов является основной конечно-элементной моделью деформируемого тела. Дискретная модель должна максимально полно покрывать область исследуемого объекта [16].

Выбор типа, формы и размера конечного элемента зависит от формы тела и вида напряжённо-деформированного состояния. Стержневой КЭ применяется для моделирования одноосного напряжённого состояния при растяжении (сжатии), а также в задачах о кручении или изгибе. Плоский двумерный КЭ в виде, например, треугольной или четырёхугольной пластины используется для моделирования плоского напряжённого или плоского деформированного состояния. Объёмный трёхмерный КЭ в виде, например, тетраэдра, шестигранника или призмы служит

для анализа объёмного напряжённого состояния. КЭ в форме кольца применяется в случае осесимметричного напряжённого состояния. Для расчёта изгиба пластины берётся соответствующий плоский КЭ, а для расчёта оболочки используется оболочечный КЭ или также изгибаемый плоский элемент. В тех зонах деформируемого тела, где ожидаются большие градиенты напряжений, нужно применять более мелкие КЭ или элементы большего порядка.

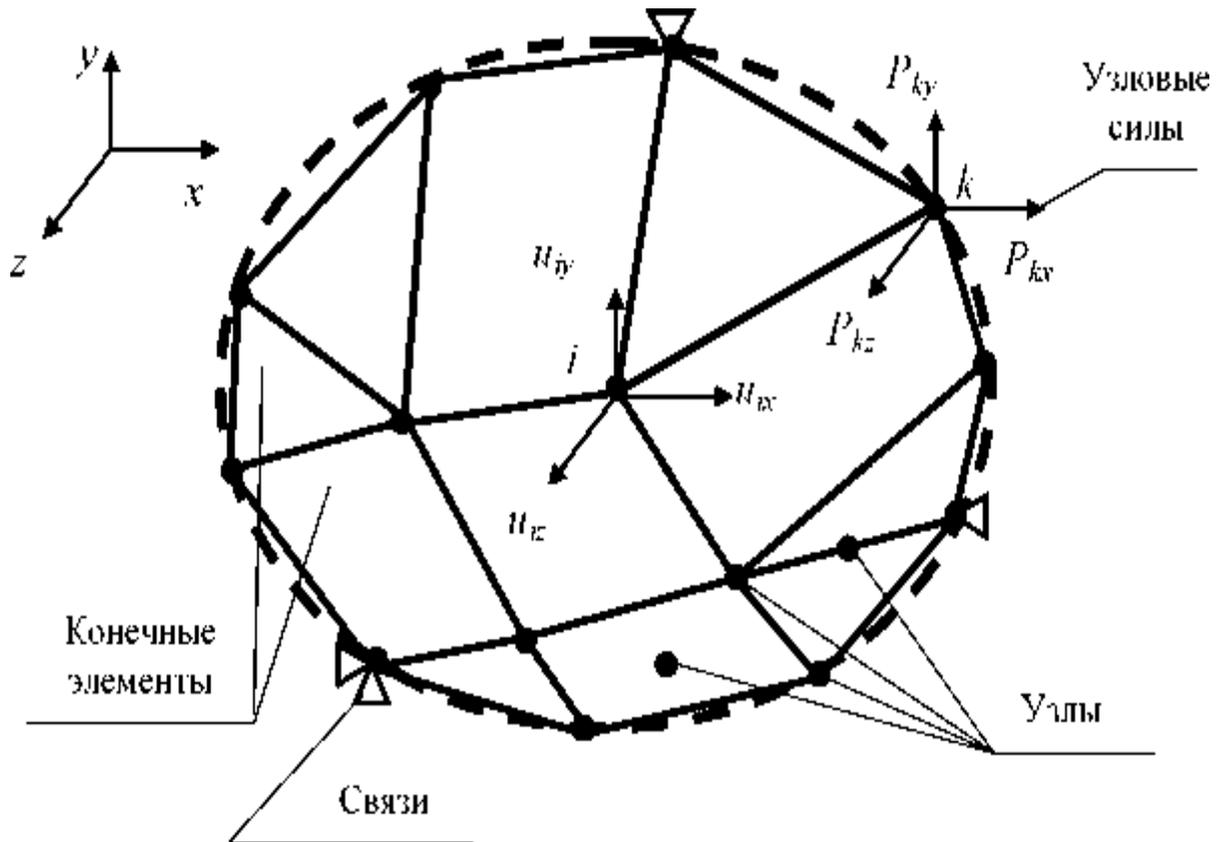


Рисунок 2.1. Конечно элементная сетка

Программный комплекс ANSYS решает методом конечных элементов стационарные и нестационарные, линейные и нелинейные задачи из таких областей физики, как механика твёрдого деформируемого тела, механика жидкости и газа, теплопередача, электродинамика. Возможно решение связанных задач. Для решения задач деформирования конструкций МКЭ применяется в варианте метода перемещений.

Решение МКЭ поставленной краевой задачи осуществляется программой ANSYS в три этапа соответственно логике метода. На первом этапе (препроцессинге) создаётся основа конечно-элементной модели исследуемого объекта. Этот этап включает в себя нижеследующие процедуры:

1. Устанавливается физический тип задачи (механика деформируемого твёрдого тела, теплопередача, гидродинамика и т.д.), производится соответствующая настройка программы.

2. Выбирается тип конечного элемента в зависимости от размерности объекта и других его свойств. Могут быть заданы некоторые характеристики элемента.

3. Выбирается материал объекта и указываются все его необходимые свойства. Свойства могут быть заданы с клавиатуры или импортированы из библиотеки материалов ANSYS. Задание свойств определяет модель материала (линейно-упругий, упруго-пластичный, билинейный и т.д.), что влияет на выбор определяющих уравнений МКЭ.

4. Строится геометрическая твёрдотельная модель объекта. В классическом ANSYS для этого используется программный модуль PREP 7. В Workbench используется модуль Design Modeler. Геометрическая модель может быть экспортирована из какого-либо CAD- пакета.

5. Геометрическая модель разбивается на конечные элементы. При разбивке могут быть заданы различные параметры сетки.

6. В случае контактной задачи устанавливаются контактные пары, определяется модель контакта и её характеристики.

Второй этап - наложение на модель необходимых физических условий и решение задачи - состоит из трёх основных шагов:

1. Задаются граничные условия - силы, перемещения (связи) и пр.

2. Выбирается тип анализа (статический, динамический, модальный и т.д.). Возможен выбор метода решения системы уравнений МКЭ и задание параметров вычислительных процедур (числа шагов нагружения, числа итераций и др.).

3. Осуществляется решение системы уравнений, полученной методом МКЭ. В результате решения формируется файл результатов, который содержит вектор найденных степеней свободы (узловых перемещений, узловых температур и т.д.).

Третий этап (постпроцессинг) - анализ результатов расчёта. Рассчитанные МКЭ физические величины (перемещения, деформации, напряжения, температуры и др.) представляются в графическом окне ANSYS в виде картинок, таблиц, графиков, анимацией. Все эти результаты можно записать в соответствующие файлы.

При выполнении рассмотренных выше этапов решения задачи программа ANSYS создаёт в памяти компьютера базу данных, содержащую полную информацию о модели. Эту базу данных можно сохранить в бинарном файле и использовать для продолжения анализа.

Центральным объектом при работе в ANSYS Workbench является *проект*, под которым понимается совокупность геометрических, физических и конечно-элементных моделей тел рассматриваемой задачи, а также результатов численного решения. Проект может состоять из одного или нескольких *блоков*, реализующих отдельные виды инженерного анализа. В свою очередь, блок состоит из *элементов* - структурных частей блока, отвечающих за определенный этап анализа. Можно выделить следующие этапы проведения инженерного анализа:

- разработка модели (препроцессинг). На данном этапе осуществляется подготовка геометрической модели, задание материала и его свойств, генерация конечно-элементной сетки, определение физических условий моделирования. Конечным результатом этапа является модель, подготовленная для численного решения;

- настройка решателя и решение. На данном этапе задаются необходимые настройки решателя, параметры, обеспечивающие сходимость итерационного процесса, и запускается решатель. Конечным результатом этапа является численное решение, полученное с заданной точностью;

- обработка результатов (постпроцессинг). На данном этапе

полученное численное решение задачи используется для визуализации распределения необходимых физических величин (напряжений, деформаций, температур и др.). Конечным результатом этапа является набор графиков, анимаций, массивов значений, представляющих необходимые результаты решения задачи [16].

Процедура инженерного анализа редко бывает линейной. При решении практической задачи, как правило, приходится часто возвращаться к предыдущим этапам, вносить изменения в модели, перестраивать КЭ-сетку, корректировать настройки решателя. Наличие удобных инструментов для этого играет весьма важную роль, так как позволяет существенно ускорить процесс получения численного решения. Платформа Workbench обеспечивает инженера большим количеством инструментов, необходимых на всех этапах анализа, позволяет быстро получать численное решение различными решателями, эффективно организует взаимосвязи между отдельными видами инженерных расчетов.

Как было отмечено выше, ANSYS позволяет проводить инженерный анализ различного вида; все они представлены в окне инструментов *Toolbox*. Некоторые виды анализа представлены в следующем перечне:

- *Static Structural* - статический прочностной анализ;
- *Transient Structural* - нестационарный прочностной анализ;
- *Steady-State Thermal* - стационарный тепловой анализ;
- *Transient Thermal* - нестационарный тепловой анализ;
- *Modal* - модальный анализ;
- *Harmonic Response* - гармонический анализ;
- *Linear Buckling* - анализ устойчивости;
- *Explicit Dynamics* - твердотельный динамический анализ.

После каждого расчета исследования, обработка результатов измерения проводилась по методикам применения методов корреляционного и регрессионного анализов [23].

Корреляционный анализ дополняет статистический анализ и имеет большое практическое значение, поскольку может быть использован для решения ряда технологических задач бурения, например, для установления возможности одновременного контроля нескольких параметров по одному, связанному корреляционно с другими, для обнаружения еще неизвестных связей и других задач.

Уравнения регрессии (математической модели) в задачи регрессионного анализа определялась в виде

$$P_{отн} = f(L) \quad (2.1)$$

$$P_{отн} = \varphi(\lambda) \quad (2.2)$$

где $P_{отн}$ – относительное усилие вдавливания зубка в условиях забоя скважины; L – расстояния вдавливания зубка от стенки скважины, м; λ – угол атаки зубка, градус.

Для проведения расчета смоделирован однородный массив породы со скважиной и зубок со сферической головкой.

Зубки сделаны с диаметром $d=6$ мм и $d=10$ мм и высотой 30 мм.

При проведении расчетов были заданы свойства материалов конструкции и среды (таблица 2.1) в режиме Engineering Data.

Генерация конечно-элементной сетки производилась автоматически с параметрами Revlance Center = Fine, то есть мелкая сетка [136].

Объёмная расчётная модель была построена в ANSYS Workbench, графическом интерфейсе Design Modeller. Схема вдавливания показана на рисунке 2.2.

Первая серия опытов проводилась при плоской форме забоя скважины, при котором исследовались закономерности изменения усилия разрушения горных пород в зависимости от расстояния зубка до стенки скважины, схема которого приведена на рисунке 2.2, а.

Физико - механические свойства массивов горных пород

№	Наименование пород	Основные свойства горных пород				
		Плотность, кг/м ³	Сопротивление на сжатие, МПа	Сопротивление на растяжение, МПа	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона, μ
1.	Сланцы, алевролиты	1800÷2200	49-59	7,3-7,8	0,29-0,34	0,35
2.	Мрамор, известняк	2400÷2500	98-128	20-24	0,39-0,44	0,30
3.	Граниты, роговики	2600÷2700	157-177	25-29	0,49-0,54	0,25

Вторая серия опытов проводилась при вдавливании зубка по контуру стенки скважины, при котором исследовались закономерности изменения усилий и параметров разрушения горных пород в зависимости от формы поверхности скважины, схема которого показана на рисунке 2.2, б.

Третья серия опытов проводилась для установления закономерностей изменения усилий и параметров разрушения горных пород в зависимости от формы забоя скважины и различных углов вогнутости поверхности забоя, равных 90^0 , 100^0 , 120^0 и 130^0 , схема которых приведена на рисунке 2.2, в.

Четвертая серия опытов проводилась для установления закономерностей изменения усилий и параметров разрушения горных пород в зависимости от углов атаки зубца, схема которых показана на рисунке 2.2, г.

Пятая серия опытов проводилась для установления закономерностей изменения усилий и параметров разрушения горных пород в зависимости от расстояния границы открытой поверхности или лунки, полученной от предыдущего внедрения зубка.

**СХЕМА ДЕЙСТВИЯ ЗУБКА РАБОЧЕГО ОРГАНА
ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ
ФОРМАХ ЗАБОЯ И ПОЛУПРОСТРАНСТВА**

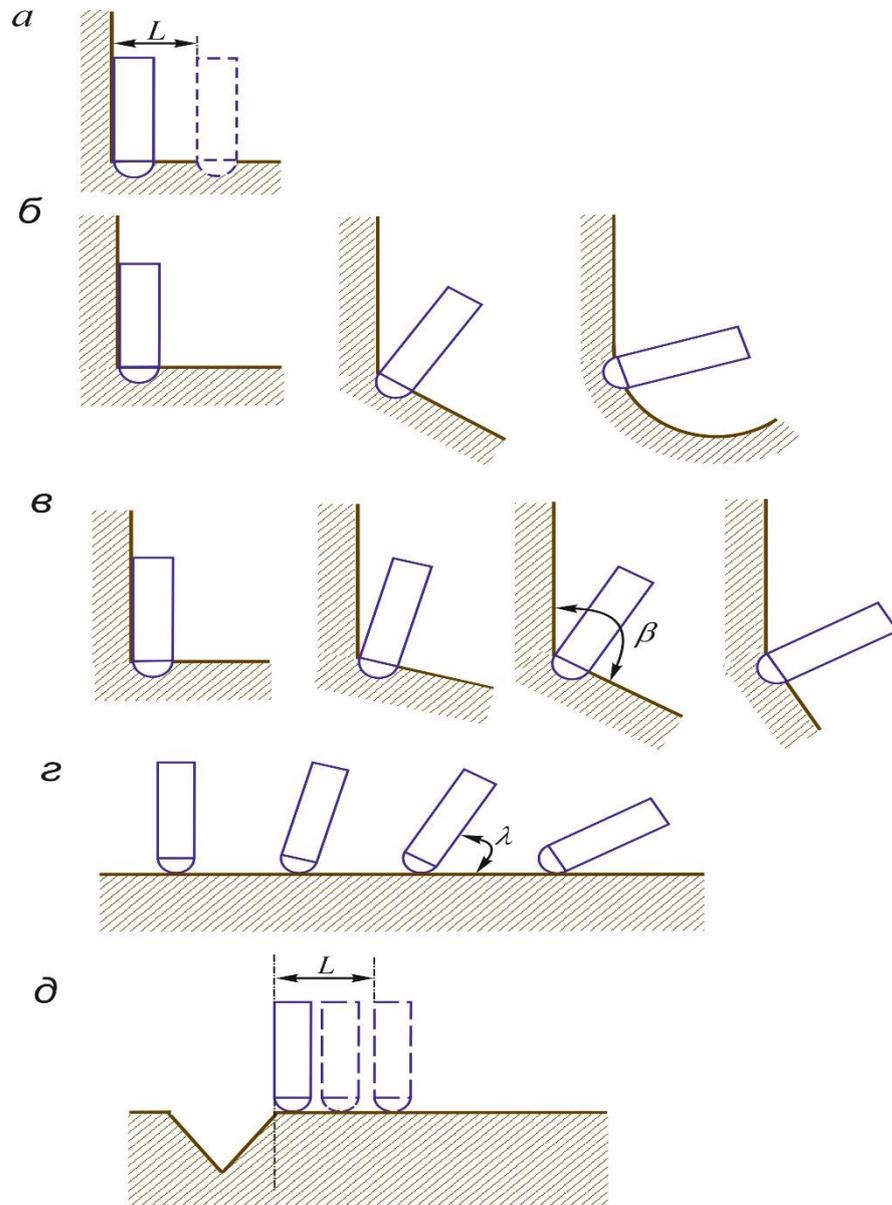


Рисунок 2.2. Схема действия зубка рабочего органа породоразрушающего инструмента при различных формах забоя и полупространства.

а – при вдавливании зубка на различном расстоянии от стенки скважины при плоском забое; *б* – при вдавливании зубка при различных формах забоя скважины; *в* – при вдавливании зубка при различном угле вогнутости забоя; *г* – при вдавливании зубка на границе полуплоскости при различных углах атаки; *д* – при вдавливании зубка при наличии рядом дополнительной открытой поверхности

После каждой серии экспериментальных исследований, установлено усилие разрушения горных пород.

Для удобства анализа параметров и усилия разрушения горных пород, рассматривается относительно данных вдавливание зубка по методике Л.А. Шрейнера: отношение усилий при вдавливании зубка у контура стенки скважины – $P_{y.c}$, к усилию $P_{ш}$ по штампу.

$$P_{отн} = \frac{P_{y.c}}{P_{ш}} \quad (2.3)$$

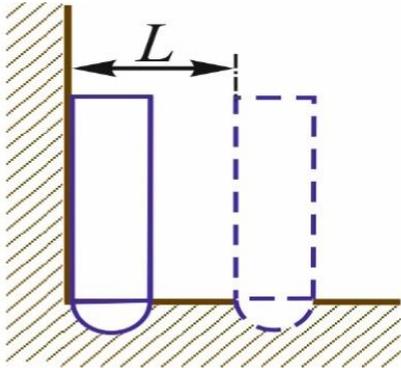
$P_{отн}$ – относительное усилие вдавливания зубка в условиях забоя скважины; $P_{y.c}$ – усилия при вдавливании зубка у контура стенки скважины, МПа; $P_{ш}$ – твёрдость по штампу, по Л.А. Шрейнеру, МПа.

2.2. Исследование закономерностей изменения относительного усилия, разрушения горных пород при вдавливании зубка породоразрушающего инструмента на различных расстояниях от стенки скважины

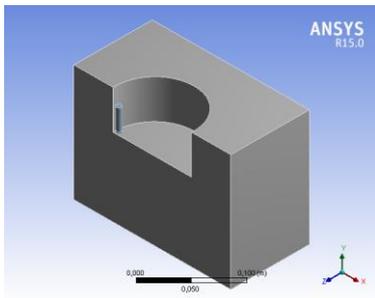
Для исследования закономерностей изменения относительного усилия разрушения горных пород в зависимости от различных расстояний зубка [47, 12] были созданы следующие математические модели (рисунок 2.3):

- блоки размером 200x100x150 мм.
- на боковых плоскостях блоков сделаны скважины в разрезе с шириной 100 мм, глубиной 50 мм с плоской формой забоя.
- зубок диаметром 6 мм и 10 мм высотой 30 мм со сферической головкой.

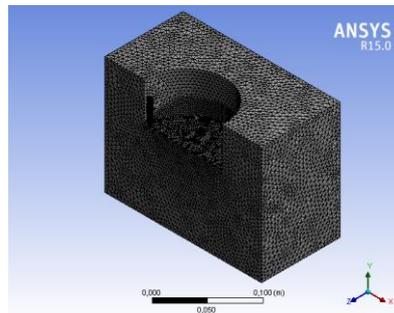
а)



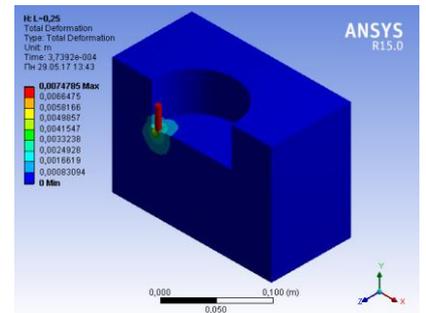
б)



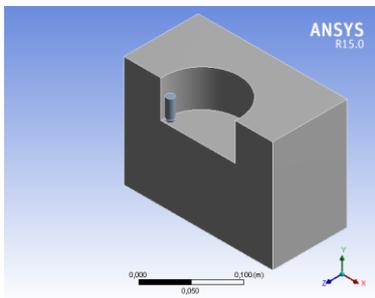
в)



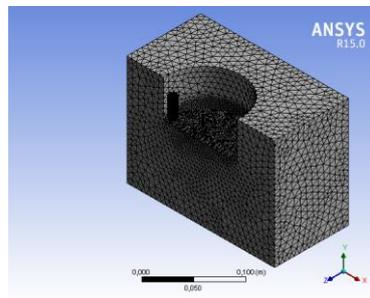
г)



д)



е)



ж)

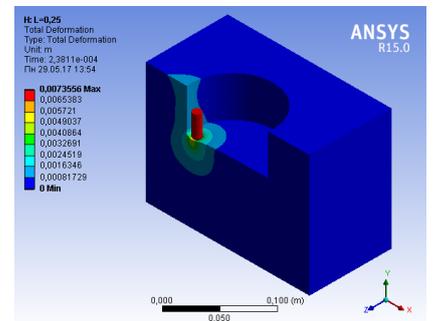


Рисунок 2.3. Вдавливание зубка в зависимости от расстояния от стенки скважины. а) схема забоя которых в разрезе; б), в), г) объёмная математическая модель $d=6\text{мм}$; д), е), ж) объёмная математическая модель $d=10\text{мм}$

На основании результатов, приведенных в таблицах 2.2 и 2.3, были получены параболические закономерности изменения относительного усилия разрушения горных пород при вдавливании зубка при различных расстояниях от стенки скважины (рисунок 2.4).

Закономерности изменения относительных усилий разрушения горных пород при вдавливании зубка с диаметром $d=6$ мм при различных расстояниях от стенки скважины

Таблица 2.2

№	Расстояние зубца от стенки скважины, L мм	Алевролиты, $P_{отн}$	Известняки, $P_{отн}$	Граниты, $P_{отн}$
1.	0	2,167	1,923	1,708
2.	$0,25d$	1,889	1,744	1,417
3.	$0,5d$	1,694	1,487	1,250
4.	$0,75d$	1,528	1,385	1,208
5.	d	1,481	1,128	1,167
6.	$1,25d$	1,160	1,077	1,146
7.	$1,5d$	0,972	1,026	1,021
8.	$1,75d$	1,225	1,272	1,292
9.	$2d$	1,667	1,036	1,458

Исследованиями установлено, что при вдавливании зубка диаметром $d=6$ мм у стенки скважины относительное усилие разрушения для различных исследуемых породах составляют: песчаники окварцованные, сланцы и алевролиты – 2,2; песчаники, мраморы и известняки – 1,9; граниты и роговики - 1,7 и зубка диаметром $d=10$ мм: сланцы и алевролиты – 2,8; песчаники, мраморы и известняки – 2,2; граниты и роговики - 1,8.

Закономерности изменения относительных усилий разрушения горных пород при вдавливании зубка с диаметром $d = 10$ мм при различных расстояниях от стенки скважины

Таблица 2.3

№	Расстояние зубца от стенки скважины, L мм	Алевриты, $P_{отн}$	Известняки, $P_{отн}$	Граниты, $P_{отн}$
1.	0	2,800	2,200	1,800
2.	$0,25d$	1,929	1,270	1,220
3.	$0,5d$	2,024	1,060	1,235
4.	$0,75d$	1,534	1,240	1,208
5.	d	1,401	1,179	1,140
6.	$1,25d$	1,236	1,118	1,086
7.	$1,5d$	1,010	1,009	1,004
8.	$1,75d$	1,423	1,127	1,020
9.	$2d$	1,202	1,121	1,054

Полученные зависимости показывают, что при вдавливании зубка на расстоянии от стенки скважины, равной её диаметру, относительное усилие разрушения горных пород резко падает и составляет, соответственно, 1,4; 1,1 и 1,1.

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОГО УСИЛИЯ
РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВДАВЛИВАНИИ ЗУБКА
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РАССТОЯНИЯХ ОТ СТЕНКИ СКВАЖИНЫ**

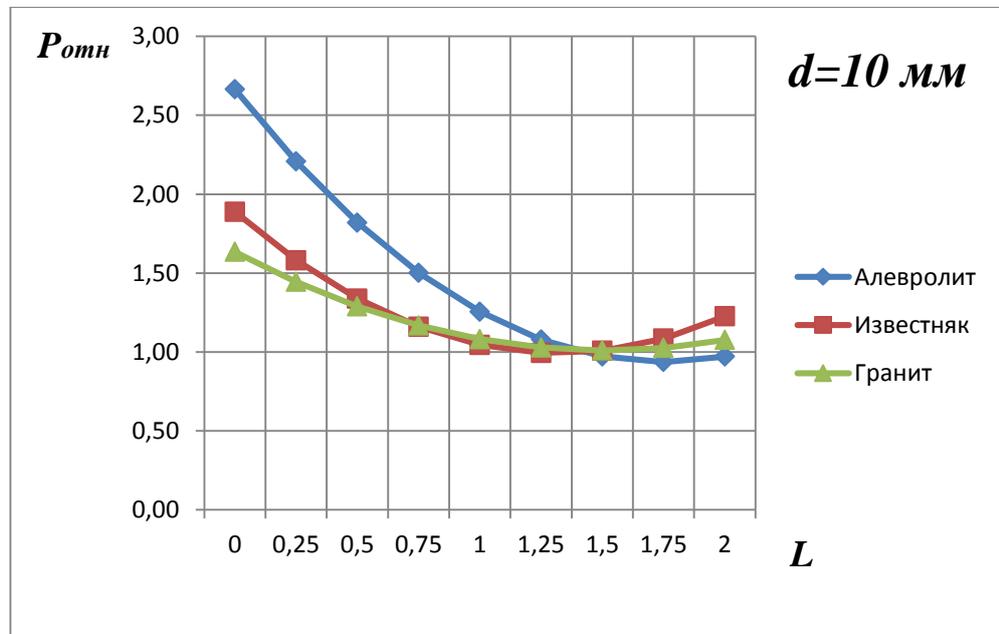
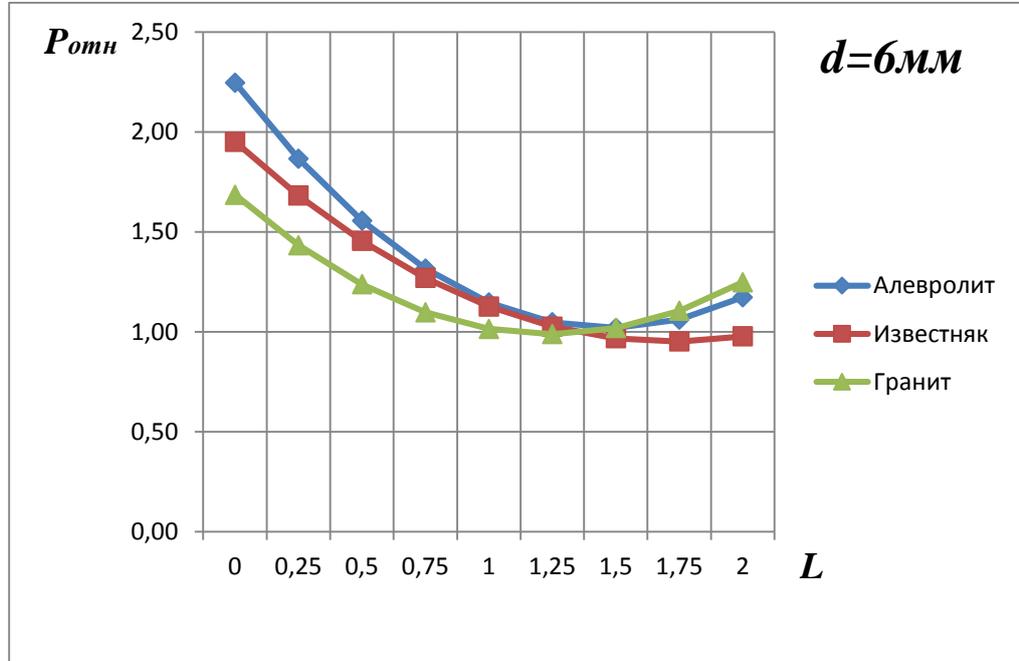


Рисунок 2.4.

При увеличении расстояния от стенки скважины на 1,5 диаметра зубка относительное усилие разрушения горных пород для обоих диаметрах зубков, постепенно снижаясь во всех исследуемых горных породах приближается к единице.

Регрессионный анализ полученных результатов показывает, что закономерности изменения относительного усилия разрушения горных пород при вдавливании зубка на различных расстояниях от стенки скважины характеризуются в виде зависимости параболического типа, которые определяются следующими уравнениями регрессии.

Для мягких пород типа сланцы, алевролиты:

Диаметр зубка $d=6$ мм

$$P_{отн}(L) = 0,563L^2 - 1,512L + 2,247. \quad (2.4.1)$$

Диаметр зубка $d=10$ мм

$$P_{отн}(L) = 0,625L^2 - 1,933L + 2,665. \quad (2.4.2)$$

Для пород средней крепости типа песчаник, мрамор, известняк:

Диаметр зубка $d=6$ мм

$$P_{отн}(L) = 0,337L^2 - 1,087L + 1,951. \quad (2.5.1)$$

Диаметр зубка $d=10$ мм

$$P_{отн}(L) = 0,512L^2 - 1,355L + 1,888. \quad (2.5.2)$$

Для крепких пород типа окварцованный песчаник, гранит, роговик:

Диаметр зубка $d=6$ мм

$$P_{отн}(L) = 0,452L^2 - 1,03L + 1,686. \quad (2.6.1)$$

Диаметр зубка $d=10$ мм

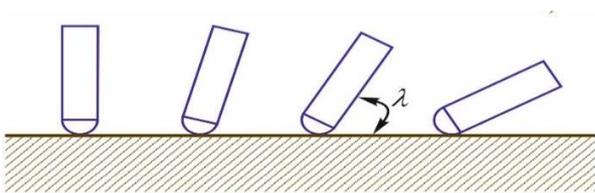
$$P_{отн}(L) = 0,274L^2 - 0,827L + 1,634. \quad (2.6.2)$$

2.3. Исследование закономерностей изменения относительного усилия разрушения горных пород в зависимости от угла атаки зубка шарошки

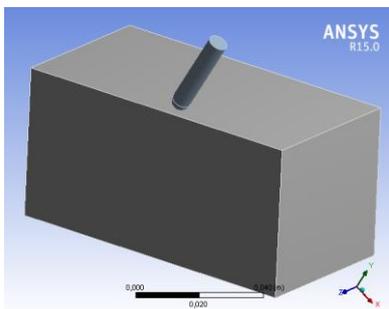
Для исследования закономерности изменения относительного усилия разрушения горных пород в зависимости от угла атаки зубка были созданы следующие математические модели (рисунок 2.5):

- блоки размером 100x50x50 мм.
- зубок диаметром 6 мм и 10 мм высотой 30 мм со сферической головкой.

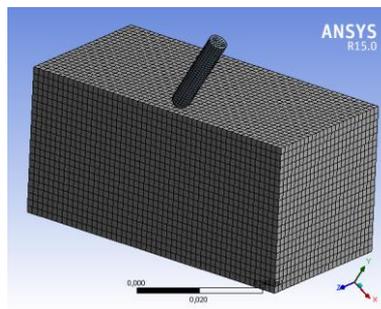
а)



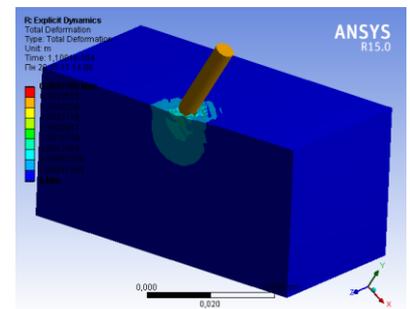
б)



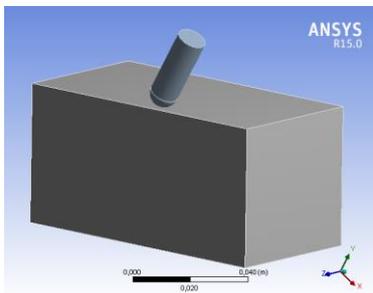
в)



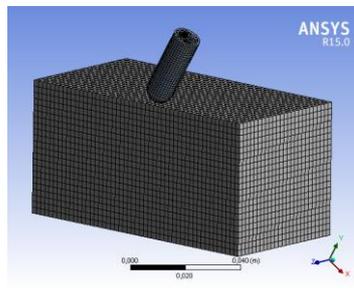
г)



д)



е)



ж)

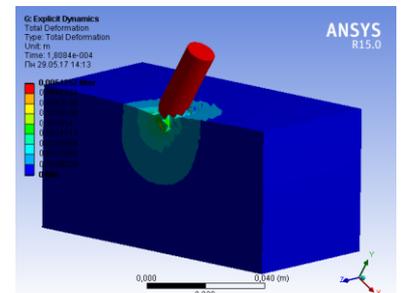


Рисунок 2.5. Угол атаки зубка. а) схема в разрезе; б), в), г) объёмная математическая модель $d=6$ мм; д), е), ж) объёмная математическая модель $d=10$ мм

Закономерность изменения относительного усилия разрушения горных пород в зависимости от угла атаки зубка с диаметром $d=6$ мм.

Таблица 2.4

№	Угол атаки зубка, λ	Алевролиты, $P_{отн}$	Известняки, $P_{отн}$	Граниты, $P_{отн}$
1.	90^0	1	1	1
2.	75^0	0,88	0,90	0,84
3.	60^0	0,78	0,82	0,7
4.	45^0	0,6	0,65	0,47
5.	30^0	0,4	0,45	0,35
6.	15^0	0,28	0,35	0,23
7.	0^0	0	0	0

Закономерность изменения относительного усилия разрушения горных пород в зависимости от угла атаки зубка с диаметром $d=10$ мм

Таблица 2.5

№	Угол атаки зубка, λ	Алевролиты, $P_{отн}$	Известняки, $P_{отн}$	Граниты, $P_{отн}$
1.	90^0	1	1	1
2.	75^0	0,84	0,87	0,79
3.	60^0	0,68	0,75	0,61
4.	45^0	0,53	0,6	0,49
5.	30^0	0,4	0,47	0,36
6.	15^0	0,25	0,3	0,2
7.	0^0	0	0	0

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОГО
УСИЛИЯ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В ЗАВИСИМОСТИ
ОТ УГЛА АТАКИ ЗУБКА**

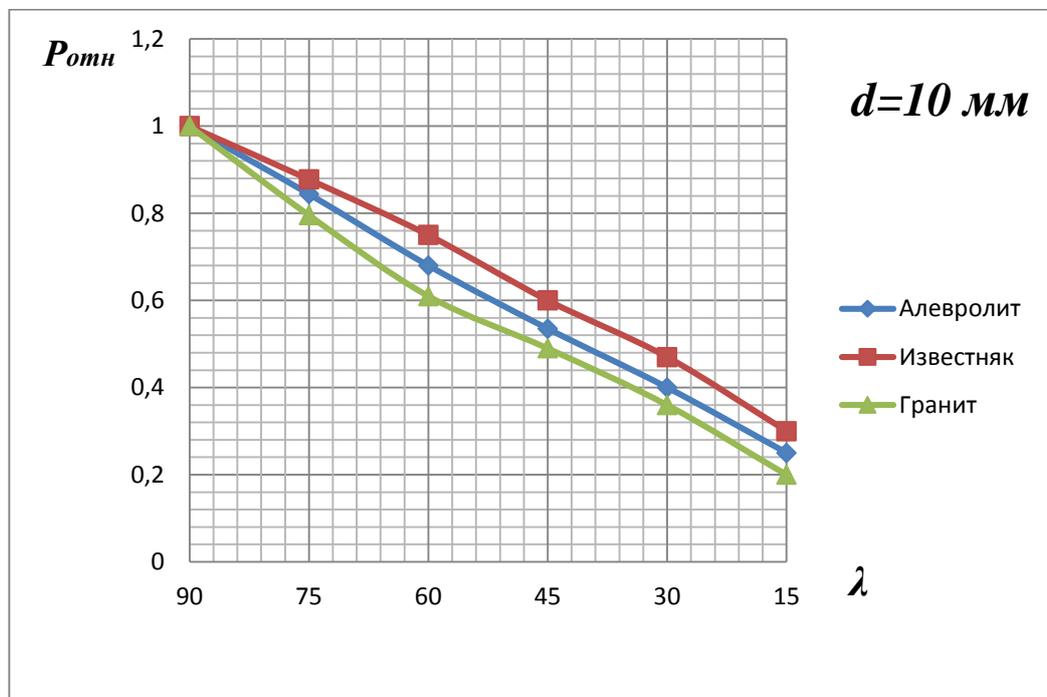
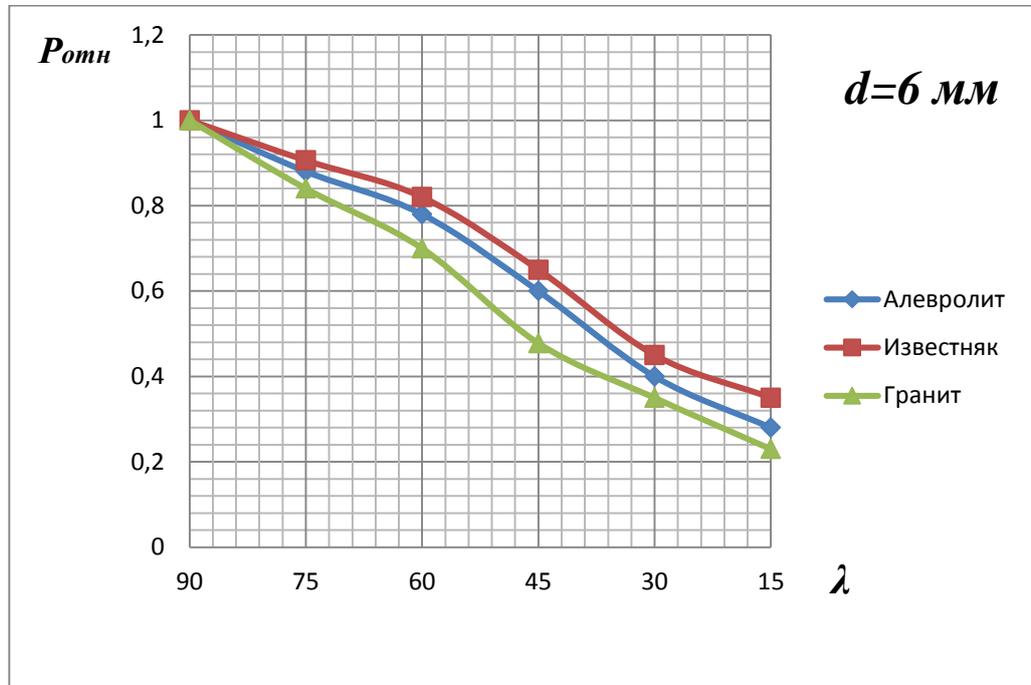


Рисунок 2.6.

На основании результатов, приведенных в таблицах. 2.4 и 2.5, были получены линейные зависимости закономерности изменения относительного усилия разрушения горных пород в зависимости от угла атаки зубков диаметрами 6 мм и 10 мм (рисунок 2.6)

Как видно из данных таблиц и графиков зависимости, относительное усилие разрушения горных пород уменьшается прямо пропорционально с уменьшением угла атаки зубцов. Так при 90° относительное усилие разрушения горных пород равно усилию разрушения на полуплоскости, равной- $P_{ш}$. А при 75° , 60° , 45° , 30° , 15° и 0° относительное усилие разрушения равно, соответственно, для диаметра зубка 6 мм $(0,88 \div 0,9)P_{ш}$, $(0,7 \div 0,82)P_{ш}$, $(0,47 \div 0,65)P_{ш}$, $(0,35, \div 0,45)P_{ш}$, $(0,23 \div 0,35)P_{ш}$, , 0 и для диаметра зубка 10 мм $(0,79 \div 0,87)P_{ш}$, $(0,61 \div 0,75)P_{ш}$, $(0,49 \div 0,6)P_{ш}$, $(0,36, \div 0,47)P_{ш}$, $(0,2 \div 0,3)P_{ш}$, , 0.

Регрессионный анализ результатов показывает, что полученные закономерности изменения относительного усилия разрушения горных пород в зависимости от угла атаки зубка характеризуются следующими уравнениями регрессии.

Для пород средней крепости типа песчаник, мрамор, известняк:

Диаметр зубка $d=6$ мм

$$P_{отн}(\lambda) = 0,091\lambda + 2,172. \quad (2.7.1)$$

Диаметр зубка $d=10$ мм

$$P_{отн}(\lambda) = 0,0092\lambda + 0,178. \quad (2.7.2)$$

Для крепких пород типа окварцованный песчаник, гранит, роговик:

Диаметр зубка $d=6$ мм

$$P_{отн}(\lambda) = 0,105\lambda + 0,454. \quad (2.8.1)$$

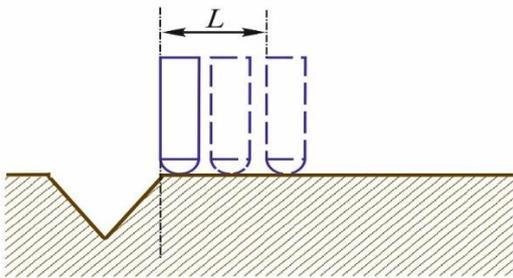
Диаметр зубка $d=10$ мм

$$P_{отн}(\lambda) = 0,103\lambda + 0,332. \quad (2.8.2)$$

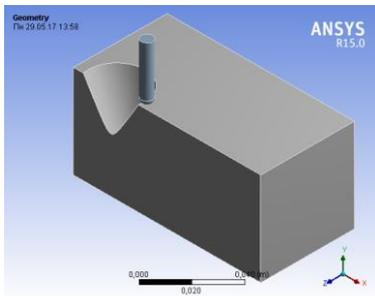
2.4. Исследование закономерностей изменения относительного усилия разрушения горных пород в зависимости расстояния до границы открытой поверхности

Для исследования закономерностей изменения относительного усилия разрушения горных пород в зависимости от расстояния зубка до границы открытой поверхности были созданы следующие математические модели (рисунок 2.7):

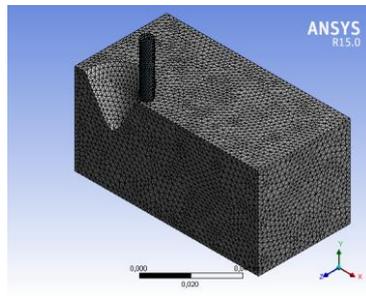
а)



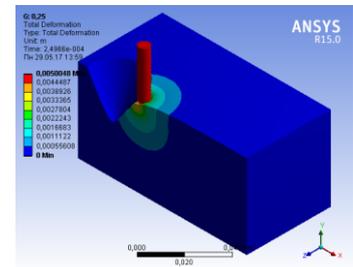
б)



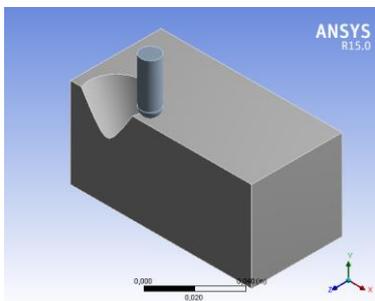
в)



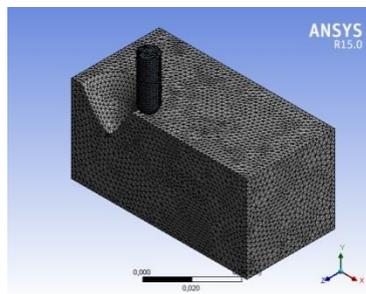
г)



д)



е)



ж)

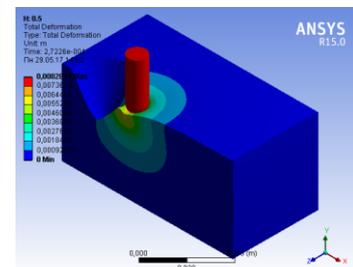


Рисунок 2.7. Вдавливание зубка в зависимости от расстояния до границы открытой поверхности. а) схема в разрезе; б), в), г) объёмная математическая модель $d=6$ мм; д), е), ж) объёмная математическая модель $d=10$ мм

Закономерности изменения относительных усилий разрушения горных пород при вдавливании зубка диаметром $d=6$ мм при различных расстояниях до границы открытой поверхности

Таблица 2.6

№	Расстояние зубка от стенки скважины, L мм	Алевролиты, $P_{отн}$	Известняки, $P_{отн}$	Граниты, $P_{отн}$
1.	0	0,253	0,333	0,386
2.	0,25d	0,280	0,370	0,410
3.	0,5d	0,560	0,662	0,697
4.	0,75d	0,651	0,822	0,890
5.	d	0,769	0,877	0,929
6.	1,25d	0,990	0,988	1,005
7.	1,5d	1,000	1,000	1,000
8.	1,75d	0,985	0,969	0,993
9.	2d	1,002	1,010	1,018

Закономерности изменения относительных усилий разрушения горных пород при вдавливании зубка диаметром $d=10$ мм при различных расстояниях до границы открытой поверхности

Таблица 2.7

№	Расстояние зубка от стенки скважины, L мм	Алевролиты, $P_{отн}$	Известняки, $P_{отн}$	Граниты, $P_{отн}$
1.	0	0,233	0,320	0,251
2.	0,25d	0,288	0,350	0,280
3.	0,5d	0,500	0,527	0,446
4.	0,75d	0,683	0,651	0,649
5.	d	0,780	0,771	0,886
6.	1,25d	0,911	0,893	0,980
7.	1,5d	1,000	1,000	1,000
8.	1,75d	1,010	1,020	1,009
9.	2d	1,015	1,006	0,992

Исследованиями установлено, что относительное усилие разрушения горных пород от расстояния точки вдавливания до границы открытой поверхности на расстоянии, равной $0,25d$, во всех исследованных типах горных пород медленно возрастает в пределах $0,3 \div 0,4$. Увеличение расстояния на $1,5d$ приводит к резкому увеличению относительного усилия разрушения горных пород и приравнению его к усилию на полуплоскости. При дальнейшем увеличении расстояния точки вдавливания (таблицы 2.6 и 2.7) до границы открытой поверхности, относительное усилие разрушения горных пород остается постоянной, графическая зависимость которых приведены на рисунке 2.8.

Регрессионный анализ результатов показывает, что полученные закономерности изменения относительного усилия разрушения горных пород в зависимости от расстояния границы открытой поверхности характеризуются следующими уравнениями регрессии.

Для мягких пород типа сланцы, алевролиты:

Диаметр зубка $d=6$ мм

$$P_{отн}(L) = -0,203L^2 + 0,829L + 0,180. \quad (2.9.1)$$

Диаметр зубка $d=10$ мм

$$P_{отн}(L) = -0,184L^2 + 0,804L + 0,1750. \quad (2.9.2)$$

Для пород средней крепости типа песчаник, мрамор, известняк:

Диаметр зубка $d=6$ мм

$$P_{отн}(L) = -0,253L^2 + 0,864L + 0,276. \quad (2.10.1)$$

Диаметр зубка $d=10$ мм

$$P_{отн}(L) = -0,123L^2 + 0,644L + 0,257. \quad (2.10.2)$$

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОГО УСИЛИЯ
РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В ЗАВИСИМОСТИ ОТ
РАССТОЯНИЯ ДО ГРАНИЦЫ ОТКРЫТОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

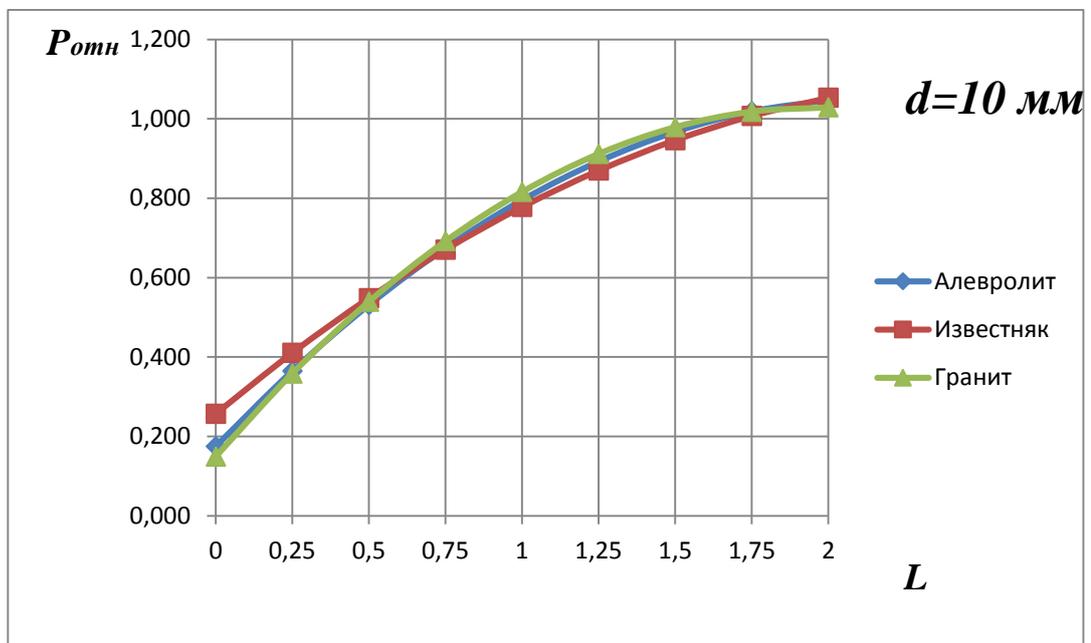
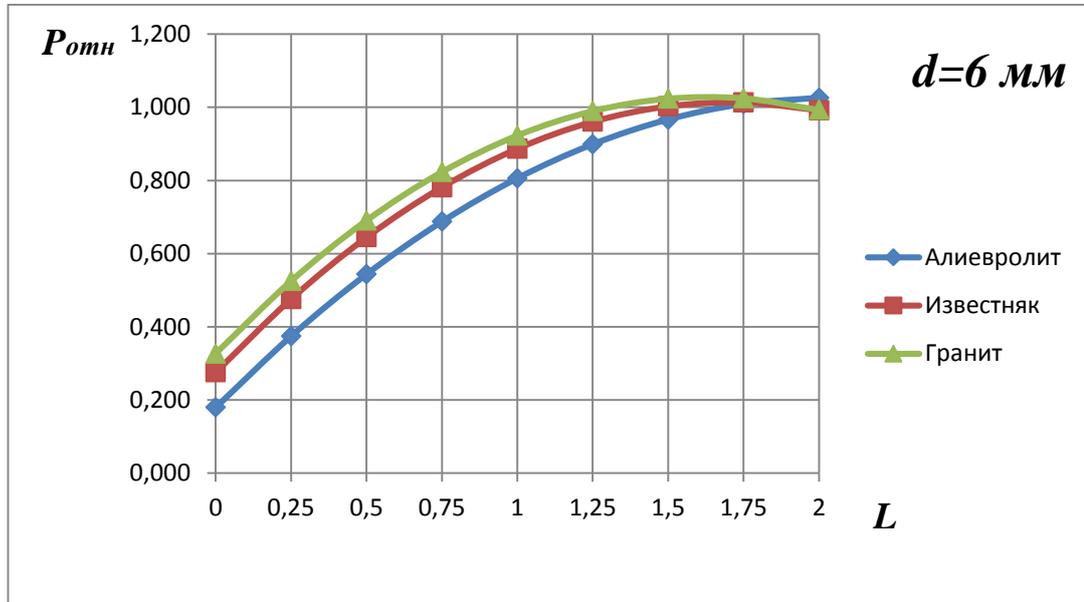


Рисунок 2.8.

Таблица 2.8

№	Наименование пород	Плотность, кг/м ³	Оптимальное расстояние от точки вдавливания зубка до контура стенки скважины, L, мм	Оптимальное расстояние от зубка до границы лунки разрушения горных пород, в, мм	Оптимальный угол атаки зубка в поверхности забоя скважины, γ, град
ДИМЕТР ЗУБКА 6 мм					
1.	Сланцы, алевролиты	1800÷2200	(0,6÷1,2)d	(1,0÷2,0)d	(60 ⁰ ÷90 ⁰)
2.	Песчаники, мраморы, известняки	2400÷2500	(0,5÷1)d	(0,6÷1,0)d	(75 ⁰ ÷90 ⁰)
3.	Песчаники окварцованные, граниты, роговики	2600÷2700	(0,3÷0,6)d	(0,5÷1,0)d	(80 ⁰ ÷90 ⁰)
ДИМЕТР ЗУБКА 10 мм					
1.	Сланцы, алевролиты	1800÷2200	(0,7÷1,5)d	(1,0÷2,0)d	(60 ⁰ ÷90 ⁰)
2.	Песчаники, мраморы, известняки	2400÷2500	(0,5÷1,2)d	(0,6÷1,0)d	(75 ⁰ ÷90 ⁰)
3.	Песчаники окварцованные, граниты, роговики	2600÷2700	(0,3÷0,75)d	(0,5÷1,0)d	(80 ⁰ ÷90 ⁰)

Для крепких пород типа окварцованный песчаник, гранит, роговик:

Диаметр зубка $d=6$ мм

$$P_{\text{отн}}(L)=-0,263L^2+0,859L+0,327. \quad (2.11.1)$$

Диаметр зубка $d=10$ мм

$$P_{\text{отн}}(L)=-0,227L^2+0,894L+0,149. \quad (2.12.2)$$

Результаты исследований по определению оптимальных параметров расположения зубков ОД в условиях забоя скважины в различных горных породах приведены в таблице 2.8.

Основные выводы по главе 2

1. Программный комплекс ANSYS Workbench позволил создать математическую модель совокупности геометрических, физических и конечно-элементных моделей горной породы, скважины и зубка, а также имитировать работу зубка на забое скважины для определения параметров разрушения горной породы не проводя практические эксперименты.

2. Анализ полученных результатов вдавливания зубков в зависимости от места расположения на забое скважины позволили объяснить почему зубки работающие в угловой области забоя скважины быстро изнашиваются и ломаются, по сравнению расположенными близко к оси скважины.

3. Исследования изменения относительных усилий разрушения горных пород при вдавливании рабочих органов долота в зависимости от места расположения зубка на забое скважины, геометрических форм забоя, расстояния границы открытой поверхности, образованной от предыдущего вдавливания зубка и угла атаки зубка выполненные по изложенной методике, позволяют определить оптимальные параметры расположения зубка долота относительно поверхности забоя для горных пород различной твердости.

4. Сферическая форма забоя скважины, образуемая рабочими органами одношарошечными долотами, является оптимальной геометрической формой забоя при минимальных затратах энергии.

5. Конструкции одношарошечных долот, учитывающие изменения усилий разрушения горных пород в зависимости от расположения зубка на поверхности забоя скважины, позволяют бурить геологоразведочные скважины в широком диапазоне по твердости и перемежаемости горных пород.

3. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ БУРОВЫХ ДОЛОТ В ОДНОШАРОШЕЧНОМ ИСПОЛНЕНИИ

3.1. Общая постановка вопроса

Конструкции ОД имеют неоспоримые преимущества по технологии их изготовления, по облегченным условиям разрушения горной породы на забое скважины. Первое обусловлено наличием только одной опоры – с повышенным потенциалом ее запаса прочности, а второе – сферическими поверхностями забоя.

С другой стороны, чрезмерный опережающий износ рабочих выступов (зубков) на вершинных венцах, значительная удаленность корпуса долота с промывочным каналом от поверхности забоя ограничивают, соответственно износостойкость и механическую скорость бурения [13,46, 50,88].

Традиционные методы устранения этих недостатков в форме ступенчатости сферических шарошек путем подводки промывочной жидкости через цапфу пока только определили стратегию совершенствования одношарошечных долот. В общем виде, решение этих задач пока не найдены и, следовательно, потенциал одношарошечных долот далеко еще не исчерпан.

Заметим при этом, что здесь поставлены две задачи по оптимизации конструкций одношарошечных долот. Причем оптимизационные решения этих задач не зависят друг от друга, т.е. положительные эффекты от их решений будут складываться.

Поэтому обратимся к более конкретной задаче оптимизации процесса разрушения горной породы зубками одношарошечных долот, т.е. к оптимизации динамики вооружения одношарошечных долот на забое скважины.

На энергетическом уровне аналогами критериев оптимизации при решении таких задач в области породоразрушающих буровых инструментов могут являться удельная контактная и удельная объемная работы разрушения.

Математически они представляются следующим образом [24]:

$$A_s = \frac{A_{об}}{S}, \quad (3.1)$$

где A_s - удельная контактная работа разрушения, Н/м ;

$A_{об}$ - общая работа, затраченная на деформацию и разрушение породы при вдавливании штампа, Н·м;

S - площадь плоского основания цилиндрического штампа, м².

$$A_v = \frac{A_{об}}{V}, \quad (3.2)$$

где A_v - удельная объемная работа разрушения, Н/м²; $A_{об}$ - общая работа, затраченная на деформацию и разрушение породы при вдавливании штампа, Н·м; V - объем деформированной породы, м³.

Удельная контактная и удельная объемная работы разрушения соответственно в формах (3.1) и (3.2) являются объективными энергетическими критериями при статическом разрушении горной породы под штампом.

Поэтому они пригодны только для изучения физико-механических свойств горных пород.

Критерии в форме (3.1) и (3.2), будучи энергетическими критериями физико-механических свойств горных пород при их статическом разрушении, явились объективными прототипами критериев оценки работоспособности буровых долот [72, 73, 80, 92].

Для объяснения этого положения обратимся к классической формуле стоимости метра проходки формуле (1.1).

Очевидно, долото, которое покажет меньшую величину C , и будет лучше в заданных геолого-технических условиях.

Для того, чтобы оценить эффективность бурового долота, не производя им бурение, т.е. оценить его экономическую эффективность необходимо знать заранее величины T_2 (время чистого бурения) и H (проходка на долото).

Абсолютные значения T_2 и H спрогнозировать невозможно.

Для построения же их относительных величин в виде расчетных формул необходимо исходить из следующих предпосылок.

1. Время механического бурения ограничивается износостойкостью вооружения (зубков) шарошек на забое скважины.

2. Интенсивность износа каждого зубка шарошки прямо пропорциональна пути контакта

3. Разрушение горной породы на кольцевом забое скважины будет тем интенсивнее, чем больше будет затрачена на этом кольцевом забое работа, совершаемой на путях контакта зубков соответствующих венцов.

4. Величины T_2 и H связаны формулой

$$H = V_m T_2, \quad (3.3)$$

где V_m - механическая скорость бурения, м/час.

С целью эффективного решения оптимизационных задач при проектировании новых и совершенствования существующих конструкций буровых долот еще на стадии эскизных проектов необходимо иметь следующие их технологические критерии оценки работоспособности.

1. Относительную удельную контактную работу разрушению горной породы в форме [13, 85, 87, 92, 93]

$$A'_j = \frac{i \cdot S_j \cdot F_j}{\Delta S_j}, \quad (3.4)$$

где S_j - пути контакта зубка единичной площади j -го условного венца при одноактовом входе в контакт с забоем скважины, м; F_j - сила сопротивления движению зубков единичной площади j -го условного венца в контакте с породой на забое скважины, Н; ΔS_j - контактная площадка вершины зубка j -го венца шарошки единичной длины и ширины, м².

2. Относительную удельную объемную работу разрушения горной породы в форме:

$$A''_k = \frac{i \sum_{j=1}^n S_{j,k} \cdot F_j \cdot Z_j \cdot d_j}{V_k}, \quad (3.5)$$

где $S_{j,k}$ - путь контакта зубков единичной ширины j -го венца на k -ом кольцевом забое скважины, м; Z_j - количество зубков на j -м венце, шт.; d_j - количество единичной площади зубков j -го венца, шт.; V_k - объем породы k -го кольцевого забоя скважины, приходящийся на разрушение зубками единичной ширины j -ых венцов, м³;

Учитывая формулу (1.1), экономический критерий (3.3) запишется в форме

$$C = \frac{C_1 \left(T_1 + \frac{1}{A'_{\max}} + T_3 \right) + C_3}{\frac{1}{A'_{\max}} \cdot A''_{\min}}. \quad (3.6)$$

Формула (3.6) записана с учетом следующих допущений:

1. Абразивная стойкость долота по вооружению T_2 обратно пропорциональна относительной удельной контактной работе разрушения A'_{\max} .

2. Механическая скорость бурения V_m ограничена минимальной величиной относительной удельной объемной работы разрушения A''_{\min} .

Сила сопротивления движению зубков шарошек в контакте с породой F принята постоянной и в расчетах .

Заметим, что формула (3.7) здесь выведена с целью доказательства объективности технологических критериев в форме (3.4) и (3.5) и с целью доказательства возможности целенаправленного совершенствования схем размещения вооружения на одношарошечных долотах уже на стадии проектирования путем сравнительного анализа их для базовой и вновь создаваемой конструкции.

Как видно, аналитические структуры технологических критериев оценки работоспособности одношарошечных долот в форме (3.4) и (3.5) содержат параметры S_j , $S_{j,k}$, для вычисления которых необходимо было разработать специальную математическую модель.

Отметим здесь, что параметры S_j и $S_{j,k}$ отличаются тем, что S_j - это полный путь контакта зубка шарошки за один акт взаимодействия с поверхностью забоя скважины, а $S_{j,k}$ - часть этого пути, вычисленная для заданного кольцевого забоя скважины.

3.2. Динамика вооружения одношарошечных долот

С целью получения расчетных формул для вычисления технологических критериев работоспособности одношарошечных долот необходимо было провести поэтапно следующие работы [83, 93].

Построить двухпараметрические уравнения траекторий движения вершины зубка шарошки в форме [12, 49, 84]

$$\left. \begin{aligned} x &= x(\Gamma, \varphi, \psi) \\ y &= y(\Gamma, \varphi, \psi) \\ z &= z(\Gamma, \varphi, \psi) \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

где Γ - совокупность геометрических параметров, а φ и ψ углы поворота, соответственно, долота и шарошки вокруг своих осей.

2. Свести двухпараметрические уравнения в форме (3.8) к однопараметрическим, т.е. найти

$$\left. \begin{aligned} x &= x(\Gamma, i, \psi) \\ y &= y(\Gamma, i, \psi) \\ z &= z(\Gamma, i, \psi) \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

Передаточное отношение шарошки i , определяющее сколько оборотов сделает шарошка вокруг своей оси за один оборот долота, можно определить экспериментально на соответствующем стенде или вычислить с помощью специальной методики, физическая сущность которой будет изложена ниже.

3. Составить формулу вычисления скорости движения вершинной точки зубка шарошки в форме функции от параметра ψ , т.е.

$$V(\psi) = \sqrt{\left(\frac{dx}{d\psi}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\psi}\right)^2 + \left(\frac{dz}{d\psi}\right)^2}. \quad (3.10)$$

4. Составить интеграл вычисления пути траектории зуба, приходящейся на контакт с поверхностью забоя скважины

$$S = 2 \int_{\psi_0}^{\psi_1} V(\psi) d\psi. \quad (3.11)$$

5. Разработать методику вычисления передаточного отношения шарошки, исходя из принципа наименьшего действия. Основоположителем же этого принципа был Мопертюи (1744 год) со следующей формулировкой: «Для действительного движения частицы интеграл от $v ds$, взятый по отрезку траектории между двумя какими-либо ее точками, есть минимум по сравнению с такими же интегралами, взятыми по отрезкам других кривых, проведенными между теми же точками» [71].

Интеграл $\int v ds$, где v – скорость частицы, Мопертюи назвал «действием», а сам принцип – принципом наименьшего действия.

$$\sum_{j=1}^{m-1} A_j = \sum_{j=m+1}^n A_j \quad (m < n), \quad (3.12)$$

Где A_j – работы совершаемые зубками шарошек на j венцах шарошки за один оборот вокруг своей оси; m – номер венца чистого качения.

6. Разработать аналитические структуры объективных технологических критериев оценки работоспособности ОД в форме (3.5) и (3.6).

Ниже рассмотрим каждый из этих этапов более детально.

3.3 Уравнения траекторий движения зубков одношарошечных долот

Пусть венец радиусом r шарошки будет перекатываться по окружности радиусом R на забое скважины (рисунок 3.1).

Тогда двупараметрическое уравнение траектории движения вершины зуба этого венца запишется в форме [19, 21, 58]:

$$\left. \begin{aligned} x &= R \sin \varphi - r \sin \psi \cos \varphi - r(1 - \cos \psi) \sin \varphi \cos \alpha, \\ y &= R \cos \varphi + r \sin \psi \sin \varphi - r(1 - \cos \psi) \cos \varphi \cos \alpha, \\ z &= r(1 - \cos \psi) \sin \alpha; \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

где R - радиус окружности на забое скважины, по которой перекатывается венец, м;

r - радиус венца, м;

α - угол наклона плоскости венца к плоскости поперечного сечения скважины, рад.;

φ - угол поворота долота вокруг своей оси, рад.

ψ - угол поворота шарошки вокруг своей оси, рад.

Параметрическое уравнение в форме (3.13) представляет собой циклоидальную кривую в пространстве - сферическую циклоиду.

Все точки этой кривой находятся на сфере, центр которой определяется точкой пересечения оси венца с осью OZ ,

Допущение. Вращение венца вокруг своей оси и оси долота принимаются равномерными, вертикальные колебания за счет зубчатости венца не учитываются.

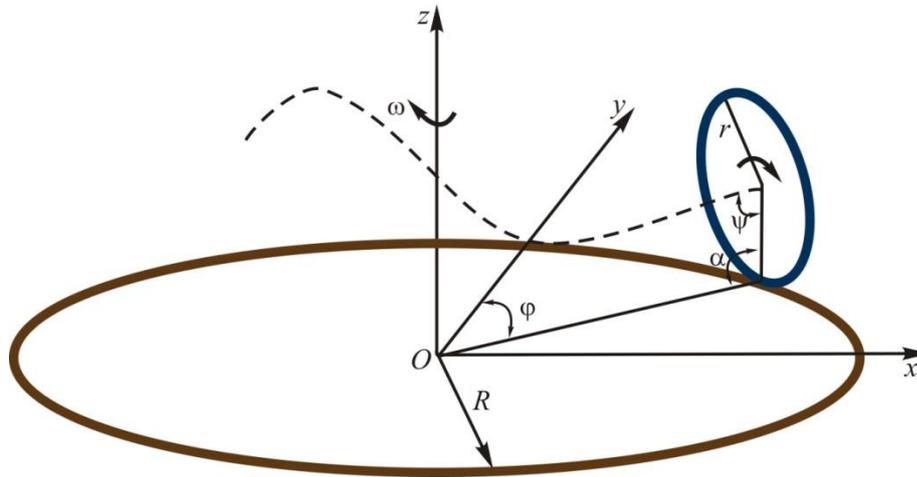


Рисунок 3.1. Схема к построению параметрических уравнений траекторий движения зубков одношарошечных долот в пространстве

С целью использования параметрических уравнений траектории движения в форме (3.13), при вычислении кинематических характеристик, их необходимо преобразовать в однопараметрические. Осуществляется это через передаточное отношение шарошки $i = \frac{\psi}{\varphi}$. Используя подстановку $\varphi = \frac{\psi}{i}$ в (3.13), найдем

$$\left. \begin{aligned} x &= R \sin \frac{\psi}{i} - r \sin \psi \cos \frac{\psi}{i} - r(1 - \cos \psi) \sin \frac{\psi}{i} \cos \alpha, \\ y &= R \cos \frac{\psi}{i} + r \sin \psi \sin \frac{\psi}{i} - r(1 - \cos \psi) \cos \frac{\psi}{i} \cos \alpha, \\ z &= r(1 - \cos \psi) \sin \alpha; \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

где R, r, α, i – постоянные параметры, а ψ параметр переменный.

Теперь параметрическое уравнение в формуле (3.14) можно дифференцировать по параметру ψ и вычислять по известным формулам теоретической механики все кинематические характеристики [17,18].

3.4. Определение скорости движения вершины зубка одношарошечного долота

Для определения скорости движения зубка шарошки нам будет необходима интегрирования путей контакта их с поверхностью забоя скважины. Поэтому ее удобнее представить в форме функции от параметра ψ .

Найдем ее по известной формуле теоретической механики [17,18]:

$$V(\psi) = \sqrt{\left(\frac{dx}{d\psi}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\psi}\right)^2 + \left(\frac{dz}{d\psi}\right)^2}. \quad (3.15)$$

Она имеет вид

$$V_j(\psi) = \sqrt{A_j + B_j \cos \psi + C_j \cos^2 \psi}, \quad (3.16)$$

где

$$\begin{aligned} A_j &= \frac{1}{i^2} \left[(R_j - r_j \cos \alpha)^2 + r_j^2 (i^2 + 1 - 2i \cos \alpha) \right] \\ B_j &= \frac{2r_j}{i^2} (R_j - r_j \cos \alpha) (\cos \alpha - i), \\ C_j &= \frac{2}{i^2} r_j^2 \sin^2 \alpha. \end{aligned}$$

Здесь индекс j указывает, что вычисляется скорость зубков j -го венца шарошки.

3.5. Определение пути контакта зубка венца одношарошечного долота на сферическом забое скважины

Эта формула находится по известной формуле теоретической механики [17,18].

$$S_j = \int_{\psi_0}^{\psi_1} V_j(\psi) d\psi. \quad (3.17)$$

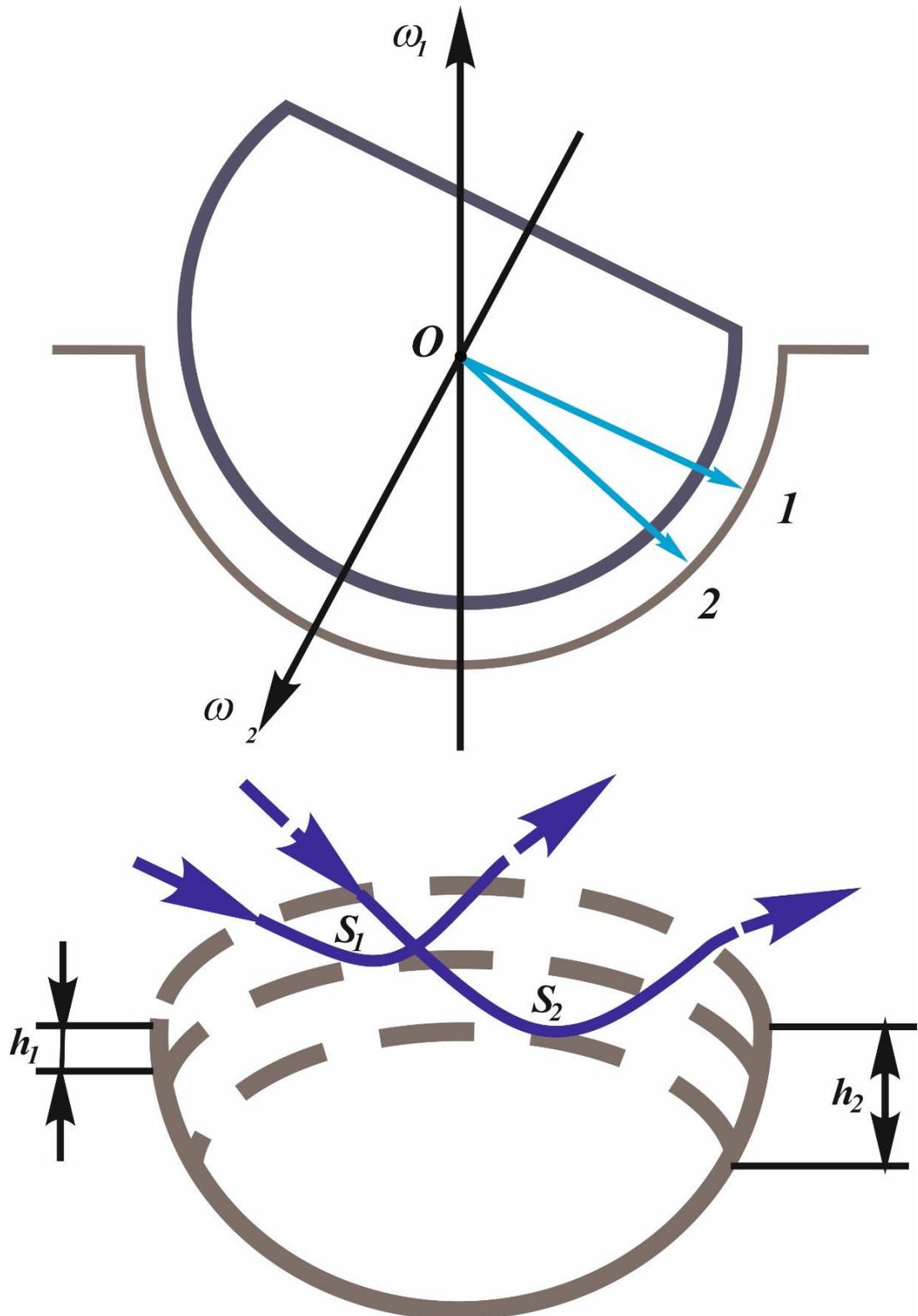


Рисунок 3.2. Схема представления путей контакта зубков одношарошечных долот на сферических поясах забоя скважины

Искомая формула имеет вид

$$S_j = 2 \int_0^{\psi_1} \sqrt{A_j + B_j \cos \psi + C_j \cos^2 \psi} d\psi, \quad (3.18)$$

где

$$A_j = \frac{1}{i^2} \left[(R_j - r_j \cos \alpha)^2 + r_j^2 (i^2 + 1 - 2i \cos \alpha) \right]$$

$$B_j = \frac{2r_j}{i^2} (R_j - r_j \cos \alpha) (\cos \alpha - i),$$

$$C_j = \frac{2}{i^2} r_j^2 \sin^2 \alpha.$$

Здесь интеграл удвоен потому, что мы находим величину только одной из ветвей циклоиды, исходящих из нижней точки траекторий (рисунок 3.2).

Предел интегрирования легко находится при подстановке глубины погружения j -го венца в сферический забой скважины h_j в третье уравнение системы (3.14).

Поэтому имеем

$$\psi_1 = \arccos \left(1 - \frac{h_j}{r_j \sin \alpha} \right), \quad (3.19)$$

$$\psi_0 = 0.$$

3.6. Методика вычисления передаточного отношения одношарошечного долота

Передаточное отношение шарошки является одним из параметров в формуле вычисления пути контакта (3.18). Поэтому с целью оперативного

анализа динамики одношарошечных долот, необходимо разработать методику его вычисления.

Вычисление передаточного отношения шарошки осуществляется исходя из условия равенства контактных работ, совершаемых – положительно и отрицательно – проскальзывающими венцами. Вычисленные значения передаточных отношений, исходя из этого условия, показали хорошую сходимость с данными экспериментов.

Условие это записывается в форме (рисунок 3.3)

$$\sum_{j=1}^{m-1} A_j = \sum_{j=m+1}^n A_j \quad (m < n), \quad (3.20)$$

где $A_j = S_j \cdot F_j \cdot Z_j \cdot d_j$ – работа, совершаемая против сил трения зубками венцов шарошек единичной ширины за один ее оборот вокруг своей оси, Н·м;

F_j – сила сопротивления движению зубков в контакте с породой на поверхности забоя скважины (в расчетах принимается постоянной величиной, равной 1), Н;

Z_j – количество зубков на j -ом венце, шт.;

d_j – количество единичной площади зубков j -го венца, шт.;

n – количество венцов на шарошке, шт.

Выполнение условия (3.20) при вычислениях достигается методом последовательных приближений.

Поскольку передаточное отношение шарошки представляется еще и через отношение радиуса венца чистого качения r_0 и радиуса окружности на забое скважины, по которому он перекачивается R_0 , в форме

$$\frac{R_0}{r_0} = i = \frac{\psi}{\varphi} \quad (3.21)$$

то на первом шаге вычислений принимается $R_1 = R_0$, $r_1 = r_0$.

По этому передаточному отношению $i = \frac{R_1}{r_1}$ вычисляются пути контакта и составляется условие (3.20). Если оно не выполняется, то за венец чистого

качения принимается следующий, т.е. $i_1 = \frac{R_1}{r_1}$ и вновь составляется условие

(3.20). И так до тех пор, пока это условие будет выполнено с требуемой точностью.

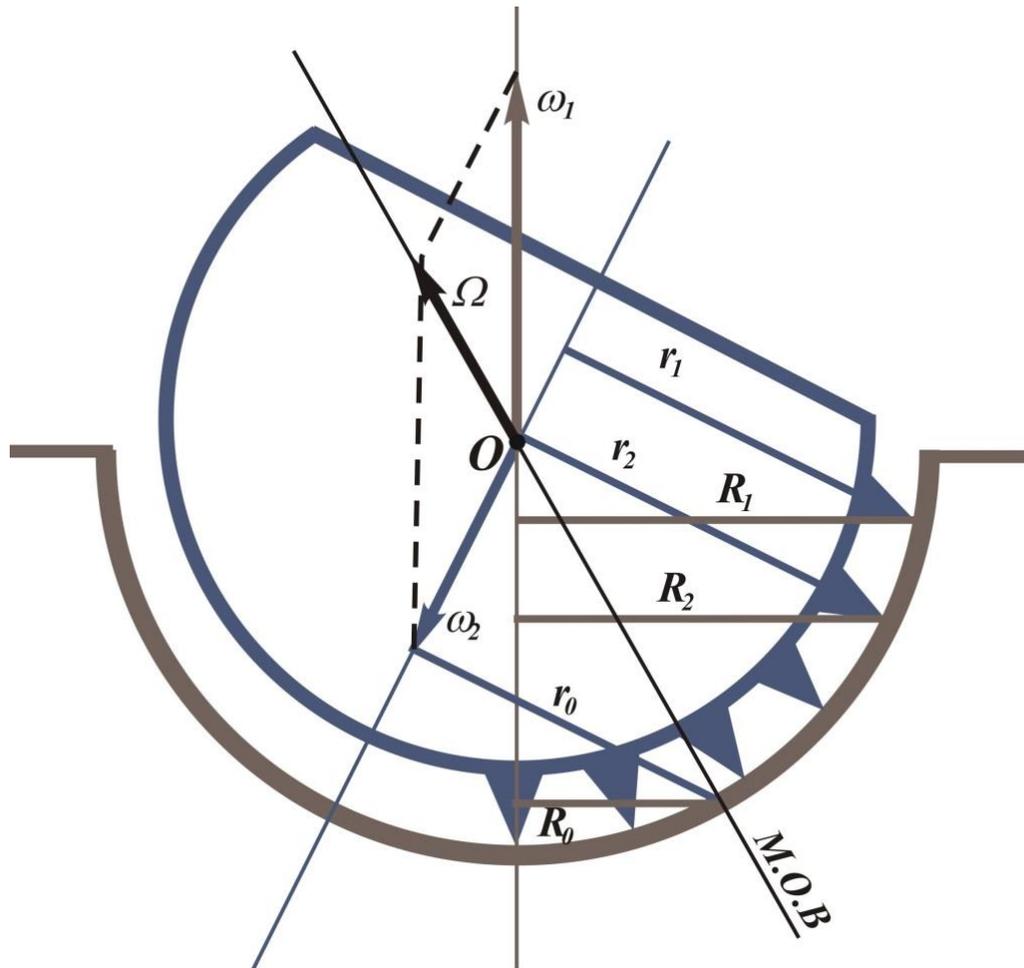


Рисунок 3.3. Схема к определению передаточных отношений шарошек

Примечания.

1. Счет венцов шарошки принят от периферийных к вершинным.
2. С целью более точного вычисления передаточного отношения, венец чистого качения может быть условным и определен между двумя реальными венцами.

3.7. Технологические критерии оценки работоспособности одношарошечных долот

Дополнительный анализ критериев оценки работоспособности буровых одношарошечных долот нам необходим с целью освещения следующих вопросов.

1. Почему потребовалось строить новые аналитические формулы для критериев оценки работоспособности одношарошечных долот?

2. Чем отличаются критерии в форме (3.1) и (3.2) от критериев в форме (3.5) и (3.6)?

3. Каковы возможности критериев оценки работоспособности буровых долот в форме (3.5) и (3.6) при решении оптимизационных задач?

Итак мы имеем:

- удельную контактную работу разрушения в виде (1.14)
- удельную объемную работу разрушения в виде (1.15)
- относительную удельную контактную работу разрушения зубков j -го венца

$$A_j' = \frac{iS_j F_j}{\Delta S_j}; \quad (3.22)$$

- относительную удельную объемную работу разрушения зубков j -ых венцов на k -ом кольцевом забое скважины

$$A_k'' = \frac{i \sum_{j=1}^n S_{j,k} F_j Z_j d_j}{V_k}. \quad (3.23)$$

Отвечая на первый вопрос, следует иметь в виду то, что критерии в форме (3.1) и (3.2) пригодны только для вычисления абсолютных величин удельных контактных и объемных работ разрушения по экспериментальным данным, полученным при статическом вдавливании штампов. Эти критерии оценивают энергию деформации и разрушения горной породы и, следовательно, к потенциальным энергетическим возможностям буровых долот имеют лишь косвенное отношение.

Действительно, в процессе взаимодействия зубков шарошек невозможно заранее знать с какой конкретно породой они контактируют, в каких условиях (облегченных или стесненных) этот контакт осуществляется, как распределяется энергия долота от внешних нагрузок по зубкам соответствующих венцов шарошек, и какова, наконец, динамика взаимодействия зубьев шарошек с поверхностью забоя скважины.

Учитывая это, нами и были построены технологические критерии оценки работоспособности одношарошечных долот в форме (3.5) и (3.6).

Вычислив их и подставив в формулу стоимости метра проходки (3.7), мы получим некоторое относительное значение потому, что в критериях (3.5) и (3.6) не учтены коэффициент абразивности и реальный объем разрушенной породы в формуле (3.6). Поэтому эти критерии являются относительными. Их можно использовать только при сравнительном анализе работоспособности буровых долот.

Зная теперь физическую сущность критериев (3.5) и (3.6), и имея их расчетные данные по двум конструкциям одношарошечных долот заданного диаметра, можно сказать: какая из них предпочтительнее по износостойкости долота по вооружению и по механической скорости бурения в заданных геолого-технических условиях.

Естественно, предпочтительнее будет та конструкция одношарошечного долота, у которой будет A'_{\max} меньше, а A''_{\min} больше. При этом наше утверждение будет верно при прочих равных условиях, т.е. при

бурении в одних и тех же породах и при соблюдении идентичных параметров режима бурения.

Необходимо было учесть также и то, что передаточные отношения шарошек при изменении конструкции долот могут изменяться.

С этой целью технологические критерии были отнесены к одной единице времени (одному обороту долота), что обеспечивается умножением этих критериев на i .

Учитывая и то, что критерии вычисляются дифференцированно для зубков каждого венца единичной ширины и для каждого кольцевого забоя скважины с заданными параметрами по ширине и толщине, представляется возможным проводить сравнительный анализ эффективности работы каждого венца шарошки.

Поэтому расчетные формулы критериев оценки работоспособности буровых одношарошечных долот окончательно будут иметь вид [13, 19, 50]

$$A_j' = \frac{S_j F_j i}{\Delta S_j}, \quad (3.24)$$

$$A_k'' = \frac{\sum_{j=1}^n S_{j,k} F_j Z_j d_j i}{V_k}, \quad (3.25)$$

где A_j - относительная удельная контактная работа разрушения зубков j -го венца, Н/м;

S_j - путь контакта зубков j -го венца за один акт взаимодействия их с поверхностью забоя скважины, м (рисунок 3.4);

F_j - сила сопротивления движению зубков j -го венца в контакте с поверхностью забоя скважины, Н;

i - передаточное отношение шарошки;

ΔS_j - контактная площадка вершины зубка j -го венца шарошки единичной длины и ширины, м²;

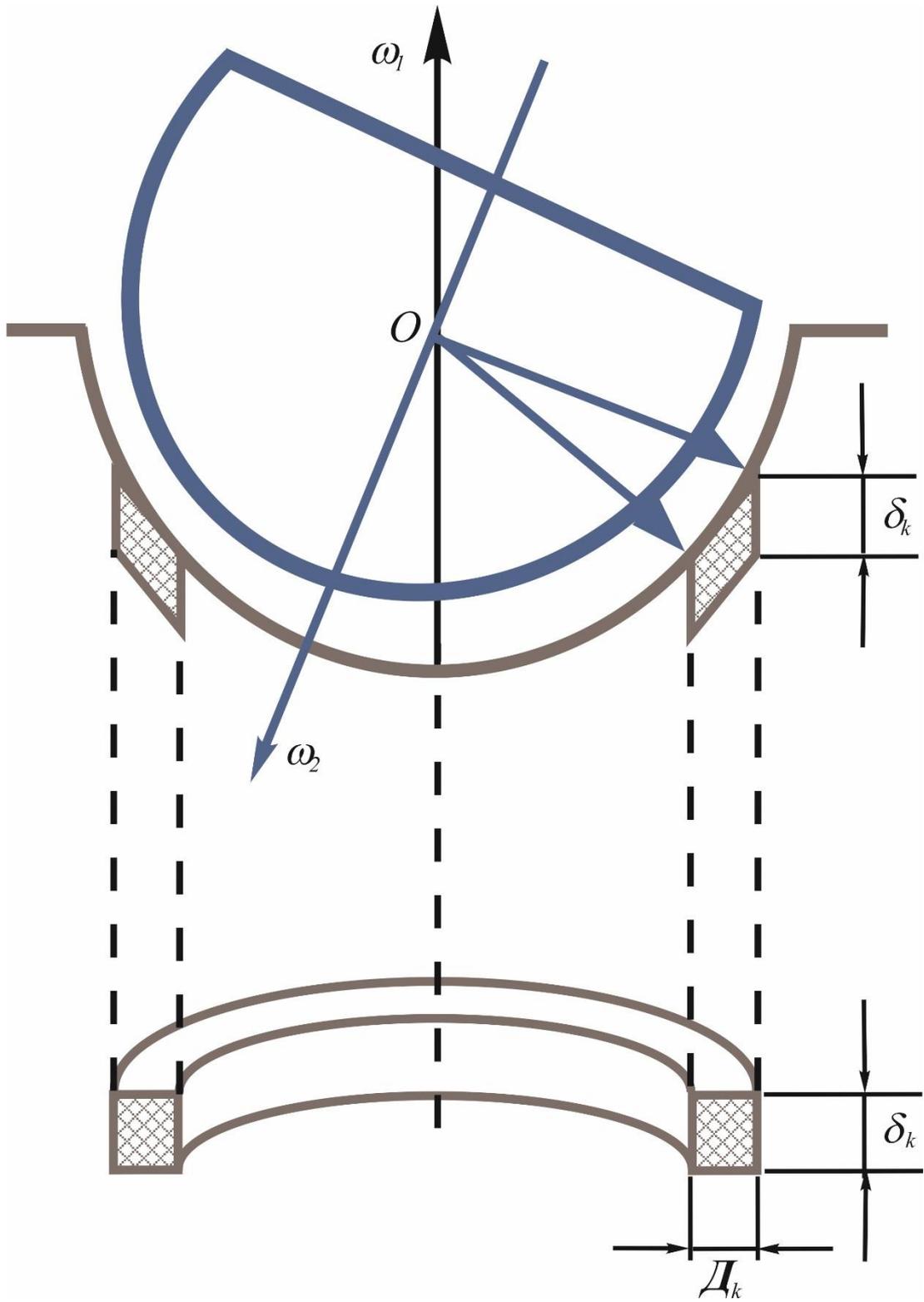


Рисунок 3.4. Схема объемов породы на кольцевых забоях скважины, приходящихся на разрушение

A''_k - относительная удельная объемная работа разрушения зубков j -го венца на k -ом кольцевом забое скважины, Н/м²;

$S_{j,k}$ - путь контакта зубков j -ых венцов на k -ых кольцевых забоях скважины, м;

Z_j - количество зубков на j -ом венце, шт.;

d_j - количество условных венцов единичной ширины на i -ом реальном венце, шт.;

$V_k=2\pi R_k D_k \delta_k$ - объем породы k -го кольцевого забоя скважины толщиной δ , приходящейся на разрушение, м² (рисунок 3.4);

R_k - средний радиус k -го кольцевого забоя скважины, м;

D_k - ширина k -го кольцевого забоя скважины, м;

δ_k - заданная толщина (глубина) k -го кольцевого забоя скважины, м.

С целью наглядного представления о местоположения венца чистого качения (положения мгновенной оси вращения шарошки) необходимо выводить на печать значения скоростей движения вершин зубков j -ых венцов в их нижнем положении по формуле (3.18) при $\psi=0$.

Абсолютные же скорости движений зубков этих венцов вычисляются по формуле (3.16).

Примечание. При вычислении критериев (3.24) и (3.25) принято $F_j=1$, $\Delta S_j=1$.

$$V_j(t) = \frac{\pi n}{30} \sqrt{A_j + B_j \cos t + C_j \cos^2 t}, \quad (3.26)$$

где

$$A_j = \frac{1}{i^2} (R_j - r_j \cos \alpha)^2 + r_j^2 (i^2 + 1 - 2i \cos \alpha),$$

$$B_j = 2r_j (R_j - r_j \cos \alpha) (\cos \alpha - i),$$

$$C_j = -r_j^2 \sin^2 \alpha.$$

При $t=0$ формула (3.25) примет вид

$$V_j(t)_{t=0} = \frac{\pi n}{30} (R_j - r_j \cdot i)$$

где t - время; n - скорость вращения долота, об/мин.

Критерии оценки работоспособности буровых одношарошечных долот в форме (3.23) и (3.24) принято называть кинетическими, а табличную и графическую формы их представления – кинетическим паспортом долота.

Основные выводы по главе 3

1. В результате теоретических исследований, полученные параметрические уравнения движения зубка одношарошечного долота с учетом внедрения его в забой скважины, позволяют определить кинетические критерии работоспособности одношарошечного долота в виде удельной и объемной работы разрушения горных пород.

2. Найденные зависимости удельной и объемной работы разрушения горных пород одношарошечным долотом от траектории зубка на забое скважины позволяют наиболее равномерно распределить энергетические затраты по венцам долота.

3. Передаточного отношения шарошки должно вычисляться исходя из условия равенства контактных работ, совершаемых – положительно и отрицательно – проскальзывающими венцами чтобы получить сходимость с данными экспериментов.

4. Вычисленные кинетические критерии работоспособности одношарошечных долот в виде удельной и объемной работы разрушения горных пород для зубков каждого венца единичной ширины и для каждого кольцевого забоя скважины с заданными параметрами по ширине и толщине представляет возможность проводить сравнительный анализ эффективности работы каждого венца шарошки.

4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ОДНОШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ

4.1. Алгоритм вычисления кинетических характеристик одношарошечных долот

Для расчёта конструирования и разработки ОД исходим предпосылки - функциональной связи триады: долото-порода-энергия.

Кинематические и кинетические параметры ОД выше определены и приняты кинетические критерии в форме (3.23) и (3.24). Схема кинетических критериев показана на рисунке 4.1.

Для определения численных значений скорости, удельной и объемной работ, а также пути контакта рабочих органов ОД, нами была использована программа «KIPFS» и «KIPSFS», разработанная «УзЛИТИнефтьгаз».

Алгоритм вычисления кинетических характеристик ОД со сферической формой шарошки наиболее значим среди алгоритмов других классов, что обусловлено классической формой шарошки - сферой. Поэтому закономерности формообразования забоя скважины и аналитические зависимости механизма взаимодействия венцов шарошек с поверхностью забоя скважины легко поддаются математическому описанию [48].

В основу физической модели работы одношарошечного долота положены его реальная геометрия и деформируемая поверхность забоя скважины. Основу аналитической модели построения относительных критериев оценки работоспособности одношарошечного долота составляет расчет длины траектории зубка венца в контакт с породой.

Траектории зубков венцов определены выше параметрическими уравнениями движения при условии равномерного вращения шарошки вокруг своей оси.

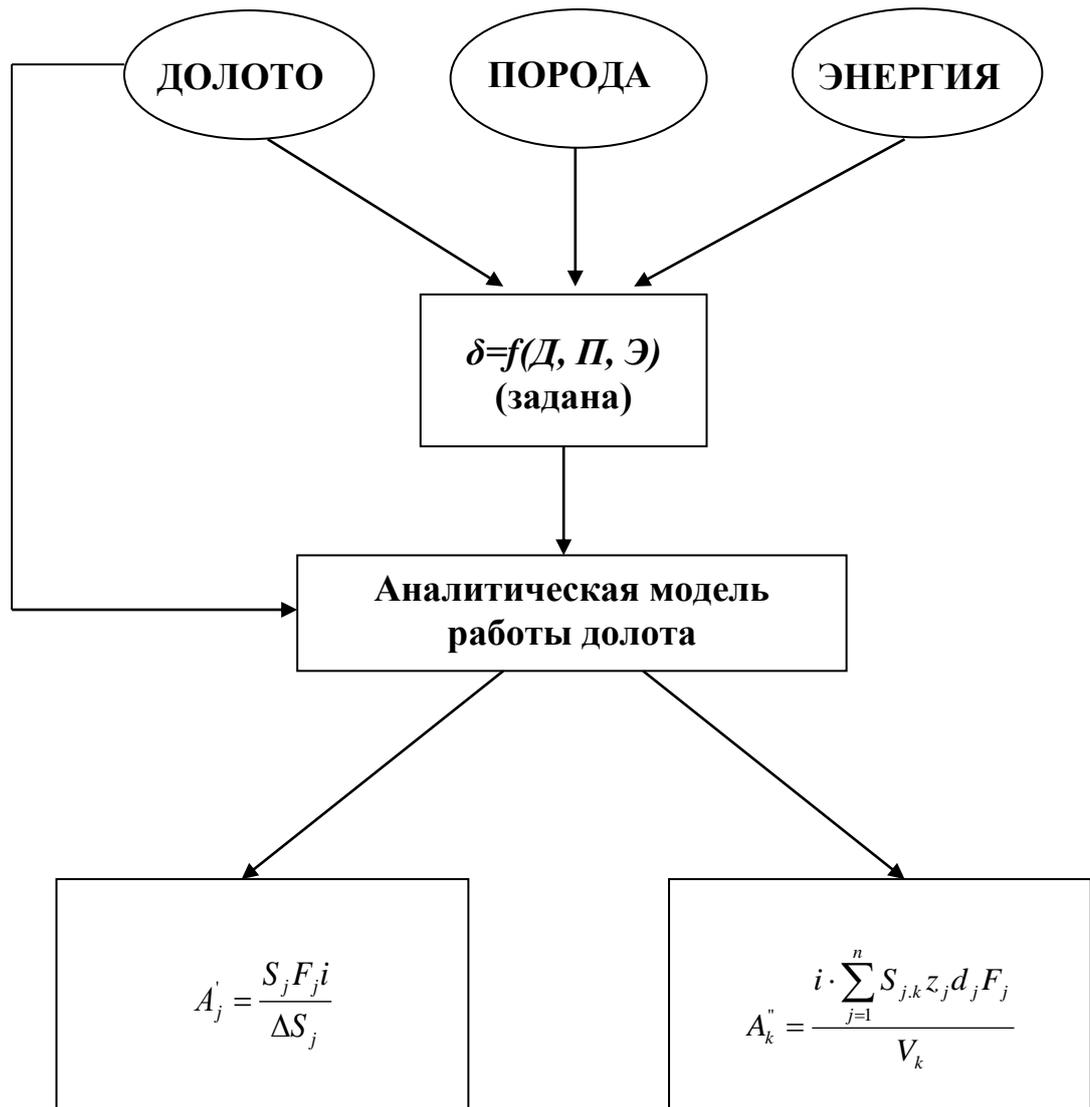


Рисунок 4.1. Схема построения кинетических критериев

Алгоритм расчета кинетических характеристик по программе «KIPSF» (Кинетический паспорт одношарошечного долота со сферической шарошкой) построен по схеме рисунка 4.2 и условно делится на шесть функциональных блоков:

- подготовки исходных данных;
- настройки программы;
- вычисления длины пути контакта зуба венца;
- поиска передаточного отношения шарошки;

- настройки программы на вычисление критериев;
- вычисления критериев.

Подготовка исходных данных.

Подготовка данных производится с помощью прорисовки профиля шарошки (рисунок 4.3) в следующей последовательности:

- по размерам с чертежа или эскиза прорисовываются профили зубков шарошки в их крайнем нижнем положении;
- через вершины профилей каждого зубка проводятся прямые перпендикулярные оси шарошки, характеризующие положение венца;
- на прорисовке проставляются размер диаметра долота;
- на пересечении осей вращения шарошки и долота проставляется значение угла между ними;
- радиусом равным расстоянию от центра шарошки до профиля любого зубка проводим окружность, которая будет касательной к профилям всех зубков.
- определяются высоты расположения венцов измеренные от условной вершины шарошки (точки пересечения ранее построенной окружности с осью шарошки) по его оси ;

Примечание: параметр -глубина внедрения (толщина кольцевого забоя)

- задается в пределах вылета зубка.



Рисунок 4.2. Блок-схема алгоритма вычисления кинетического паспорта

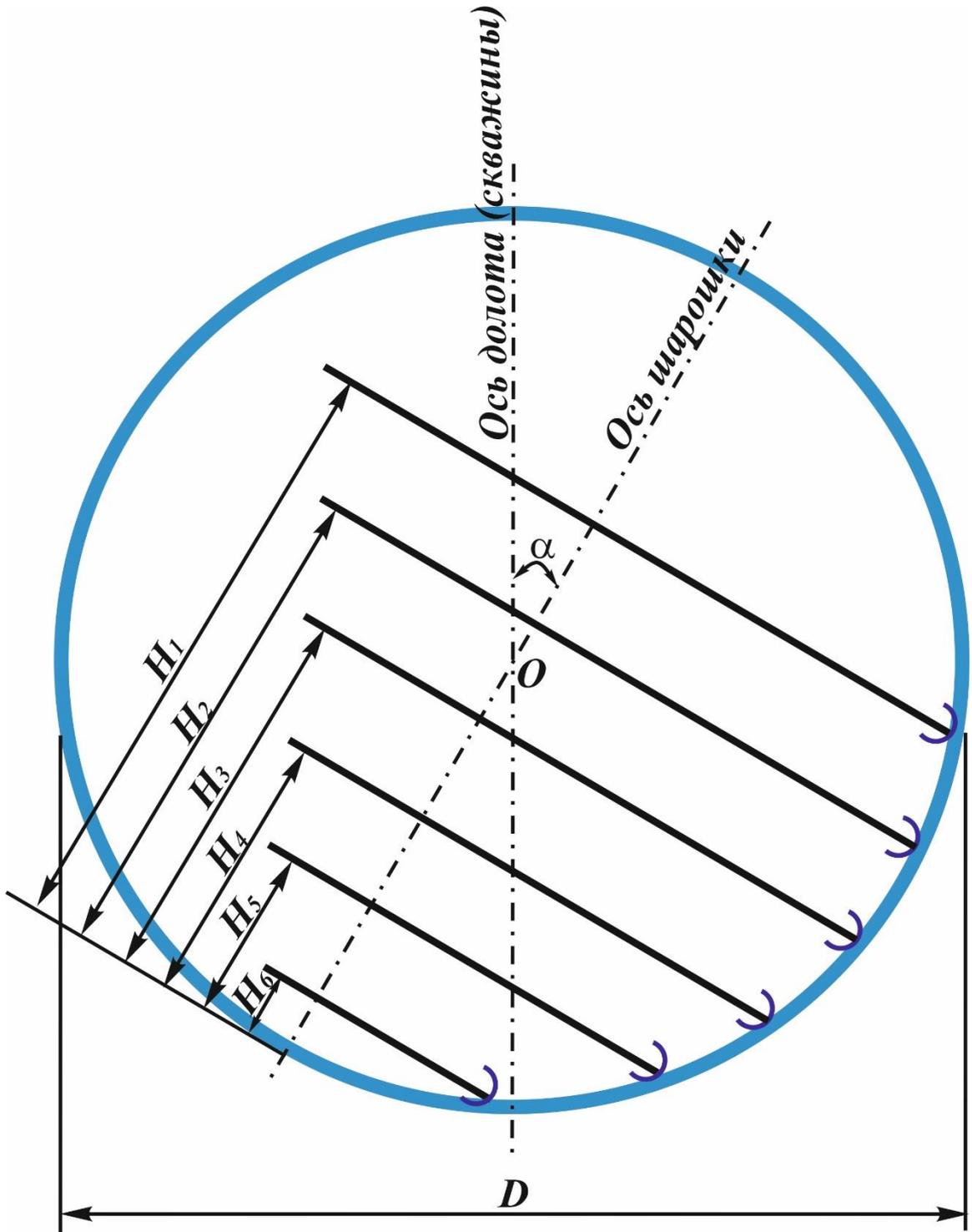


Рисунок 4.3. Схематическое изображение параметров ОД сферической формы, для подготовки исходных данных

Выходные данные

В результате выполнения программы формируется таблица кинетического паспорта, в которой содержатся сведения о геометрии долота, и относительные количественные показатели воздействия вооружения на забой при заданной величине глубины внедрения зубьев в породу

В выходной таблице выведены следующие характеристики:

- передаточное число;
- глубина внедрения зубка;
- угол наклона оси шарошки к оси долота;
- суммарное число венцов долота;
- число разбиений забойного пространства, приходящегося на контакт с инструментом (соответственно высотам расположения венцов);
- радиус скважины;
- суммарное число зубков долота;
- порядковый номер венца от периферии;
- высота расположения венца от условной вершины шарошки, измеренная по его оси;
- радиус венца рассчитываемый через высоту его расположения относительно условной вершины шарошки;
- радиус окружности на забое,, по которому перекачивается венец;
- число зубков на соответствующем венце;
- ширина зубков венца;
- скорость зубка в нижней точке траектории;
- удельная контактная работа;
- удельная объемная работа;

4.2. Кинетические паспорта одношарошечных долот нового образца диаметров 112 и 140 мм шарошки сферической формы.

Кинетический паспорт в табличной (таблица 4.1) и графической форме (рисунок 4.4) представлен ниже.

Для сравнительного анализа создаём кинетический паспорт для ОД I- В 140 Т (МГРИ-РГГРУ, кафедра СТБС).



Рисунок. 4.4. ОД I – В 140 Т

Как видно из кинетического паспорта таблица 4.1, значения A' , определяющие относительный износ вооружения, неравномерно распределены по венцам. Значение $A'_{\max}=308,227$ соответствует вершинному венцу, а значение $A'_{\min}=126,417$ – периферийному (рисунок 4.5). Это объясняет неравномерный износ вершинных венцов одношарошечного долота. В данном случае они будут изнашиваться более чем в 2,5 раза интенсивнее периферийных.

Значения A''_k , определяющие относительную интенсивность разрушения породы на сферических поясах забоя скважины, также неравномерны.

Расстановка зубков на основе таблицы 2.8 даст новый кинетический паспорт ОД (рисунок 4.6 и 4.7) в которой изнашивание вершинных венцов более низкое (таблица 4.3, 4.4).

Кинетический паспорт долота I –B140T

Кинетический паспорт долота I 140T - H					Передаточное число		0,105
					Глубина внедрения		6,0000
		Угол наклона		45.0000			
		Радиус скважины		70.0000			
		Количество венцов		7			
Геометрические параметры					Кинетические характеристики		
Номер венца (j)	Число зубков на венце (Z)	Ширина венца (d)	Радиус венца (R _b)	Радиус скважины (R ₀)	Скорость зубка V(0)	Удельная контактная работа (A')	Удельная объемная работа (A'')
1	2	3	4	5	6	7	8
1	6,0	10,0	61,84	66,92	57,8	126,417	3,794
2	6,0	10,0	69,49	55,08	45,7	164,01	1,271,87
3	6,0	10,0	69,97	50,96	41,7	168,9	0,806
4	6,0	10,0	65,97	30,10	22,29	184,634	0,446
5	6,0	10,0	53,27	5,57	0,04	236,283	0,244
6	6,0	10,0	42,40	9,41	-62,16	305,277	0,060
7	6	10	26,23	27,34	-58,98	308,227	0,172

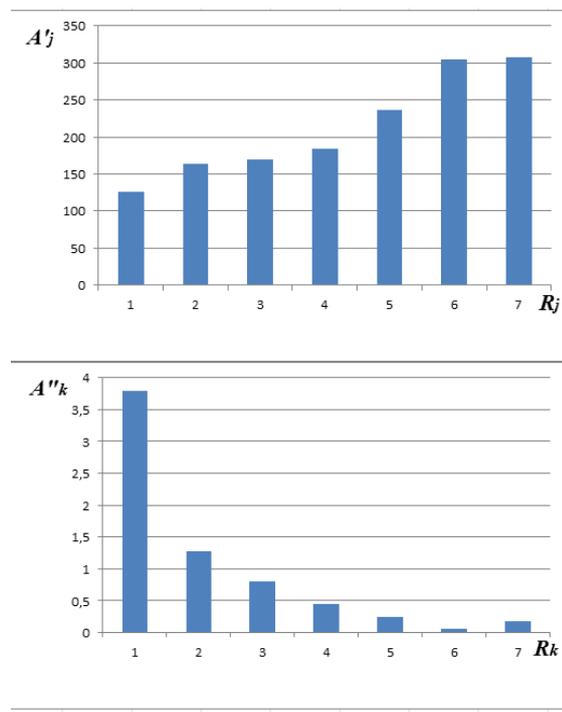


Рисунок 4.5. Кинетический паспорт долота I –B140T

Кинетический паспорт долота I B140T – H

Кинетический паспорт долота I 140T - H					Передаточное число	0,671	
					Глубина внедрения	6,0000	
					Угол наклона	30.0000	
					Радиус скважины	70.000	
					Количество венцов	6	
Геометрические параметры					Кинетические характеристики		
Номер венца (j)	Число зубков на венце (Z)	Ширина венца (d)	Радиус венца (R _b)	Радиус скважины (R ₀)	Скорость зубка V(0)	Удельная контактная работа (A')	Удельная объемная работа (A'')
1	2	3	4	5	6	7	8
1	8,0	10,0	64,83	69,35	38,46	45,130	5,818
2	10,0	10,0	69,53	64,26	26,20	74,976	1,325
3	10,0	10,0	69,61	56,58	14,68	94,042	0,501
4	9,0	10,0	65,23	43,79	0	125,631	0,365
5	6,0	10,0	49,26	17,84	-22,72	194,710	0,325
6	5,0	10,0	17,02	19,21	-55,51	217,130	0,340

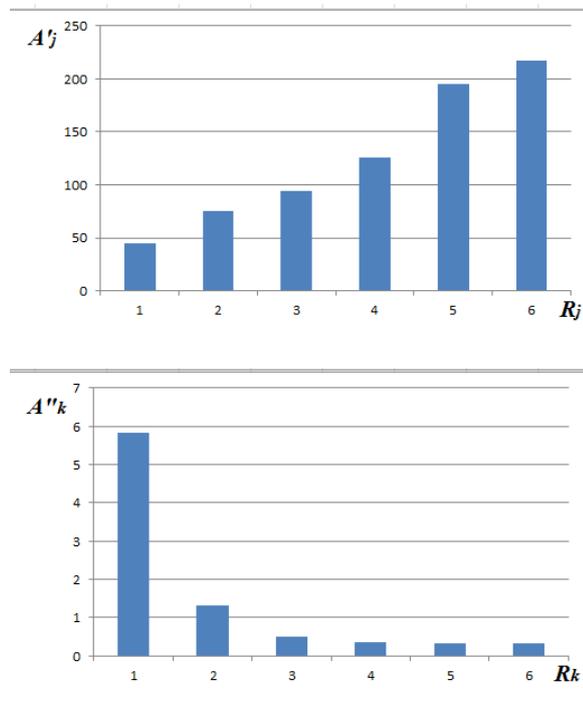


Рисунок 4.6. Кинетический паспорт долота I 140T - H

Кинетический паспорт долота I 112Т – Н

Кинетический паспорт долота I 112 С - Н					Передаточное число	0,466	
					Глубина внедрения	4,0000	
					Угол наклона	30.0000	
					Радиус скважины	56.000	
					Количество венцов	6	
Геометрические параметры					Кинетические характеристики		
Номер венца (j)	Число зубков на венце (Z)	Ширина венца (d)	Радиус венца (R _b)	Радиус скважины (R ₀)	Скорость зубка V(0)	Удельная контактная работа (A')	Удельная объемная работа (A'')
1	2	3	4	5	6	7	8
1	6,0	6,0	55,82	59,34	71,6	57,004	3,498
2	8,0	6,0	59,98	51,20	49,95	101,464	1,567
3	10,0	6,0	58,09	42,81	33,83	120,963	0,878
4	12,0	6,0	46,84	21,81	0,0	182,868	0,553
5	8,0	6,0	18,73	12,28	-77,3	186,887	0,521
6	6,0	6,0	33,61	4,6	-24,47	183,784	0,198

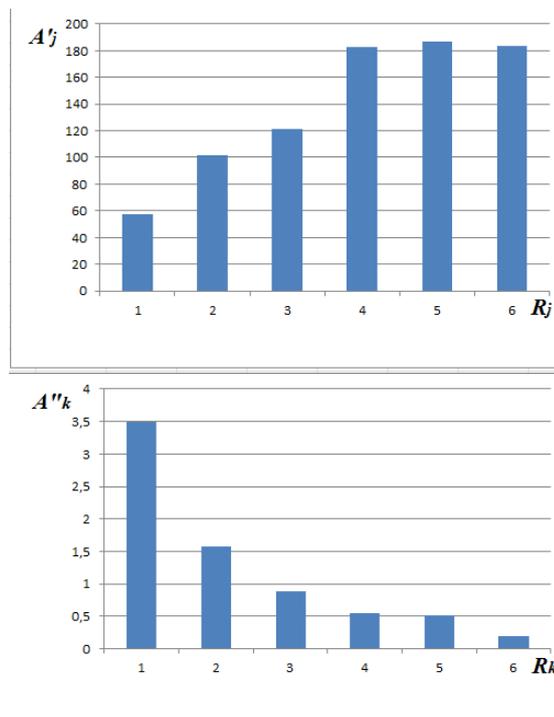


Рисунок 4.7. Кинетический паспорт долота I 112Т - Н

4.3. Усовершенствование одношарошечных долот диаметров 112 мм и 140 мм

Буровые одношарошечные долота со сферической формой шарошки выходят из строя, как правило, исчерпав свои потенциальные возможности по вооружению. Причем износ зубьев на венцах сферической шарошки локальный, т.е. опережающий износ вооружения происходит на одном или нескольких вершинных венцах.

В целях научно-обоснованного объяснения причин выхода буровых долот из строя, в СредАзНИИГазе была построена модель их работы на деформируемом забое скважины, которая позволяет оперативно вычислять относительные кинетические критерии A' и A'' , и оперативно проводить анализ работоспособности буровых долот.

По значению A'_{\max} можно спрогнозировать венец наиболее подверженный износу, т.е. венец, работоспособность (ресурс), которого определяет стойкость долота. По отношению значений A'_{\min} к A'_{\max} определяется степень рациональности использования твердосплавного вооружения. Для сравнения стойкости базовой и новой конструкций долот необходимо пользоваться величинами $A'_{\max} \cdot i$, т.е. максимальной величиной интенсивности износа вооружения шарошки, приведенной к единице времени (за оборот долота).

Это положение и является основой для анализа работоспособности одношарошечных долот и рекомендаций по совершенствованию геометрии их вооружения.

Для расчета кинетического паспорта ОД со ступенчатой шарошкой использую программу «KIPSFS» в ввод данных добавляются соответствующие радиусы сфер формирующих ступенчатую форму шарошки (рисунок 4.8).

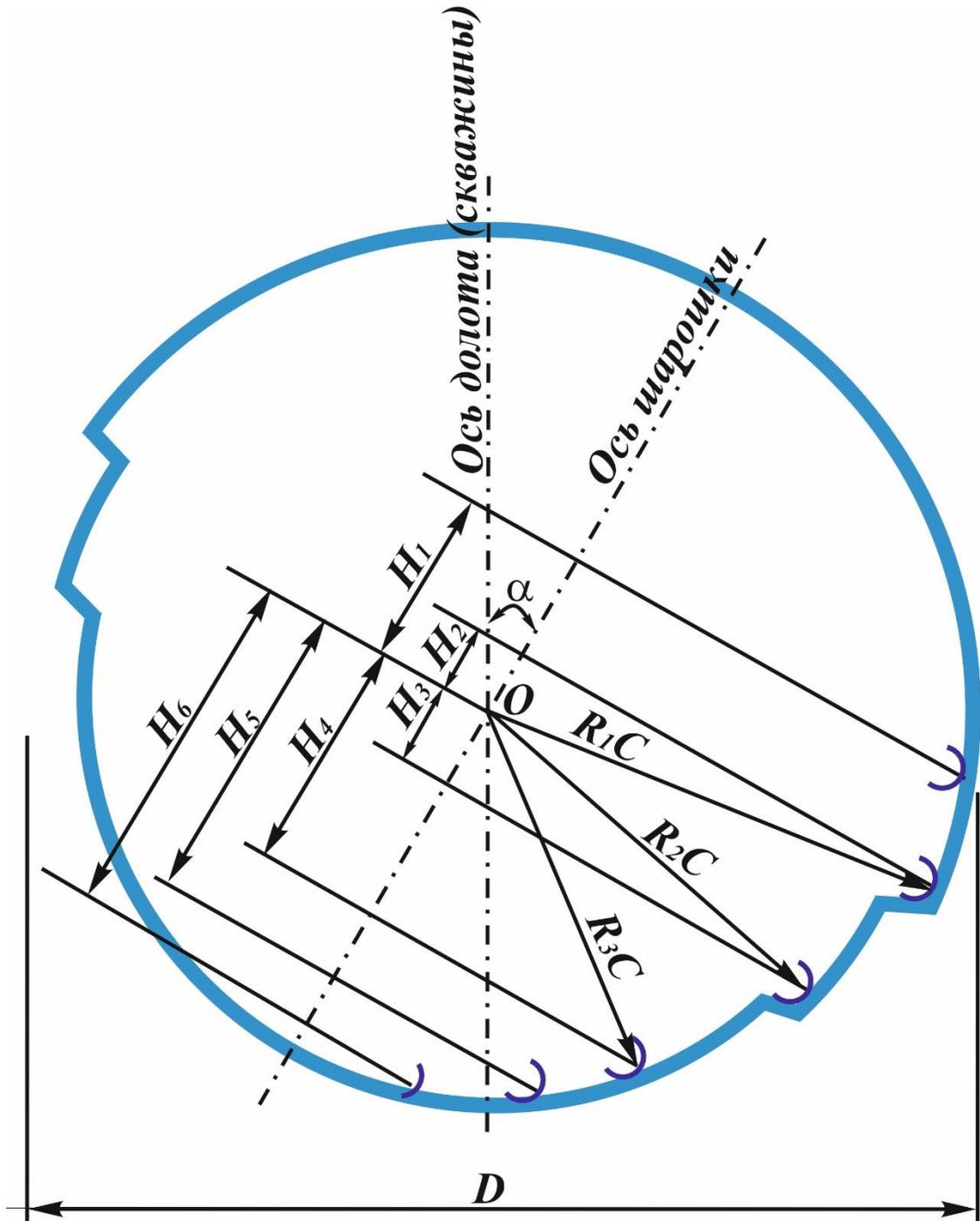


Рисунок 4.8. Схематическое изображение параметров ОД ступенчатой формы, для подготовки исходных данных

4.4. Кинетические паспорта усовершенствованных одношарошечных долот I 112 C – CH и I 140 T – CH

Проведенные вычисления кинетических паспортов при различных вариантах размещения и количества вооружения на сферической шарошке показали наличие в каждом случае высоких удельных контактных работ на вершинных венцах.

Эти исследования убедили в необходимости поиска принципиально новых путей повышения эффективности одношарошечного долота.

Путь контакта зуба с породой на забое скважины является функцией высоты сферического пояса, на котором он работает. Следовательно, уменьшение пути контакта возможно за счет изменения высоты сферического пояса, на котором работают зубки данного венца. Это можно достичь изменением формы шарошки, переводя часть венцов на концентрические сферы с уменьшенными радиусами. Поиск рациональной геометрии шарошки долота на этом пути производился путем перебора количества и размещения ступеней на шарошке.

Рассмотрим кинетический паспорт долота (таблица 4.4, рисунок 4.9), шесть венцов которого расположены на шарошке, имеющей три сферических пояса различной кривизны, на которых расположены по два венца. Радиус каждого последующего пояса, начиная с периферии, меньше предыдущего на 2,5 раза.

Как видно из кинетического паспорта, значения A' более равномерны по венцам, резко снижены и достаточно низкое значение A'_{\max} по сравнению с долотом со сферической шарошкой.

Следует отметить, что участок забоя, соответствующий значению A''_{\min} , смещен к периферии забоя, где условия разрушения облегчены ступенчатой формой забоя. Ступенчатая форма шарошки позволяет также увеличить удельную нагрузку на зубок за счет уменьшения количества зубков, находящихся в контакте с забоем скважины в каждый момент времени и

Кинетический паспорт долота I 112 С – СН

Кинетический паспорт долота I 112 С –НН (ступенчатая шарошка)				Передаточное число		0,7	
				Глубина внедрения		4,0	
				Угол наклона		30,0	
				Радиус скважины		56	
				Количество венцов		6	
				Количество сфер		3	
Геометрические параметры				Кинетические характеристики			
Номер венца (j)	Радиус венца (R _b)	Число зубков на венце (Z)	Радиус на забое скважины (R ₀)	Длина зубка на венце (d)	Скорость зубка V(0)	Удельная контактная работа (A')	Удельная объемная работа (A'')
1	2	3	4	5	6	7	8
1	21,20	6,0	57,35	4,0	20,97	32,117	0,411
2	8,5	12,0	53,94	4,0	13,2	51,279	0,333
3	10,50	10,0	39,74	4,0	-0,01	28,128	0,067
4	28,8	5,0	18,86	4,0	-13,76	30,207	0,145
5	38,40	4,0	5,74	4,0	-21,3	56,982	0,218
6	45.60	3,0	9,82	4,0	-31,77	101,364	0,203

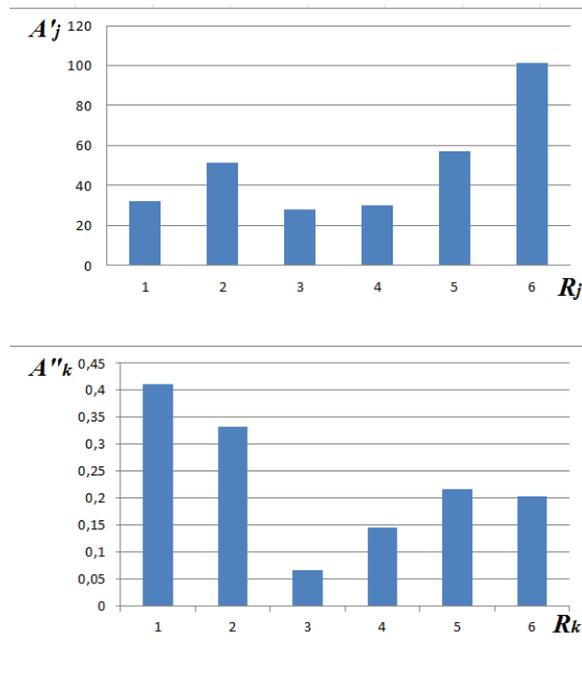


Рисунок 4.9. Кинетический паспорт долота I 112 С – СН

Кинетический паспорт долота I 140T – СН

Кинетический паспорт долота I 140T – СН (ступенчатая шарошка)					Передаточное число	0,769		
					Глубина внедрения	10,0		
					Угол наклона	30,0		
					Радиус скважины	70		
					Количество венцов	6		
					Количество сфер	3		
Геометрические параметры					Кинетические характеристики			
Номер венца (j)	Радиус венца (R _b)	Число зубков на венце (Z)	Радиус на забое скважины (R ₀)	Длина зубка на венце (d)	Скорость зубка V(0)	Удельная контактная работа (A')	Удельная объемная работа (A'')	
1	2	3	4	5	6	7	8	
1	66,26	6,0	70,14	6,0	24,94	39,856	0,302	
2	70,28	12,0	65,91	6,0	15,43	62,787	0,263	
3	63,81	10,0	49,06	6,0	-0,02	33,199	0,055	
4	47,50	8,0	23,63	6,0	-16,77	37,590	0,113	
5	36,95	4,0	9,00	6,0	-25,25	67,676	0,174	
6	21,35	3,0	9,01	6,0	-38,45	114,105	0,000	

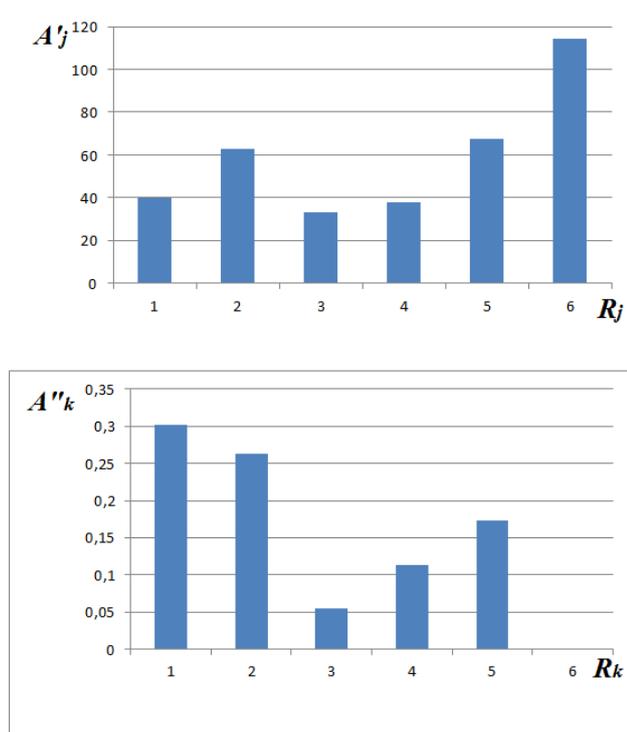


Рисунок 4.10. Кинетический паспорт долота I 140T – СН

улучшает очистку забоя от шлама. Увеличивается также активность шарошки, свидетельством чего является увеличение передаточного отношения с $i=0,57$ до $i=0,86$.

Вследствие этих причин некоторое снижение значения A''_{\min} не повлечет снижения механической скорости проходки. Не возрастает, очевидно, и вероятность скола вооружения венцов разрушающих участков забоя, которому соответствует значению A''_{\min} .

Стойкость долота со ступенчатой формой шарошки возрастает, т.к. максимальная интенсивность износа вооружения за оборот долота A'_{\max} снизилась по сравнению с долотом со сферической шарошкой более чем три раза.

Увеличение стойкости вооружения долота позволит увеличить показатели его работы при достаточной стойкости опоры.

Основные выводы по главе 4

Исследования распределения величин удельных контактных и объемных работ разрушения, соответственно, по венцам и сферическим поясам забоя скважины, при решении задач оптимизации геометрии буровых долот и анализ выше приведенных кинетических паспортов, позволяет сделать следующие выводы и рекомендации.

1. Критерии оценки работоспособности буровых долот должны быть функциями от параметров триады: долото-порода-энергия.

2. Для разработки кинетических паспортов одношарошечных долот необходимо учесть величины удельной и объемной работы разрушения пород, а также скорости и пути контакта зубка с породой.

3. Одношарошечное долото I 112 С-Н и I 140Т-Н со сферической формой шарошки имеют предел по абразивной стойкости вершинных

венцов. С целью повышения эффективности одношарошечного долота необходимо шарошку проектировать ступенчатой.

4. Кинетические паспорта новых усовершенствованных конструкций одношарошечных долот диаметрами $\varnothing 112$ и $\varnothing 140$ мм со ступенчатыми формами шарошек, показали что значения A'_{\min} более равномерны по венцам, имеют более низкое значение A'_{\max} по сравнению с долотом со сферической шарошкой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано новое решение задачи повышения эффективности бурения геологоразведочных скважин путем создания усовершенствованных конструкций одношарошечных долот, обеспечивающих увеличение скорости и снижение энергетических затрат.

Основные результаты и рекомендации выполненной диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Для бескернового бурения геологоразведочных скважин использование одношарошечных долот эффективно, так как продолжительность работы на забое одношарошечных долот значительно превышает время пребывания на забое других типов долот.
2. Критерии оценки работоспособности буровых долот должны быть функциями от параметров триады: долото-порода-энергия.
3. Программный комплекс ANSYS Workbench позволил создать математическую модель совокупности геометрических, физических и конечно-элементных моделей горной породы, скважины и зубка, а также имитировать работу зубка на забое скважины для определения усилия разрушения горных пород не проводя практические эксперименты.
4. Установлены закономерности изменения усилия разрушения горных пород в зависимости от расположения зубка на поверхности забоя скважины, геометрической формы забоя, наличия дополнительной открытой поверхности, а также угла атаки зубка.
5. Разрушение горных пород при вдавливании зубка в зависимости от места расположения зубка на забое скважины, геометрических форм забоя, расстояния границы открытой поверхности, образованной от предыдущего вдавливания зубка и угла атаки зубка выполненные по выше изложенной методике, позволяют определить оптимальные

параметры, расположения зубка долота, относительно поверхности забоя для пород различной плотности.

6. Анализ полученных результатов вдавливания зубков в зависимости от места расположения на забое скважины позволили объяснить почему зубки работающие в угловой области забоя скважины быстро изнашиваются и ломаются, по сравнению расположенными близко к оси скважины.
7. Полученные параметрические уравнения кинематики одношарошечного долота с учетом внедрения его рабочих органов в забой скважины позволили разработать кинетический паспорт работы одношарошечного долота, и определить скорость и путь контакта зубка с породой.
8. Кинетические паспорта новых усовершенствованных конструкций одношарошечных долот диаметрами 112 и 140 мм со ступенчатыми формами шарошек, показали что значения A'_{\min} более равномерны по венцам, имеют более низкое значение A'_{\max} по сравнению с долотом со сферической шарошкой.
9. Разработанные конструкции одношарошечных долот, учитывающие закономерности изменения усилий разрушения горных пород в зависимости от расположения зубка на поверхности забоя скважины, позволяют бурить геологоразведочные скважины в широком диапазоне по твердости и перемежаемости горных пород.
10. Результаты работы можно использовать в учебном процессе при чтении дисциплины «Разрушения горных пород при бурении скважин» для специальности «Технология и техника геологоразведочных работ».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамсон М.Г., Гянджунцев П.А., Никитин СВ. Метод оценки и прогнозирования увеличения средней проходки на долото за счет совершенствования структуры потребления долот // РНТС, серия «Бурение». - 1982. - № 11.- С. 3-5.
2. Абрамсон М.Г., Гянджунцев П.А., Никитин СВ. Экспресс-метод определения рационального использования ресурса работоспособности шарошечных долот при вынужденных остановках в процессе их эксплуатации // РНТС, серия «Бурение». - 1981. - №7. - С. 4-6.
3. Абрамсон М.Г., Гянджунцев П.А., Никитин С.В. Экспресс-метод сравнительной оценки показателей и эффективности работы породоразрушающих буровых инструментов // – РНТС, серия «Бурения». - 1981. - № 11.- С. 15-19..
4. Абрамсон М.Г., Палий П.А., Пьянков Н.Я. Использование непосредственной информации о соответствии типов долот механическим свойствам пород для выбора рациональных типов долот // ВНИИБТ.- 1976. - № 39. - С. 117-121.
5. Агошашвили Т.Г. К вопросу о скольжении на забое при бурении шарошечными долотами // ВНИИБТ. - 1967. –№XVII. - С. 133-144.
6. Агошашвили Т.Г. Качественный анализ величин скольжения в долотах со смещенными осями шарошек //ВНИИБТ. - Теория и техника бурения. - 1967. -№XVII. - С. 144-154.
7. Агошашвили Т.Г., Симонов В.В., Бревдо Г.Д. К вопросу о скольжении иконструировании шарошек штыревых долот // Тр. МИНХ и ГП им. И.М. Губкина. - 1968. -№81. - С. 119-131.
8. Алексеев Ю.Ф. Механические свойства горных пород нефтяных месторождений Башкирии. - М.: ВНИИОЭНГ, 1966. С. 107-110.

9. А.с.1721208 СССР. Опора бурового долота / Б.Л. Стеглянов, В.Н. Гладких, А.В. Сусликов, А.В. Торгашев, Ю.Н. Соколов, // Бюл. –1992. - № 11.– С.4.
10. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. – М.:Госиздат технический литературы, 1956. – 859с.
11. Бингхэм И.Г. Проблемы буримости горных пород // Обзор зарубежной литературы. Серия "Бурение". -М. ВНИИОЭНГ.- 1966. - 127 с.
12. Бронников И.Д., Тошов Ж.Б., Нахангов Х.Н. Аналитическая модель взаимодействия зубков шарошечного долота с забоем скважины // Научно-технический журнал «Инженер-нефтяник». - 2017. –№2. -С. 16-19.
13. Бронников И.Д., Тошов Ж.Б., Нахангов Х.Н. Критерии оценки работоспособности одношарошечных буровых долот // Научно-технический журнал «Инженер-нефтяник». - 2016. –№2. -С. 24-27.
14. Булах Г.И., Пульченко В.М. О работе долот с нефиксированной осью вращения // ВНИИБТ. -1976. -№XXXVII. - С. 48-56.
15. Буровой породоразрушающий инструмент. Международный транслятор-справочник.Т. 1/ Под редакцией В.Я. Кершенбаума, А.В. Торгашева, А.Г. Мессера - М: Нефть и газ. - 2003. - 258 с.
16. Буряка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А., Глазунова Н.А., Адеянов И.Е. Инженерный анализ в ANSYS Workbench. - Самара: СамГУ,2010. - 271 с.
17. Бухгольц А.И. Основной курс теоретической механики. Ч. I. М.:Наука, 1969. - 468 с.
18. Бухгольц А.И. Основной курс теоретической механики. Ч. II. М.: Наука, 1969. - 332 с.
19. Валиева К.Г. Разработка и внедрение методики повышения эффективности буровых долот с использованием ЭВМ: Автореф. дис.канд. техн.наук.– Ташкент: НПО «Нефтегазнаука» - 1995.- 28 с.

- 20.** Вычисление кинетических характеристик долот с несмещенными осями вращения шарошек в плане. Программное средство. ГосФАП. №П007949 //Стеклянов Б.Л., Колугарь А.Г., Колотаева Е.Г., Ильковский А.И., Биланенко Н.А., Гилязиева К.Г. -Ташкент, 1984. - 36 с.
- 21.** Вычисление кинетических характеристик долот со смещенными осями вращения шарошек в плане. Программное средство. ГосФАП. № П006056. //Стеклянов Б.Л., Колугарь А.Г., Колотаева Е.Г., Ильковский А.И., Биланенко Н.А., Гилязиева К.Г. - Ташкент, 1983. 38 с.
- 22.** Вычисление радиусов калибрующих венцов. Программное средство. ГосФАП. №П007948. //Стеклянов Б.Л., Марков А.В., Колугарь А.Г., Колотаева Е.Г., Ильковский А.И., Биланенко Н.А., Гилязиева К.Г. –Ташкент, 1984. - 20 с.
- 23.** Ганджумян Р.А. Математическая статистика в разведочном бурении. – М.: Недра, 1990. - 224 с.
- 24.** Голубинцев О.Н. Механические и абразивные свойства горных пород и их буримость. - М.: Недра, 1968. - 200 с.
- 25.** Голубинцев О.Н. Основы кинематики резцовой коронки // Разведка и охрана недр. – 1956. - №8.- С.22-30
- 26.** Егерев А.Ф. Теоретические основы конструирования и эксплуатации долот. - М.: Гостоптехиздат, 1945.- 45 с.
- 27.** Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / Пер. с англ. - М.: Мир, 1975. -541с.
- 28.** Зубарев А.В., Матвеев Г.И., Рыжиков Ю.В. и др. Одношарошечные долота. - М.: Недра, 1971. - 176 с.
- 29.** Ильковский А.И., Стеклянов Б.Л., Колугарь А.Г., Мамаджанов У.Д. О сходимости данных по отработке шарошечного долота с результатами анализа его кинетики // Бурение газовых и газоконденсатных скважин. Реф. сб. ВНИИЭГазпрома. – Ташкент, - 1979. - №5. - С. 15-18.

- 30.** Механизм образования стволов геологоразведочных скважин / А. Г. Калинин. - Москва: б.и., 1968. - 23 с
- 31.** Кардыш В.Г., Мурзаков Б.В., Окмянский А.С. Энергоемкость бурения геологоразведочных скважин. М.: Недра, 1984. – С.201
- 32.** Колесников Н.А. Влияние параметров режима бурения и конструктивных особенностей шарошечных долот на разрушение горных пород // Нефтяное хозяйство. - 1973. - № 10.- С. 1-4.
- 33.** Колесников Н.А. Обоснование методики исследования влияния времени взаимодействия рабочих элементов шарошечного долота на эффект объемного разрушения горных пород // Вопросы нефтепромышленного дела. Грозный, - 1965. №28 - С. 53-61.
- 34.** Колотаева Е.Г., Стеклянов Б.Л. Алгоритм автоматизированного поиска рациональной геометрии одношарошечного долота // Изв. АН УзССР Ташкент, - 1984. - № 2.- .55-61.
- 35.** Колугарь А.Г. Математическая модель работы бурового долота в реальном времени // сб. «Совершенствование буровых и горных работ». – Ташкент: САИГИМС, - 1985. - С. 63-71.
- 36.** Колугарь А.Г. Математические методы прогнозирования эффективности буровых шарошечных долот. - Колугарь А.Г. Математические методы прогнозирования эффективности буровых шарошечных долот. - М.: ИНТЭКа, - 1990. - 48 с.
- 37.** Кувыкин С.Н., Латыпов Э.Г., Когарманов Н.Ф., Баландин П.С. Проектирование реальных режимов бурения алмазными долотами с использованием данных механических свойств горных пород при вдавливании // Сб. «Механические свойства горных пород при вдавливании и их практическое использование» - М.: ВНИИОЭНГ, - 1966. –С. 202-208.
- 38.** Лагранж Ж. - Аналитическая механика, т.1. - М.-Л.:ГТТИ – 1950. - С.594.

39. Мавлютов М.Р. Разрушение горных пород при бурении скважин. - М.:Недра, - 1978.-216 с.
40. Мавлютов М.Р., Сакаев Р.М., Галикбаров В.Ф. Вероятностный анализ энергонапряженности работы вооружения долота // Технология бурения нефтяных и газовых скважин. – Уфа, 1979. - № 6. - С. 7-10.
41. Маньковский Г.И., Швец В.В., Мартынкж Г.К. Аналитические исследования взаимодействия шарошечного инструмента с породой. М.: Изд-во ИГД им. А.А. Скочинского, - 1964. –42с.
42. Масленников И.К. и др. Технологические особенности и назначение шарошечных долот, применяемых для бурения нефтяных и газовых скважин в США. - М: ВНИИОЭНГ, - 1974. – С.136.
43. Масленников И.К., Серенко И.А. Пути повышения эффективности глубокого бурения. М.: ВНИИОЭНГ. 1976. 40 с.
44. Назаров Л.В. Исследование основных конструктивных элементов малогабаритных шарошечных долот для твердых и крепких пород: Дис. канд. техн. наук. Ташкент,- 1967. – С.124.
45. Назаров Л.В. Электровращательное бурение шпуров при горно-разведочных работах. - Ташкент: ФАН, - 1974. –С.208.
46. Нахангов Х.Н. Аналитические исследования кинематики одношарошечного бурового долота // VIII международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые – наукам о земле» / Доклады М., 2016. - С.260-262
47. Нахангов Х.Н., Бронников И.Д. Определение параметров расположения зубков долота на забое скважины // XIII международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о земле» / Доклады, т.2. - М., 2017.- С.20-21.
48. Нахангов Х.Н., Тошов Ж.Б. Усовершенствования одношарошечных долот. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). –М., 2017.-№6. Отдельные статьи

(специальный выпуск 13). Пути повышения эффективности бурения геологоразведочных скважин – С. 6-10.

49. Нахангов Х.Н.. Исследования оптимальных параметров расположения зубцов шарошечного долота в условиях забоя скважины. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск 9), М., 2017.-№5– 8 с.

50. Нахангов Х.Н.. Критерии работоспособности вооружения одношарошечных долот // VII международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые – наукам о земле» /Доклады.- М., 2014. -С.299-300/

51. Осипов П.Ф. Проблемы создания шарошечных долот нового поколения и пути их решения // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М., 2005. -№ 5. – С.5-9.

52. Отчет по теме № Б-1/89 // Фонды СредАзНИИгаза. - Ташкент 1990, - 77 с.

53. Отчет по теме ПО 02.05/89.90 // Фонды СредАзНИИгаза. - Ташкент 1990, - 44 с.

54. Отчет по теме ПС 02.15/92.92 // Фонды УзбекНИПИнефтегаза. -Ташкент1992, - 36 с.

55. Пат. 2096578 РФ. МКИ Е21В 10/24 Шарошечное долото / Ю.Г.Матвеев, А.Н. Попов, А.В.Торгашов, С.П. Баталов // Бюл. – 1997 - № 32.

56. Пат. США № 4372624 от 02.08.83г.

57. Пат. США № 5129471 от 14.07.92г.

58. Пат. № IAP 03917 Одношарошечное буровое долото // В.Штейнерт, ДЕ, Б.Л.Стеглянов, А.А.Закиров, П.И. Ибрагимова, Р.М. Рахимов. Ташкент 2007.

59. Пат. № FAP 00289 Одношарошечное буровое долото // В.Штейнерт, ДЕ, Б. Л. Стеглянов, А.А. Закиров. – Ташкент 2007

60. Поляков В.С., Палий П.А. и др. Исследование механики работы двухшарошечных сферических долот // Нефтяное хозяйство. – М. 1971. - № 2.
61. Программа «Вычисление кинетических характеристик долот с несмещенными осями вращения шарошек в плане». // ПОО 7949, ГосФАП Стеклянов Б.Л., Колугарь А.Г. и др.
62. Рахимов Р.М. Разработка метода оценки работоспособности одношарошечных долот: Дис. канд. техн. наук. Ташкент. 2002.
63. Симонов В.В. Исследование работы породоразрушающего инструмента. Новое в бурении скважин // Тр. МИНХ и ГП им. И.М. Губкина. - М., 1970. - №96. - С. 19-23.
64. Симонянц Л.Е. Разрушение горных пород и рациональная характеристика двигателей для бурения. – М.: Недра. – 1966. – 67 с.
65. Сократов В.Г. К вопросу о скольжении шарошечных долот // Тр. ГрозНИИ / Вопросы геологии нефтяных месторождений нефтепромыслового дела. Грозный, 1954. - С. 44-49.
66. Разведочное бурение / Соловьев Н.В., Кривошеев В.В., Башкатов Д.Н. и др. - М., 2007. -904 с.
67. Спивак А.И., Попов А.И. Разрушение горных пород при бурении скважин. - М.: Недра, 1979. - 239 с.
68. Справочник металлиста,Т.1. // под ред. Чернавского С.А., Решипова В.Ф. – М.: Машиностроение, 1976. –768 с.
69. Стеклянов Б.Л. Кинетический паспорт шарошечного долота // Газовая промышленность. –1980. - № 11.- С.29-31.
70. Стеклянов Б.Л. Методика оценки величин скольжения вооружения шарошек на забое скважины и особенности штыревых шарошечных долот конструкции ДДА. // МГ УзССР, САИГИМС / Сб. Вопросы геологии, методики и техники разведки минерального сырья. – Ташкент,1972. - С. 82-83.

71. Стеклянов Б.Л. От Как?... к Почему?... //ГФНТИ /Аспекты динамики буровых долот и других физических моделей. Ташкент, 2001.- 68 с.
72. Стеклянов Б.Л. Совершенствование методики анализа работоспособности буровых долот // Вопросы бурения скважин, разведки и разработки месторождений Северного Кавказа и Узбекистана / Сб. науч. тр. ВНИИЭгазпрома. М., 1981.- С. 83-86.
73. Стеклянов Б.Л. Теоретические основы создания эффективных породоразрушающих буровых инструментов нового поколения // Узбекский журнал нефти и газа. - Ташкент, 1999. - № 9.- С. 25-27.
74. Стеклянов Б.Л., Биланенко Н.А. Практика выбора и отработки буровых долот в промысловых условиях // ЭИ ВНИИЭгазпрома. –М.,1983. -№5.- С. 19-22.
75. Стеклянов Б.Л., Биланенко Н.А., Валиева К.Г. К исследованию параметров забоя скважины // Изв. АН УзССР / Серия техн. наук.Ташкент, 1979. - № 5. - С. 81-83.
76. Стеклянов Б.Л., Биланенко Н.А., Ильковский А.И., Колугарь А.Г. Методика решения оптимизационных задач при выборе и отработке буровых долот // РНТС, ВНИИОЭНГ / Бурение. М., 1982. - №12. - С. 7-9.
77. Стеклянов Б.Л., Колотаева Е.Г. Алгоритм автоматизированного поиска рациональной геометрии одношарошечного долота // Изв. АН УзССР / Серия техн. наук. Ташкент, 1984. - № 2. - С. 55-61.
78. Стеклянов Б.Л., Колотаева Е.Г. Особенности алгоритма расчета кинетических характеристик одношарошечных долот со сферическими шарошками // Тр. ВНИИЭгазпрома. М., 1978. - №1/5. - С. 110-115.
79. Стеклянов Б.Л., Колугарь А.Г., Колотаева Е.Г., Биланенко Н.А. Кинетические характеристики периферийных венцов шарошек на сферической поверхности забоя скважины // Тр. ВНИИЭгазпрома. М., 1978. -№1/5. - С. 81-84.

80. Стеклянов Б.Л., Нахангов Х.Н., Тошов Ж.Б. Анализ работоспособности буровых долот различного типа для бурения взрывных скважин // Материалы республиканской научно-технической конференции на тему «Современные технологии и инновации горно-металлургической отрасли». –Навои, 2012. - С. 28-29

81. Стеклянов Б.Л., Торгашов А.В., Логинов А.А., Соколов Ю.Н., Валиева К.Г. Повышение эффективности бурового породоразрушающего инструмента // Обзорная информация. ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ. - М., 1991. – С.35.

82. Стеклянов Б.Л., Тошов Ж.Б., Нахангов Х.Н. Динамика промывочной жидкости при конструировании шарошечных долот // Материалы республиканской научно-технической конференции на тему «Современные технологии и инновации горно-металлургической отрасли». – Навои, 2012.-С. 51-52

83. Стеклянов Б.Л., Шамансуров И.И. Методика определения положения мгновенной оси вращения шарошки и оценка эффективности долота //Сб. Совершенствование техники и технологии разведочных горнобуровых работ. – Ташкент, 1972. - С. 52-61.

84. Стеклянов Б.Л., Шамансуров И.И. Общее кинематическое уравнение движения зубьев шарошек // ФАН УзССР. Ташкент, 1971. - № 2. - С. 21-23.

85. Стеклянов Б.Л., Штейнерт В.А., Рахимов Р.М. Динамические составляющие породоразрушающих буровых инструментов // НТЖ Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2008, - № 6. – с. 19-21.

86. Торгашев А.В. Пути совершенствования конструкций одношарошечных долот // ПМБ ЦИНТИхимнефтемат. - М., 1989. – с.21.

87. Тошов Ж.Б., Бронников И.Д., Нахангов Х.Н. Теоретические основы построение аналитической модели одношарошечного долота. //

Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2017.-№6. Отдельные статьи (специальный выпуск 13). Пути повышения эффективности бурения геологоразведочных скважин – С. 3-5.

88. Тошов Ж.Б. Алгоритм процесса разработки буровых инструментов // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: Сборник научных трудов 5-ой Международной научно-практической конференции. –Курск, 2015. -С. 294-297

89. Тошов Ж.Б., Нахангов Х.Н., Тошниёзов Л.Г., Урчинов М.Н. Новые технические решения разработки буровых инструментов //Материалы VIII-международной научно-технической конференции / Горно-металлургический комплекс: достижения, проблемы и современные тенденции развития. – Навои, 2015. – С.195

90. Тошов Ж.Б., Нахангов Х.Н. Динамика разрушения горной породы на забое скважины // Материалы республиканской научно-технической конференции на тему «Современные технологии и инновации горно-металлургической отрасли». – Навои, 2012. - С. 46-47.

91. Тошов Ж.Б., Нахангов Х.Н. К вопросу динамики буровых долот на забое скважин. Проблемы бурения, заканчивания и капитального ремонта скважин // Сборник материалов II республиканской научно-технической конференции. –Ташкент, 2012. - С.30-31.

92. Тошов Ж.Б., Нахангов Х.Н. Критерии вооружения рабочих поверхностей шарошек трех- и одношарошечных долот // Современные техника и технологии горно-металлургической отрасли и пути их развития: Материалы VI-международной научно-технической конференции. –Навои, 2013. - С.262-263.

93. Тошов Ж.Б., Нахангов Х.Н. Обоснование и разработка новой конструкции одношарошечных долот для бурения взрывных скважин // Отчет по бюджетной теме ЁА-5-002. - Навоий: НГГИ, 2011. -97 с.

94. Тошов Ж.Б., Нахангов Х.Н., Кахаров С.К. Пути совершенствования высокоэффективных породоразрушающих инструментов для бурения взрывных скважин // Материалы республиканской научно-технической конференции на тему «Перспективы развития техники и технологии и достижения горно-металлургической отрасли за годы независимости республики Узбекистан». –Навои, 2011. -С. 22-23

95. Тошов Ж.Б., Нахангов Х.Н., Сарбатирова Л.Н. Динамика промывочной жидкости при конструировании шарошечных долот //Материалы республиканской научно-технической конференции на тему «Современные технологии и инновации горно-металлургической отрасли». – Навои, 2012. - С. 51-52.

96. Травкин В.С. Породоразрушающий инструмент для вращательного бескернового бурения скважин. - М: Недра, 1982. - 192 с.

97. Устюгов Е.В. Энергоемкость забоя при бурении скважин // Изд. ФАН УзССР. Ташкент, 1989. - 168 с.

98. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления, т. II. - М.: Физматгиз, 1959. - 807 с.

99. Шамансуров И.И., Стеклянов Б.Л. Кинематика шарошечных долот. - Ташкент: ФАН, 1977. - 104 с.

100. Шарошечные долота и бурильные головки: Каталог / Центр, ин-т НТИ и техн.-экон. исслед. по Хим и нефт. машиностроению; составители П.И. Сопин, Р.М. Богомоллов и др. Изд. 6-е, исправленное и дополненное. - М., 1990.- 93 с.

101. Шеметов П.А., Норов Ю.Д., Тошов Ж.Б. Повышения эффективности бурения взрывных скважин на карьерах. Монография. – Ташкент: Фан, 2009. - 160 с.

102. Шрейнер Л.А. Механические и абразивные свойства горных пород. - М.:Гостоптехиздат, 1958.-201 с.

- 103.** Шрейнер Л.А. Физические основы механики горных пород. М.-Л.: Гостоптехиздат, 1950. - 211 с.
- 104.** Шрейнер Л.А., ГаньЧжи-цзянь. Влияние числа оборотов на скорость бурения шарошечными долотами // Нефтяное хозяйство.- 1956. - № 12. - С.13-17
- 105.** Шрейнер Л.А., Павлова Н.Н. Разрушение горных пород при динамическомнагружении. - М.: Недра, 1964. - 160 с.
- 106.** Штейнерт В.А. Вопросы прогнозируемости работоспособность одношарошечных буровых долот. // НТЖ Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2008. -№ 8.- с. 7-9.
- 107.** Штейнерт В.А. Характерные особенности работоспособности одношарошечных долот большого диаметра // НТЖ Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2008. - № 8. – С. 24-25.
- 108.** Штейнерт В.А., Стеклянов Б.Л., Закиров А.А. К вопросу построения экспериментально-аналитический методики оценки эффективности буровых одношарошечных долот // Узбекский журнал нефти и газа. Ташкент,2011. - № 1. - С. 30-32.
- 109.** Штейнерт В.А., Стеклянов Б.Л., Закиров А.А. Конструктивные особенности одношарошечных буровых долот Компании «SteinertIndustriesGmbH&Co. KG» // Узбекский журнал нефти и газа// Специальный выпуск НХК «Узбекнефтегаз».- Ташкент – 2001. -С. 50-53.
- 110.** Эйгелес Р.М. Анализ напряженного состояния породы в условиях глубокой скважины при взаимодействии ее с рабочими органами породоразрушающего инструмента // Проблемы механики горных пород. - Алма-Ата, 1966.- С. 483-486.
- 111.** Эйгелес Р.М. Разрушение горных пород при бурении. - М. Недра. 1971. - 231 с.
- 112.** Эйгелес Р.М., Стрекалова Р.В. Расчет и оптимизация процессов бурения скважин. - М. Недра, 1977. - 200 с.

113. Bingham M.G. Rockdrillability // The Oil & Gas Journal. 2 nov. 1964-22 feb. 1965

114. KINGDREAM. Шарошечные долота для бурения скважин в нефтегазодобывающей промышленности. КНР, // Рекламный проспект компании KINGDREAM. – Китай, 2003. – 54 с.

115. Noble W.B. Rock bit and experimental data // The Oil & Gas Journal. – vol. 46. - № 24. – 1947.

116. Вопияков В.А., Колесников Л.А. и др. Диспетчерское управление буровыми работами / - М.: Недра, 1974. - 216 с.