

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Сибирский федеральный университет»

На правах рукописи



Попова Марина Сергеевна

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ АЛМАЗНОГО БУРОВОГО
ИНСТРУМЕНТА МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД**

25.00.14 – Технология и техника геологоразведочных работ

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

**Научный консультант:
Доктор технических наук
Профессор
Нескоромных Вячеслав
Васильевич**

Красноярск – 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ АЛМАЗНОГО БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА.....	17
1.1 Теоретические основы механизма разрушения горных пород резцами алмазного бурового инструмента.....	19
1.1.1 Типы алмазных резцов, применяемых в бурении.....	19
1.1.2 Основы изучения механизма разрушения горной породы методом внедрения индентора.....	29
1.1.3 Основы исследования механизма разрушения горной породы в процессе бурения.....	33
1.2 Экспериментальные исследования разрушения горных пород с учетом процессов и явлений, возникающих при бурении.....	41
1.3 Проектирование алмазного бурового инструмента методами компьютерного моделирования.....	49
1.4 Анализ технического уровня алмазного бурового инструмента.....	58
ВЫВОДЫ.....	63
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ БУРОВЫМ АЛМАЗНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ С УЧЕТОМ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИЗАБОЙНОЙ СРЕДЫ..	65
2.1 Граничные условия научного исследования.....	65
2.2 Теоретические основы механики разрушения горной породы алмазным резцом с учетом динамических процессов резания- скалывания-раздавливания горной породы и сопротивления призабойной среды.....	67
2.2.1 Исследование механизма разрушения горной породы резцом в	

виде алмазного кристалла.....	77
2.2.2 Исследование механизма разрушения горной породы резцом типа <i>PDC</i>	86
2.3 Влияние коэффициента сопротивления горной породы на глубину резания-скалывания-раздавливания горной породы алмазным резцом.....	92
ВЫВОДЫ.....	102
ГЛАВА 3 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ АЛМАЗНЫМ БУРОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ.....	103
3.1 Исследование механизма разрушения горной породы методом компьютерного моделирования.....	103
3.1.1 Разработка программы моделирования процесса разрушения горной породы алмазным резцом в системе <i>LabVIEW</i>	104
3.1.2 Проверка достоверности и сходимости результатов теоретических исследований, компьютерного моделирования и экспериментальных данных.....	110
3.1.3 Исследование влияния гидродинамических процессов на глубину разрушения горной породы алмазным резцом.....	125
3.1.3.1 Исследование работы резца в виде алмазного кристалла.....	125
3.1.3.2 Исследование работы резца типа <i>PDC</i>	129
3.2. Исследование гидродинамических и гидробарических процессов, протекающих при бурении скважин алмазным инструментом.....	133
3.2.1 Исследование гидробарических процессов, протекающих при разрушении горной породы резцом <i>PDC</i> в системе <i>ANSYS</i>	135
3.2.2 Исследование гидродинамических процессов, протекающих при разрушении горной породы инструментом, армированным алмазным кристаллом.....	142
3.3 Исследование работы группы алмазных резцов.....	154

ВЫВОДЫ.....	160
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕДЫ ПРИ БУРЕНИИ АЛМАЗНЫМ БУРОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ	163
4.1 Производственные исследования сопротивления среды инструменту типа <i>PDC</i>	164
4.2 Лабораторные исследования сопротивления среды инструменту, армированного алмазным кристаллом.....	168
ВЫВОДЫ.....	173
ГЛАВА 5 МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ АЛМАЗНОГО БУРЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА КРИТЕРИЕВ	174
5.1 Метод комплексного анализа критериев экспериментальных данных алмазного бурения.....	175
5.2 Оценка процесса разрушения горной породы на основе комплексного анализа критериев.....	182
5.3 Разработка алгоритма управления алмазным бурением.....	189
ВЫВОДЫ.....	197
ГЛАВА 6 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ ВЫСОКОРЕСУРСНОГО АЛМАЗНОГО БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА.....	199
6.1 Разработка конструкций однослойного алмазного инструмента.....	199
6.1.1 Производственные испытания опытного образца однослойной алмазной коронки с укороченным сектором.....	203
6.2 Разработка бурового инструмента с вооружением повышенной динамизации рабочих элементов.....	205
6.3 Разработка бурового инструмента, армированного резцами <i>PDC</i> вогнутой формы.....	223
ВЫВОДЫ.....	240
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	242
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	245

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Акт использования результатов диссертационной работы при реализации международных грантов	269
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Технический акт испытаний буровых долот на основе <i>PDC</i>	270
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Технический акт производственных испытаний буровой коронки типа БСО-1.....	271

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации. Основные направления развития буровых технологий и, в частности, геологоразведочного бурения связаны с возрастающей потребностью использования алмазного бурового инструмента. Алмазным вооружением производят высокоэффективное бурение горных пород самой различной твердости и абразивности: мягких и средней твердости инструментом с резцами *PDC*, средней твердости и твердых – однослойным, твёрдых и очень твёрдых горных пород импрегнированным буровым инструментом.

Таким образом, алмазным буровым инструментом осуществляется бурение основного объема скважин.

К тому же крайне важным обстоятельством является то, что в настоящее время буровые инструменты создаются преимущественно с использованием синтетического алмазного сырья.

В то же время при бурении твердых горных пород развиваются технологии высокочастотного алмазного бурения коронками с мелкими и средними по размеру резцами. При этом наблюдается ориентация на рост значений величин частот вращения. Так, например, буровые станки последнего поколения, используемые на производстве, способны реализовать очень высокую частоту вращения (1700 и более мин⁻¹).

В данном случае с целью увеличения механической скорости бурения обеспечивается повышенная загруженность вооружения коронок, что сказывается прежде всего на стойкости бурового инструмента. Рост частоты вращения и соответственно линейных скоростей резцов инструмента создает новые и мало изученные особенности механизма разрушения горных пород. Так, например, известно, что возрастающая линейная скорость перемещения резцов бурового инструмента существенно влияет на сопротивляемость горной породы разрушению, которая как правило повышается. Возрастающая скорость приложения разрушающих нагрузок приводит к

некому упрочнению горных пород. В этом случае на практике приходится сталкиваться с тем, что при реализации высоких частот вращения требуется существенная корректировка методики выбора оптимальных параметров технологического бурового процесса.

Совершенствование методики управления углублением скважин с учетом новых тенденций в развитии алмазного бурения актуально в связи с переходом на управление процессом бурения на основе ИТ-программ и современных компьютеров.

При использовании долот и буровых головок с резцами *PDC* для бурения горных пород мягких и средней твердости, характеризующихся невысокими и умеренными частотами вращения, одним из основных требований становится ресурс инструмента из-за все более возрастающей протяженности скважин. Так, например, протяженность нефтегазовых скважин сложного профиля, которые могут решать задачи геологоразведки и исследования свойств горных пород, может составлять несколько и даже более десятка километров. В данном случае требуется анализ условий сопротивления горной породы и призабойной среды с учетом того, что резцы *PDC* имеют достаточно большие размеры и «работают» в режиме различных значений линейных скоростей в зависимости от параметров и места установки в долотах.

Исходя из этого актуальной является задача по реализации аналитических исследований процессов, связанных с разрушением горных пород с учетом высоких значений линейных скоростей перемещения резцов, а именно изучения роста сопротивления пород резанию-скалыванию, процессов формирования зоны разрушения и очистки забоя с учетом геометрии резцов, то есть комплекса факторов, определяющих стойкость инструмента и реализуемую производительность. В данном случае отталкиваясь от самых современных образцов бурового инструмента с учётом новых результатов теоретических исследований актуально провести компьютерное моделирование для выявления наиболее эффективных

решений в области конструирования бурового инструмента и разработки методик управления алмазным бурением.

Таким образом, отмечая, что развитие буровых технологий невозможно без совершенствования буровых инструментов, развитие теории бурения алмазным инструментом с использованием современных систем компьютерного моделирования, направленных на создание более эффективных буровых долот, коронок и головок является задачей актуальной и имеющей очень высокое практическое значение.

Степень разработанности темы. Проблемам алмазного бурового инструмента посвящены труды таких ученых как Башкатов Д. Н., Блинов Г. А., Богданов Р. К., Борисов К.И., Богомолов Р.М., Будюков Ю.Е., Владиславлев В. С., Власюк В. И., Воздвиженский Б. И., Волков С.А., Гореликов В. Г., Горшков Л. К., Закора А.П., Исаев М. И., Киселев А. Т., Козловский Е. А., Копылов В.Е., Корнилов Н. И., Кудряшов Б. Б., Мавлютов М.Р., Масленников И.К., Марамзин А. В., Нескоромных В. В., Онищин В. П., Осецкий А. Н., Остроушко И. А., Пономарев П. В., Попов А.Н., Садыков Г. С., Сериков Д.Ю., Соловьев Н. В., Спирин В. И., Ступак А.И., Сулакшин С. С., Третьяк А.Я., Третьяк А.А., Шамшев Ф. А., Чихоткин В. Ф., Эйгелес Р. М. и др. Известны результаты исследований бурения алмазным инструментом, полученные учеными Северо-Западного университета США под руководством Деменга Че, разработки китайских ученых Ху Ванга, Зенгуан Ванга, Дегуа Ванг и др., французского инженера Алена Бессона (*TotalFinaElf*) совместно с американскими специалистами Брюсом Берр, Скотом Диллардом, Эриком Дрейком, а также многие другие достижения мировых ученых и компаний, внесших значительный вклад в развитие алмазного бурения.

В последнее время в области исследования работы бурового инструмента ведущими компаниями и специалистами активнейшим образом используются методы компьютерного имитационного моделирования. Есть положительные результаты использования интегрированной инженерно-

аналитической системы *IDEAS* и программы моделирования *Yield Point* компании *Smith*, программного продукта *SPOT*TM компании *Varel* и многих других производителей бурового инструмента.

Современные методы материаловедения позволяют искусственно создавать алмазы до 3 мм в диаметре ничуть не уступающие, а в некоторых характеристиках превосходящие природные минералы. Существующие композитные материалы дают возможность комбинировать вооружение режущей поверхности инструмента. В направлении разработки алмазного бурового инструмента и совершенствования его режущих элементов достигнуты результаты и в настоящее время продолжаются работы в Институте сверхтвердых материалов им. Бакуля (Украина), Цзилиньском университете (Китай), в подразделениях компаний: «Газпромнефть» (Россия), *Smith Bits* (США), *Atlas Copco* (Швеция), *Forsun* (Китай), *Boart Longyear* (США), *Ulterra* (США) и т.д.

Цель работы: Разработать методику проектирования конструктивных параметров высокоэффективного алмазного бурового инструмента и алгоритм управления процессом бурения в горных породах различной твердости с использованием систем компьютерного моделирования

Основные задачи работы:

1. Выполнить анализ современного состояния научных исследований и методов проектирования конструктивных параметров алмазного бурового инструмента.
2. Уточнить существующие результаты теоретических исследований механизма разрушения горной породы алмазным буровым инструментом.
3. Установить основные закономерности изменения глубины резания-скалывания горной породы алмазными резцами различных видов в зависимости от сил сопротивления с учетом динамических процессов, возникающих при бурении скважин.

4. Разработать алгоритм управления процессом алмазного бурения с целью повышения его эффективности при полной выработке ресурса алмазного бурового инструмента.

6. Расширить область применения алмазного бурового инструмента, высокий ресурс которого достигается за счет формы резцов, возможности вращения резцов вокруг своей оси, а также комбинирования режущих элементов различного типа.

Идея работы. Эффективное применение при проектировании конструктивных параметров бурового инструмента и параметров управления процессом алмазного бурения результатов теоретических исследований и компьютерного моделирования механизма разрушения горных пород в условиях возникающих сил сопротивления с учётом динамических процессов в призабойной среде.

Предмет исследования: параметры взаимодействия алмазного резца с горной породой с учетом влияния механических, динамических, гидробарических и температурных процессов, возникающих при бурении.

Объектом исследований является система взаимодействия алмазного бурового инструмента с забоем скважины.

Научная новизна диссертационного исследования:

1. Разработан комплексный подход к созданию высокоресурсного алмазного бурового инструмента, заключающийся в теоретическом анализе процессов разрушения горной породы алмазными резцами (*PDC* и алмазные резцы в виде кристаллов) и отличающийся от известных тем, что учтены гидравлические и динамические процессы, сопутствующие бурению, а именно, скорость резания-скалывания горной породы и сопротивление призабойной среды, а также использованы современные методы компьютерного моделирования.

2. Установлена аналитическая зависимость динамической глубины внедрения резца в горную породу от скорости резания-скалывания породы с учётом сопротивления призабойной среды.

3. Установлена аналитическая зависимость коэффициента сопротивления призабойной среды от скорости резания-скалывания горной породы с учётом влияния гидродинамической составляющей процесса на работу алмазных резцов.

4. Разработан метод управления алмазным бурением предназначенный для использования в ИТ-системах, учитывающий зависимость изменения глубины внедрения резца в породу от величины сопротивления призабойной среды и износа резца, а также отличающийся комплексной оценкой таких параметров как механическая скорость бурения, энергоёмкость разрушения горной породы при бурении и величина углубления бурового инструмента за один оборот.

5. Установлено, что повышению ресурса алмазного бурового инструмента с резцами *PDC* способствует применение при его проектировании принципов метода динамизации (вращения резцов) и рационализации формы рабочей поверхности резцов.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 25.00.14 – Технология и техника геологоразведочных работ в областях исследования: Бурение скважин: геологоразведочных, инженерно-геологических, гидрогеологических, геотехнологических, технических и др. (1); автоматизация и управление технологическими процессами геологоразведочного производства (6) технической отрасли наук.

Научная значимость диссертационного исследования заключена в разработке дополнений и уточнений основных теоретических положений механизма разрушения горных пород различной твердости и обосновании комплексного подхода в проектировании конструктивных параметров и эксплуатации алмазного бурового инструмента.

Практическая значимость работы состоит в создании методики анализа процессов разрушения горной породы с учетом множества факторов, в том числе динамики процесса резания-скалывания, которая может найти

применение при проектировании бурового инструмента с алмазным вооружением как с резцами *PDC*, так и в виде кристаллов алмаза, а также в разработке методики управления алмазным бурением, предназначенной для использования в *IT*-системах, учитывающей динамические и гидравлические процессы при разрушении горных пород алмазным буровым инструментом на основе комплексной оценки таких параметров как механическая скорость бурения, энергоёмкость разрушения горной породы при бурении и величина углубления бурового инструмента за один оборот.

Практическая реализация работы.

1. Разработанный учебный курс «Компьютерное моделирование в бурении» внесен в учебный план подготовки специалистов специальности «Технология геологической разведки» в Сибирском Федеральном Университете;

2. Изданные монография и учебник используются в учебном процессе при подготовке специалистов и аспирантов, обучающихся по специальности «Технология геологической разведки».

3. Созданы конструкции буровых инструментов, представленные в виде запатентованных объектов промышленной интеллектуальной собственности, представляющей практический интерес для разработчиков бурового инструмента.

4. Разработаны компьютерные программы *koronka2* (на языке программирования *Delphi*) и *Burenie_almazom03.vi* (*LabVIEW*), позволяющие осуществлять научное исследование механизма разрушения забоя и характера нагрузки алмазного резца в процессе бурения скважины.

Методика выполнения диссертационного исследования основана на проведении анализа предшествующих научных работ и опыта производственного применения алмазного бурового инструмента, аналитических исследованиях механики разрушения горных пород алмазным резцом в сочетании с результатами экспериментальных исследований и

имитационного компьютерного моделирования с последующим сопоставлением всех полученных данных для определения их **сходимости**.

Положения, выносимые на защиту:

1. Влияние на эффективность процесса разрушения горных пород алмазными резцами оказывают явления, связанные с динамическими процессами работы буровых инструментов, которые характеризуются скоростью резания-скалывания и раздавливания породы, сопротивлением призабойной среды и разрушаемой горной породы, а также гидробарическими параметрами.

2. Автоматизированное управление алмазным бурением, основанное на методе, учитывающем зависимость изменения глубины внедрения резца в породу от величины сопротивления призабойной среды и износа резца, а также включающем комплексную оценку таких параметров как механическая скорость бурения, энергоёмкость разрушения горной породы при бурении и величина углубления бурового инструмента за один оборот способно обеспечить рост эксплуатационных результатов.

3. При разработке высокоресурсного бурового инструмента с резцами *PDC* одним из ключевых подходов к методам конструирования может служить принцип динамизации (вращения) буровых резцов, размещаемых по всей его рабочей поверхности, а также за счёт изменения формы торцевой части резцов.

Апробация результатов исследования. Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на: Международном форум-конкурсе «Проблемы недропользования» в Санкт-Петербургском горном университете (Санкт-Петербург, 2016, 2018); XXII Международном симпозиуме им. академика М.А. Усова в Томском политехническом университете (Томск, 2014, 2018); I Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Технологии будущего нефтегазодобывающих регионов» (Сургут, 2018); заседании научного семинара отделения нефтегазового дела Томского

политехнического университета (Томск, 2018); Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы недропользования» в Южно-Российском государственном политехническом университете им. М.И. Платова (Новочеркасск, 2018); Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективны» (Красноярск, 2020, 2021); международной конференции «*International Conference on the Cooperation and Integration of Industry, Education, Research and Application*» (Китай, Цзилиньский университет, Чанчунь, 2020, 2021); заседании научного семинара кафедры технологии и техники геологоразведки Сибирского федерального университета (Красноярск, 2018, 2022); международной конференции «Рассохинские чтения» (Ухта, 2021г.); Международной научно-практической конференции «Булатовские чтения» (Краснодар, 2019, 2021); Международном научно-практическом семинаре «Информационные системы и технологии в геологии и нефтегазодобычи» (Тюмень, 2021); международной научно-технической конференции «Геонауки» (Иркутск, 2021, 2022); X Международной научной конференции «Молодые – Научкам о Земле» (Москва, 2022).

Монография, в которой рассмотрены положения диссертационной работы, отмечена дипломом Лауреата Международного конкурса научных и учебно-методических изданий Российской инженерной академии им. Первопечатника И. Федорова в 2021 г.

Личный вклад соискателя заключается в проведении аналитических исследований; участии в разработке конструкций бурового инструмента; построении моделей, постановке и проведении компьютерного моделирования в системе ANSYS; руководстве работами по написанию компьютерных программ *koronka2_v.2.7* и *Burenie_almazom03.vi*, проведении моделирования в разработанных программах; анализе полученных результатов моделирования и их статистической значимости; в участии при проведении опытных испытаний, обработке данных и формулировке

основных выводов и рекомендаций, результаты которых приведены в диссертации.

Публикации. Автором опубликовано 90 научных работ, в том числе: 14 учебно-методических пособий, 1 учебник, 1 монография, 1 учебное пособие, 12 патентов (в соавторстве). **По теме диссертации** опубликовано 39 работ из них 13 статей в изданиях, входящих в реферативную базу *Scopus* и *Web of Science*; 8 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ; 6 научных статей в других изданиях. Основные технические и технологические решения защищены 11 патентами на изобретение и полезную модель.

По результатам диссертационной работы издана 1 монография, составлен раздел учебника.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, выводов, заключения и списка литературы. Работа изложена на 272 странице машинописного текста, содержит 92 рисунка, 9 таблиц, список литературы из 195 наименований и 3 приложения.

Работа выполнена в рамках международного сотрудничества. Результаты исследований диссертационной работы были использованы и послужили основой при реализации грантов (проектов): «Исследование импрегнированных алмазных долот, усиленных дисперсией наноматериалов» (Департамент образования провинции Цзилинь, Китай); «Биомиметический дизайн и механизм упрочнения поликристаллических алмазных компактов для бурения твердых пород» (Национальный фонд естественных наук Китая); «Разработка научных и технологических основ создания двухслойных алмазосодержащих элементов и крупных термостойких монокристаллов алмаза для породоразрушающего и металлообрабатывающего инструмента резцовой типа» (Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля, Украина).

Авторская благодарность и признательность. Автор выражает благодарность специалистам Цзилиньского университета (Чанчунь, Китай), в

особенности профессору Лиу Баочанг за обмен опытом и сотрудничество; к. т. н., *LabVIEW*-разработчику, инженеру ООО «Витэк-Автоматика» Харитонову А. Ю. за помощь в разработке программного обеспечения *Burenie_almazom03.vi*; к. т. н., специалисту Института сверхтвердых материалов им. Бакуля (г. Киев, Украина) Закоре А. П. за предоставление информации, обмен опытом и изготовление образцов коронок, д.т.н., профессору Соловьеву Николаю Владимировичу за помощь в подготовке работы к защите.

Автор выражает искреннюю признательность научному консультанту, д.т.н., профессору Нескоромных Вячеславу Васильевичу за развитие научных взглядов, профессиональное курирование и ценные советы.

Глава 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ, МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ АЛМАЗНОГО БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА

В настоящее время применение алмазного бурового инструмента составляет более 60% всего бурения России. Речь идет о коронках, долотах и буровых головках, армированных резцами, в состав которых входит синтетический алмаз. Это однослойный, импрегнированный инструмент и инструмент типа *PDC*. В производстве алмазный инструмент в основном применяется при вращательном способе бурения в породах от III до XII категории по буримости. Современные конструкции буровых снарядов все чаще оснащаются деталями, армированными породоразрушающими алмазными вставками или покрытые алмазным напылением. Помимо породоразрушающего инструмента, это могут быть расширители, колибраторы, центраторы, переходники и т.д. К тому же все существующие снаряды типа ССК (снаряды со съемным керноприемником) имеют в своем составе только алмазную коронку. Мировые производители бурового инструмента представляют линейку алмазного бурового инструмента от 5 до 10 типов в зависимости от области применения. Каждый из типов имеет определенные показатели твердости и износостойкости матрицы, крупности и качества алмазного сырья и т.д. Представляя свою продукцию, производители алмазного бурового инструмента, презентуют его как надежный, долговечный, высокоинженерный и высокотехнологичный тип бурового инструмента.

За долгое время эксплуатации в различных отраслях горной промышленности алмазный буровой инструмент зарекомендовал себя как эффективный, обладающий высоким ресурсом, и способный развивать достаточно большие скорости бурения, что отвечает практически всем производственным требованиям.

Алмазный буровой инструмент всегда считался востребованным при сооружении скважин различного назначения, при этом развитие методов его проектирования до сих пор является острой необходимостью. В основе проектирования конструкций любого бурового породоразрушающего инструмента лежат знания об особенностях его эксплуатационных возможностей в процессе бурения. Исследование работы алмазного бурового инструмента затрудняется прежде всего размерами изучаемой системы, такой инструмент обладает самым мелким, из возможных, резцом – алмазом. При этом именно характер взаимодействия алмазного резца с разрушаемой породой определяет качество результата буровых работ.

Над проблемами алмазного бурения работали такие ученые как Башкатов Д. Н., Блинов Г. А., Богданов Р. К., Борисов К.И., Богомоллов Р.М., Будюков Ю.Е., Владиславлев В. С., Власюк В. И., Воздвиженский Б. И., Гореликов В. Г., Горшков Л. К., Закора А.П, Исаев М. И., Калинин А. Г., Киселев А. Т., Ключанский Г. В., Козловский Е. А., Корнилов Н. И., Кудряшов Б. Б., Марамзин А. В., Нескоромных В. В., Онищин В. П., Осецкий А. Н., Остроушко И. А., Пономарев П. В., Попов А.Н., Садыков Г. С., Сериков Д.Ю., Соловьев Н. В., Спирин В. И., Сулакшин С. С., Третьяк А.Я., Третьяк А.А., Цыпин Н. В., Шамшев Ф. А., Чихоткин В. Ф., Эйгелес Р. М. и многие другие [2-110]. Известны результаты исследований алмазного бурового инструмента полученные учеными Северо-Западного университета США под руководством Деменга Че, разработки китайских ученых Ху Ванга, Зенгуан Ванга, Дегуа Ванг и др., сотрудников университета Цзилинь, французского инженера Алена Бессона (компания *TotalFinaElf*) совместно с американскими специалистами Брюсом Берр, Скотом Диллардом, Эриком Дрейком, а также многие другие достижения мировых ученых и компаний, внесших значительный вклад в развитие алмазного бурения.

Особый вклад в разработку конструкций алмазного бурового инструмента внесли такие компании мирового значения как «Газпромнефть» (Россия), *Smith Bits* (США), *Atlas Copco* (Швеция), *Forsun* (Китай), *Boart*

Longyear (США), *Ulterra* (США) и многие другие авторитетные производители.

1.1 Теоретические основы механизма разрушения горных пород резцами алмазного бурового инструмента

Согласно результатам многочисленных исследований алмазного бурового инструмента [2-120], основными факторами, оказывающими влияние на эффективность его работы, являются схема размещения, геометрия ориентации, размеры и форма породоразрушающих элементов. Не менее важным при этом является характер и сила воздействия резца на породу, а также сопутствующие разрушению забоя процессы, возникающие при бурении.

Как известно лишь рассмотрение всех факторов в совокупности позволяет дать точную оценку состояния системы. При разработке алмазного бурового инструмента такой системой исследования является конструкция породоразрушающего инструмента-алмазный резец-горная порода с учетом всех процессов, сопутствующих бурению. Функционирование описанной системы исследования есть ничто иное, как механизм разрушения горной породы.

1.1.1 Типы алмазных резцов, применяемых в бурении

Говоря об алмазном резце, следует отметить основные признаки, отличающие его от других типов режущих элементов, применяемых в бурении. Алмазным считается резец, в состав которого входит алмазное сырье или собственно алмазный кристалл. Прежде всего, такой резец обладает высокой твердостью и прочностью. Твердость алмаза может превышать твердость металлического сплава в 4-5 раз. Такое сочетание свойств, способствует повышенной режущей способности алмаза как резца.

Высокая износостойкость – еще одно важное преимущество алмазного резца. Показатели коэффициента трения алмаза низкие (0,1 по металлу) поэтому он достаточно устойчив к истиранию. Как показывает практика применения алмазного инструмента, его ресурс в разных условиях может достигать от нескольких десятков и сотен до тысячи и более метров.

Негативным для алмаза является воздействие повышенной температуры и ударных нагрузок. Чрезмерное увеличение температуры алмазов чревато их плавлением, в то же время хорошая теплопроводность алмазного сырья способствует отведению тепла от контакта трения резца о породу. В случае урегулирования этих двух свойств, применение алмазного резца будет на много выигрышнее, чем менее теплопроводного твердого сплава.

Таким образом, главной проблемой применения алмаза в качестве резца является его хрупкость, именно поэтому в основном алмазный буровой инструмент применяется при вращательном способе бурения. Однако использование алмазного напыления успешно применяется и при ударно-вращательном, ударном способе.

Первый алмазный буровой породоразрушающий инструмент был изготовлен из природного алмаза. Это были технические алмазы – борты, балласы, карбонадо (карбонаты, черные алмазы), конго. Из природных алмазов представляющих собой неправильные сростки до сих пор изготавливают порошки. Минералы, которые представляют собой кристаллы, используют как отдельный резец овальной формы. Однако, добыча природного алмаза – долгий, дорогостоящий процесс. Поэтому в последнее время в качестве резцов бурового инструмента практически не применяют даже некачественный технический алмаз.

Современные достижения в синтезе алмаза значительно облегчили создание породоразрушающего бурового инструмента. Появилась возможность осуществлять синтез алмазного кристалла ничуть не уступающего, а иногда даже превосходящего, по прочностным

характеристикам природный [11, 18, 23, 42, 43, 45, 87, 111, 114]. Современные методы материаловедения позволяют синтезировать алмаз любого размера и вида. Синтетический алмаз в отличие от природного обладает однородностью, изотропностью состава и может иметь правильную форму с чётко выраженными гранями [11, 23]. Такие преимущества синтетического алмазного резца обеспечивают не только более высокие режущую способность и ресурс при бурении, но и облегчают процессы научных исследований особенностей его работы.

К серийным синтетическим алмазным порошкам, применяемым в бурении, выдвигаются требования по зернистости, зерновому составу, прочности и однородности. Зернистость таких алмазов составляет от 2500/1600 до 63/40 мкм [11, 23]. При изготовлении бурового инструмента алмазные порошки, в зависимости от размера, используют для армирования матрицы импрегнированного инструмента, в качестве абразивного покрытия или для получения, путем спекания, резцов в виде поликристаллических пластин.

Поликристаллические алмазы могут получать и из углеродосодержащего вещества со значительным количеством катализатора под воздействием высокого давления и высокой температуры. Такие алмазы представляют собой цилиндрические зерна, отличающиеся хорошей прочностью и стойкостью к термическим ударам.

Монокристаллические синтетические алмазы могут изготавливаться заданной прочности и зернистости (путем регулирования температуры и давления спекания). На практике такое синтетическое алмазное сырье отличается своей долговечностью и износостойкостью.

В Институте сверхтвёрдых материалов им. В. Н. Бакуля Национальной академии наук Украины давно ведется работа по синтезу крупных алмазных монокристаллов, отличающихся своими полезными свойствам (рис. 1.1) [11, 18, 23, 42, 43, 45, 87, 111, 114]. К примеру, осуществлен синтез алмазных монокристаллов зернистостью 1600/1250 мкм с повышенной

термостойкостью. Такие алмазы выдерживают температуру до 1150 °С, что дает возможность использовать их в качестве резцов однослойных алмазных коронок. А учитывая прочность и размеры полученных алмазов, применять такой инструмент можно для бурения скважин в породах V-VIII с пропластками до IX категории по буримости [23; 42; 43; 45; 53; 61; 64; 82; 154].

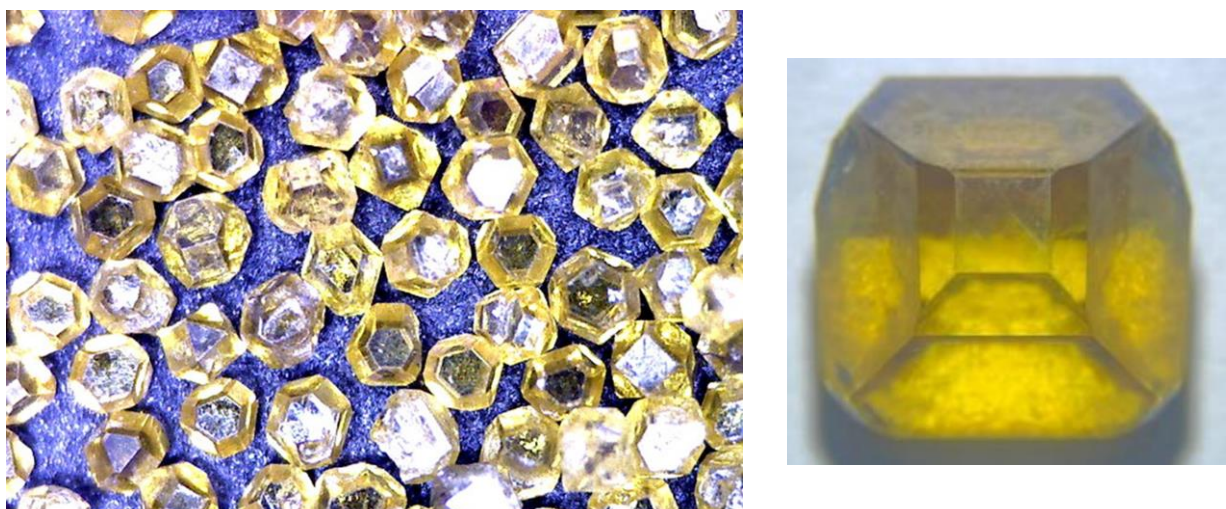


Рисунок 1.1 – Синтетические алмазные монокристаллы

Кристаллы алмаза могут иметь форму ромбододекаэдра, октаэдра или куба (рис. 1.2). Как отмечают специалисты [18; 23; 25; 82; 154], из-за такой формы алмазные кристаллы в разных частях имеют неодинаковую прочность и твердость, что необходимо учитывать в случае использования необработанного алмаза в качестве режущего элемента бурового инструмента. На рисунке 1.2 показаны результаты исследования [23] анизотропии алмаза различной формы по твердости. В различных направлениях плоскостей алмаз имеет различную твердость. Стрелками отмечено направление наибольшей твердости кристалла, откуда рекомендацией исследований [23] является ориентация алмазных кристаллов в породоразрушающем инструменте наиболее прочной его частью по направлению движения резца, т.е. так, чтобы при внедрении его в горную

порodu наибольшее сопротивление воспринималось плоскостью проходящей в направлении наибольшей твердости.

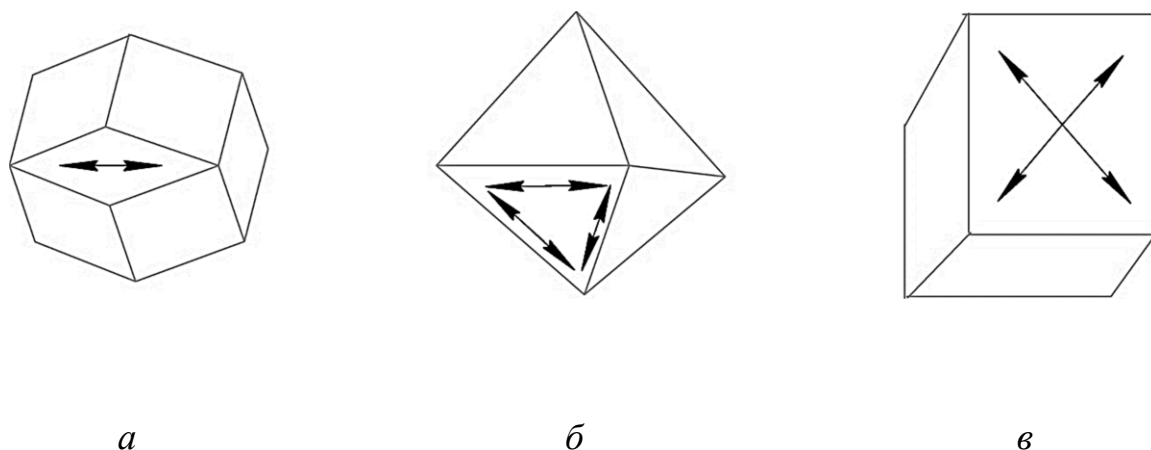


Рисунок 1.2 – Формы кристаллов и направления векторов твердости [23]

В работе [23] выделены основные требования к армированию бурового инструмента крупным алмазом, из которых наиболее интересны для дальнейшего исследования следующие:

1. надежно ориентирование октаэдрического алмаза под небольшим отрицательным углом, т.к. усилие резания направлено почти перпендикулярно к плоскости октаэдра. К тому же направление износа направлено в плоскости высокого сопротивления истиранию, что также способствует снижению потери алмазов;
2. по режущей способности и потери кубическая форма алмаза обладает преимуществом над октаэдрической. Ориентирование такой формы должно осуществляться под положительным углом грани куба при ведущем положении угла или вершине куба [23].

Однако при изготовлении бурового инструмента ориентация алмазов весьма затруднительный процесс и возможен лишь в случае использования крупных кристаллов (например, зернистостью 1600/1250 мкм).

На сегодняшний день размеры синтетического алмазного монокристалла в диаметре могут достигать до 3 мм (рис. 1.3) [11; 12; 45; 82; 154].

При этом синтетический алмаз легко поддается обработке, что позволяет изменять состояние его поверхности. Алмаз овализируют, гранулируют, полируют, дробят и т.д. В результате чего производители бурового инструмента имеют три основные формы алмазов: овализованный, полированный и необработанный (дробленый).

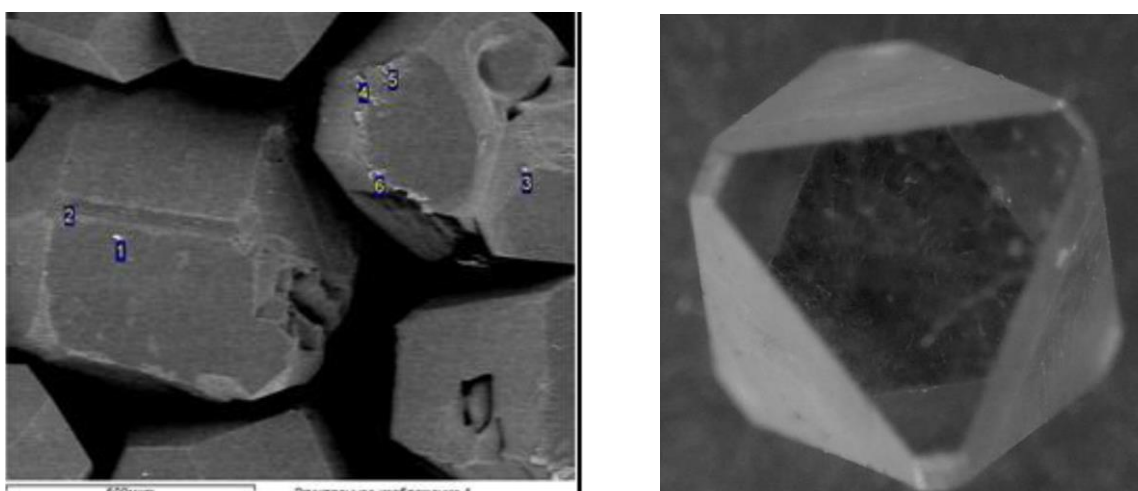


Рисунок 1.3 – Синтетический алмазный монокристалл диаметром 3 мм (снимки электронного микроскопа) [154]

Еще одним достижением синтеза является возможность производства режущих элементов из композиционного материала различного состава, включающего алмазное сырье, т.е. из сверхтвёрдого материала, обладающего различными свойствами. Такой, например, известный материал как Славутич состоит из спеченной шихты твердосплавной основы и алмазного порошка. Благодаря разработанным учеными ИСМ НАН Украины условиям его изготовления, Славутич не уступает в износостойкости крупным природным алмазам, но при этом превосходит их по прочности.

Спеканием либо прессованием поликристаллических алмазов получают резцы *PDC* (*polycrystalline diamonds cutters*). Их основой является жесткий

каркас из сросшихся алмазных зерен. Аналогом резца *PDC* считается пластина АТП (алмазная твердосплавная пластина). Как правило, состоят такие резцы из слоя алмазов 1, твердосплавной подложки 2 и корпуса резца 3 и имеют цилиндрическую форму (рис. 1.4, *а*). Резцы *PDC* по сравнению с синтетическими алмазами являются менее прочными, но при этом способны выдерживать большие динамические нагрузки.

При этом *PDC* могут изготавливать как пластины различного качества (например *Stratapax*TM), а также иметь разнообразную форму, что расширяет их область применения. В зависимости от твердости разрушаемой породы *PDC* ориентируют в буровом инструменте с величиной отрицательного переднего угла γ_n в пределах от $0-5^\circ$ до -25° [7; 11; 13; 28]. Чем большей твердостью обладает порода тем передний отрицательный угол должен быть больше [4; 8; 11; 23; 67; 89].

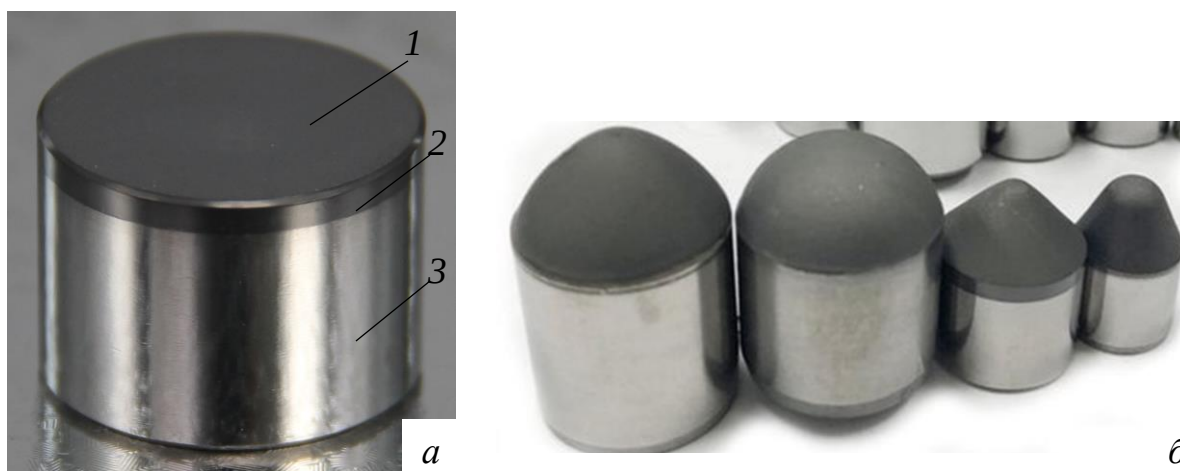


Рисунок 1.4 – Поликристаллические алмазные резцы *PDC*: *а* – круглый плоский *PDC* (1 – поликристаллические алмазы; 2 – подложка из твердого сплава; 3 – корпус резца); *б* – возможные формы

Геометрия *PDC* также влияет на результативность работы бурового инструмента. Резцы *PDC* в форме эллипса по сравнению с резцами круглой формы имеют более высокие значения контактных напряжений в породе и более высокие показатели величины заглубления в породе. Поэтому такую

форму применяют при бурении твердых горных пород, и согласно известным данным [179; 184], применение резца эллипсовидной формы позволяет достичь положительных результатов при наименьших значениях осевой нагрузки. При этом из имеющихся форм резца *PDC* – круглой, приостренной и конической, наибольшие напряжения возникают под резцами конической формы. Резцы конической формы рекомендуются для раздавливания твердой горной породы. Плоские круглые резцы используют для разрушения горных пород средней твердости и мягких.

Развитие возможностей изготовления породоразрушающих элементов позволяет помимо изменения их форм и размеров изготавливать алмазные резцы особого назначения. К примеру, термически стабильных алмазов *TSD* (термоустойчивый поликристаллический алмаз) (рис. 1.5).

Компания *Atlas Copco* выпускает резцовые коронки, вооруженные поликристаллическими алмазными вставками *Diapax* и *Tripax*. Элемент *Diapax* выполнен в виде пластины с нанесенным слоем алмазов толщиной 0,5 мм, а *Tripax* – в виде треугольных или квадратных блоков-резцов.

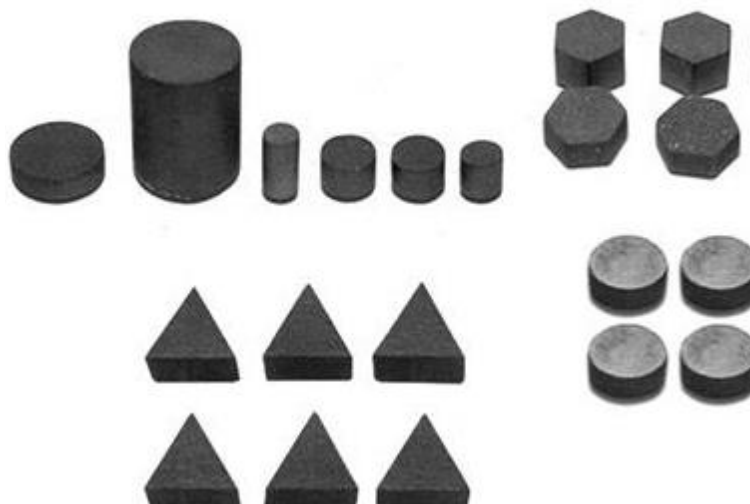


Рисунок 1.5 – Возможные формы *TSD*

Такое разнообразие алмазных резцов расширяет возможности производителей бурового инструмента. Так разработчиками компании *Smith Bits* был внесен большой вклад в создание развитой комбинированной

системы вооружения. Созданные ими долота *Kinetic* в импрегнированных лопастях помимо резцов *TSD*, содержат цилиндрические вставки *GHI 2*, которые представляют отдельный интерес (рис. 1.6, *а*). Вставки *GHI 2* изготовлены из материала представляющего собой комбинацию алмазных кристаллов и порошка карбидо-вольфрама (рис. 1.6, *б*).

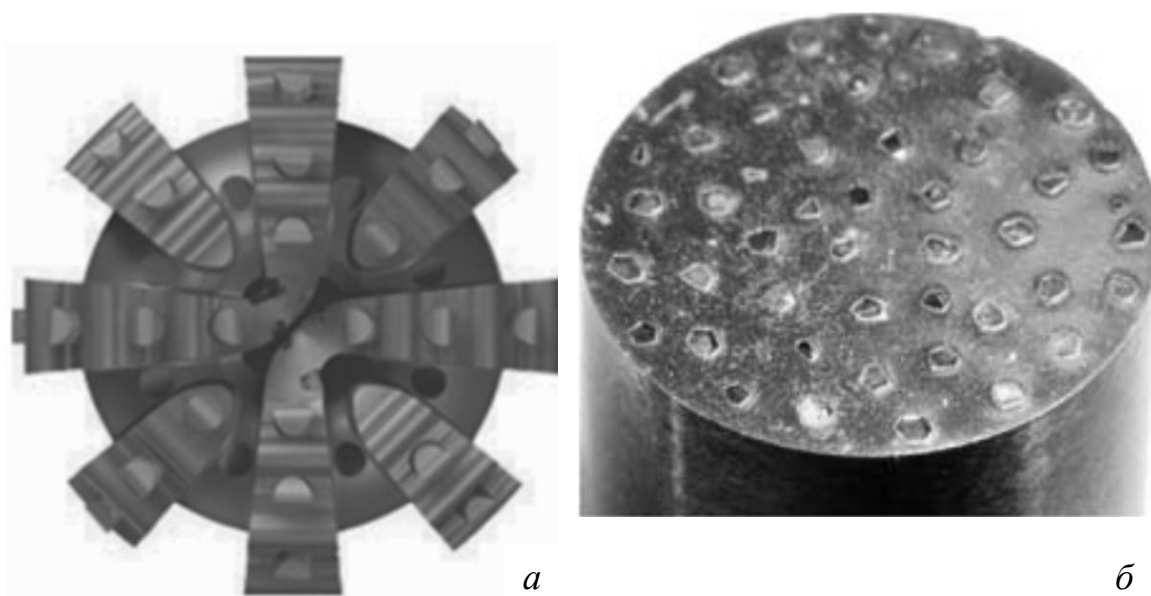


Рисунок 1.6 – Режущие элементы долота *Kinetic*: *а* – общий вид с торца; *б* – вставка *GHI*

Такой состав позволяет резцу в процессе бурения реализовывать способность самозатачивания. При этом связующий материал лопасти долота в зависимости от абразивности разрушаемых пород истирается и таким образом оголяет новый алмазный резец, впрессованный во вставку. Твердость матрицы регулируется составом шихты согласно абразивности перебуриваемых пород, что повышает качество проводимых работ, ресурс инструмента и расширяет область его применения. Актуальность и перспективность комбинированного вооружения было подтверждено результатами практического применения долот *Kinetic*, где данный тип бурового инструмента зарекомендовал себя как эффективный при бурении пород различной твердости. При этом реализуется возможность

осуществления различных способов разрушения породы: лопастями – резание по мягким породам, крупными вставками – резание-скалывание горных пород средней твердости и мелкими алмазами – истирание твердых горных пород.

Итак, современному проектированию бурового инструмента доступно большое разнообразие алмазных резцов и возможности их сочетания. При этом существует общее правило: крупными алмазными резцами армируют однослойный породоразрушающий инструмент, а мелкими – импрегнированный. В зависимости от особенностей размещения и размеров алмазов в буровом инструменте, меняется характер воздействия его на горную породу. Поэтому крупные алмазные резцы применяют при разрушении мягких пород, они реализуют резание-скалывание горной породы. А инструмент, армированный мелкими алмазными элементами, применяют для реализации истирания и микрорезания, т.е. в более твердой горной породе [2; 6; 8]. Овализованные и полированные алмазы в основном разрушают породу раздавливанием, необработанные алмазы с острыми гранями – резанием-скалыванием. В случае установки алмазного резца наиболее твердыми гранями в направлении резания эффективность разрушения породы повышается. Алмазы в виде пластин, цилиндрические *PDC* используются при бурении в упруго-хрупких и хрупких твердых горных породах, реализуя скалывание породы.

Исходя из доказанного влияния формы и размера резца на характер разрушения породы, очевидно, что изнашиваясь в процессе бурения алмаз, меняя свою форму, работает по-другому, что следует учитывать при эксплуатации инструмента.

1.1.2 Основы изучения механизма разрушения горной породы методом внедрения индентора

Учитывая форму алмазного резца, многие научные работы, посвященные изучению разрушению породы, рассматривают его как индентор определенного вида. Исходя из анализа существующих алмазных резцов можно выделить три основные группы:

1. Цилиндрические – имеющие правильную форму;
2. Дробленные – необработанные, отличающиеся наличием острых граней;
3. Округлые – овализированные и полированные алмазы.

Исходя из предложенной классификации, исследование взаимодействия резца с породой было заменено на внедрение в породу индентора – цилиндра с плоским торцом; сферы или конуса.

Л. А. Шрейнер был одним из первых, кто представил и описал схему взаимодействия индентора с породой при постепенном увеличении нагрузки, прикладываемой к индентору. Предложенная схема является основой для многих последующих научных исследований работы алмазного инструмента на забое скважины [158; 160], которые положили начало изучения механизма разрушения породы алмазным резцом.

На рисунках 1.7, 1.8, 1.9 приведены схемы механизма разрушения горной породы различными инденторами (с плоским торцом; в форме сферы и конуса соответственно), принятые как базовые при аналитических исследованиях [2; 6; 11; 15; 25; 32; 34; 37; 46; 49; 66; 68; 69; 80; 93; 94; 115; 138; 144; 149; 146], всестороннее изучение которых позволило получить большое количество важных для проектирования бурового инструмента результатов.

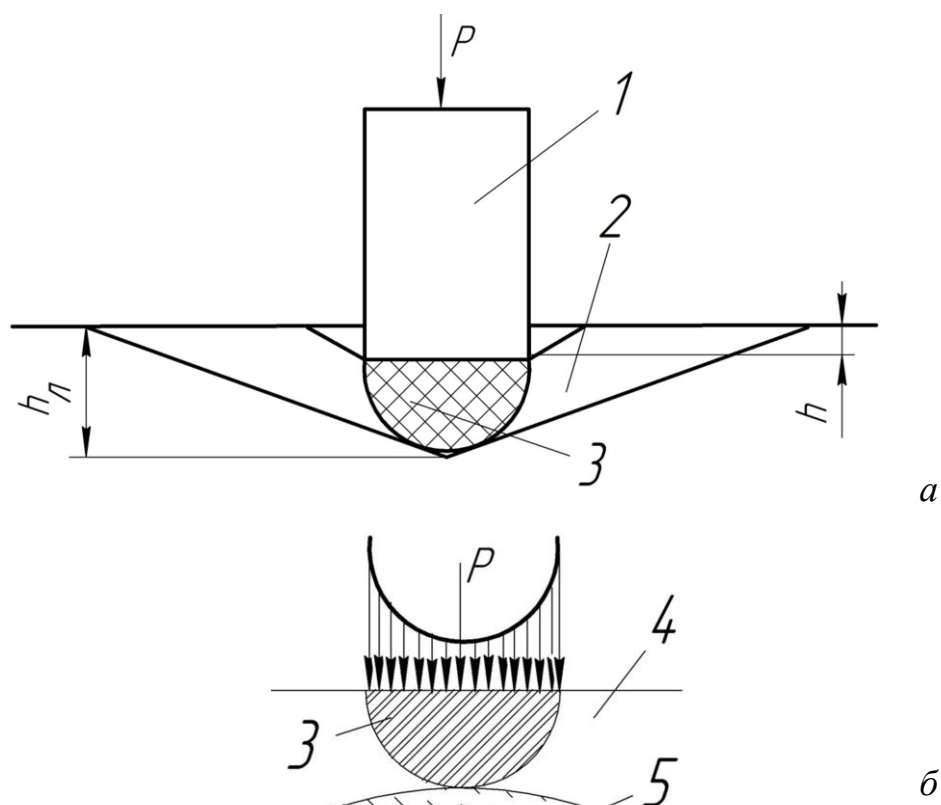


Рисунок 1.7 – Разрушение горной породы при вдавливании индентора с плоским торцом: *а* – схема механизма разрушения; *б* – эпюра напряжения; 1 – индентор; 2 – лунка разрушения; 3 – ядро сжатия; 4 – область растяжения; 5 – область сложно-напряженного состояния

В зависимости от формы индентора даже в случае приложения одинаковой нагрузки наблюдается различная схема распределения напряжений в области его контакта с породой (рис. 1.7, б и рис. 1.8, б) [6; 9; 74; 94]. При этом выделяются общие черты разрушения горной породы методом вдавливания индентора.

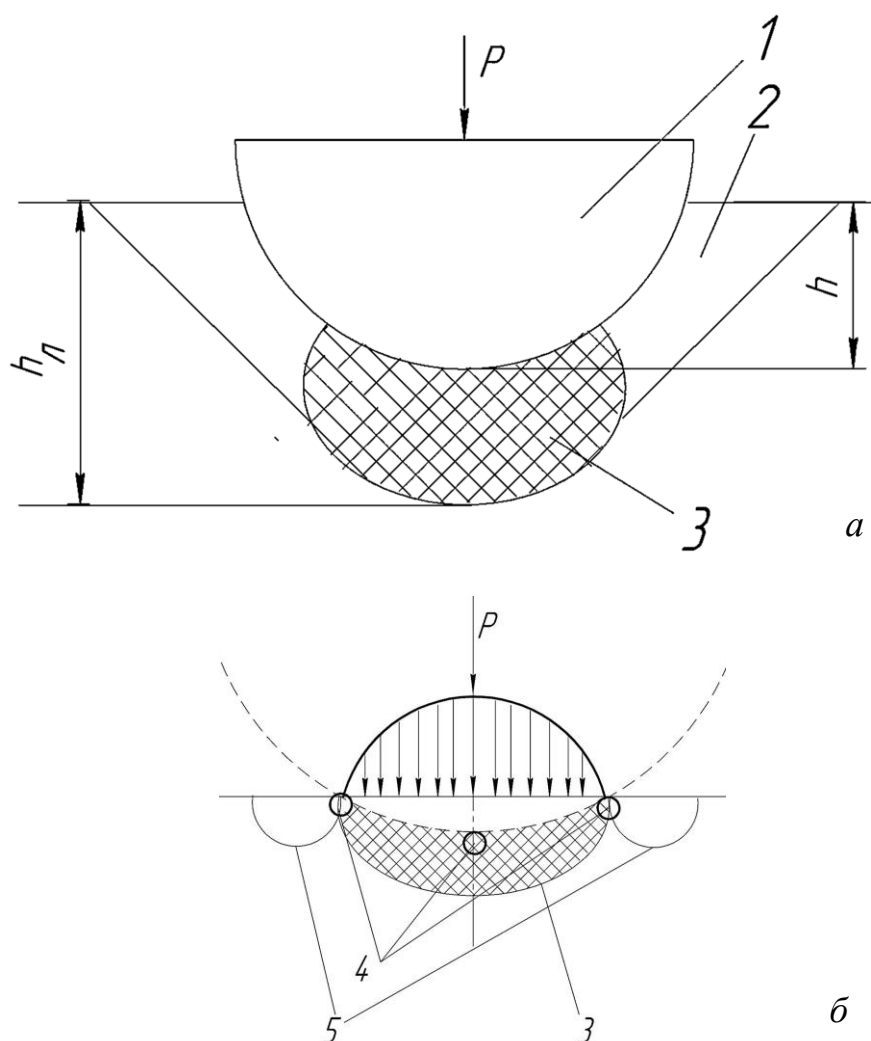


Рисунок 1.8 – Разрушение горной породы при вдавливании индентора в виде сферы: *а* – схема механизма разрушения; *б* – эпюра напряжений; 1 – индентор; 2 – лунка разрушения; 3 – ядро сжатия; 4 – область максимальных касательных напряжений; 5 – кольцевые трещины отрыва

Под индентором, по мере внедрения его в породу, образуются зоны сжатия, растяжения или пластической деформации. Так, независимо от формы индентора, под ним возникает ядро сжатия горной породы 3 (рис. 1.7; 1.8; 1.9). По контуру индентора распространяется область максимальных касательных напряжений и выделяется участок скалывания породы [74; 94]. С ростом нагрузки площадь контакта индентора с породой увеличивается. При этом лунка разрушения породы может превышать глубину внедрения индентора, что в определенной мере зависит от физико-механических свойств горной породы [32; 74; 75; 94; 143; 144; 149; 156; 158].

В тоже время, форма индентора оказывает влияние на множество факторов разрушения и должна соответствовать свойствам горной породы. Так, сфера в начальный момент взаимодействия с породой имеет наименьшую площадь контакта и выдерживает достаточно большие нагрузки чем клин. Поэтому при вдавливании в твердую породу более прочной является сферическая форма индентора. А при вдавливании в более мягкую – клин, который даже при отсутствии нагрузки имеет контакт с породой в виде линии.

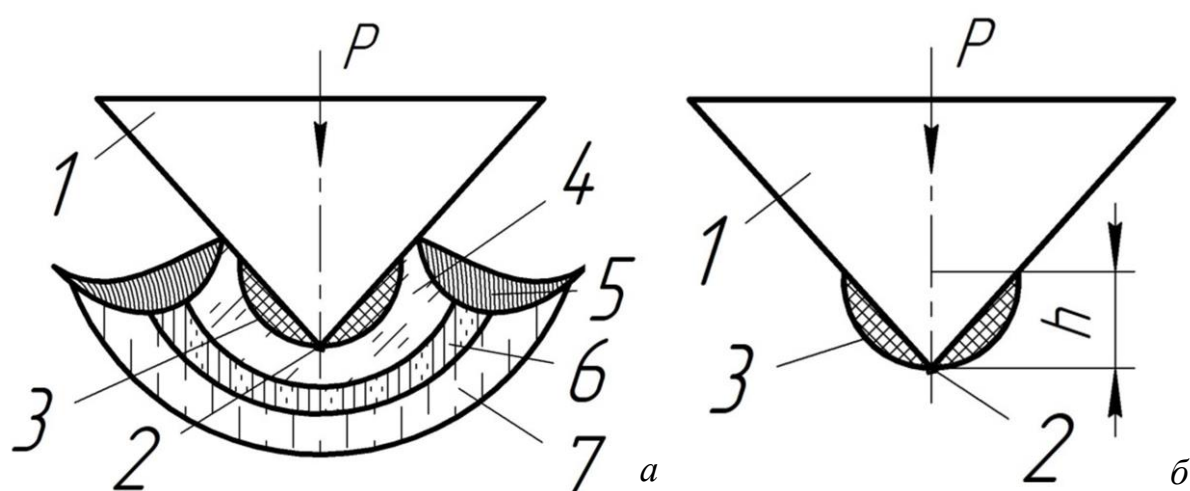


Рисунок 1.9 – Разрушение горной породы при вдавливании индентора в виде сферы: *а* – схема механизма разрушения; *б* – эпюра напряжений; 1 – индентор; 2 – концентрация напряжений; 3 – ядро сжатия; 4 – область максимальных касательных напряжений; 5 – кольцевые трещины отрыва

В работе [74; 94; 146] установлено, что при прочих равных условиях энергоемкость разрушения породы выше в случае применения сферического индентора, чем в случае применения индентора с плоским торцом. При этом сопротивление породы будет одинаково если площадь контакта инденторов с породой равна и не меняется по величине. Для инденторов с заостренным концом сопротивление будет зависеть от угла приострения внедряемой части, с увеличением которого сопротивление будет расти [74]. Чем меньше размер индентора, тем сопротивление породы его внедрению меньше [74].

Все перечисленные результаты получены при реализации разрушения породы методом вдавливания индентора путем постепенного наложения на него осевой нагрузки. Отдельное внимание в работах [74; 94] уделено скорости наложения нагрузки на индентор. В результате определено, что эффективное разрушение породы возможно при условии, если время наложения нагрузки индентором на породу будет соответствовать времени, в течении которого напряжения в породе достигнут величины необходимой для ее разрушения [74; 94]. При этом большие нагрузки способствуют меньшему периоду времени разрушения породы.

Таким образом, выделены основные направления изучения процесса разрушения горной породы резцом при вдавливании: форма резца, размер, угол приострения, скорость наложения нагрузки и качества резца соответствие виду разрушаемой породы. Однако, учитывая систему сил, возлагаемую на алмазный буровой инструмент в процессе бурения скважин, изучение разрушения породы алмазным резцом на основе метода внедрения индентора является крайне ограниченным, не учитывающим основные процессы и явления сопутствующие бурению.

1.1.3 Основы исследования механизма разрушения горной породы в процессе бурения

Алмазный буровой инструмент чаще применяется при реализации вращательного способа бурения. В таком случае на алмазный резец помимо осевого оказывает влияние тангенциальное усилие. При этом кроме фактора формы, следует учитывать особенности ориентирования резца в инструменте, что во многом влияет на площадь контакта и как следствие на характер взаимодействия резца с породой. Таким образом, схема механизма разрушения горной породы алмазным резцом в процессе бурения усложняется дополнительными силовыми и геометрическими составляющими.

В известных работах [6; 9-11; 19; 20; 23; 25; 29; 33; 73; 94] алмазный резец рассматривается в виде шара (если изучается алмазный кристалл) или цилиндра (если изучается резец типа *PDC*).

Согласно результатам аналитических исследований [29; 34; 37; 39; 66; 67; 143; 146], при разрушении горной породы алмазным резцом в процессе бурения перед его режущей гранью в породе возникают сжимающие напряжения, а на противоположной стороне – напряжения растяжения. Поэтому порода в пределах контакта с резцом может находиться в различном состоянии: разрушенная до состояния шлама, смята, ослабленная трещинами, образовавшимися в результате силового воздействия резца и т.д. (рис. 1.10).

При этом крутящий момент на алмазе расходуется не только на разрушение породы, но и на преодоление сил сопротивления и трения [24]:

$$F_p = \mu_k + P \cdot f, \quad (1.1)$$

где μ_k – коэффициент сопротивления перемещения резцов; f – сила трения; P – осевая нагрузка.

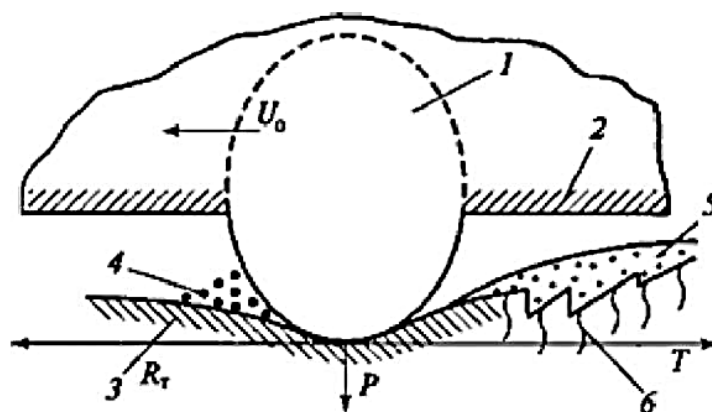


Рисунок 1.10 – Разрушение горной породы алмазным резцом в форме шара в процессе бурения: 1 – алмаз; 2 – матрица; 3 – горная порода; 4 – буровой шлам; 5 – смятая порода; 6 – горная порода, ослабленная трещинами

В тоже время в зависимости от величины прикладываемых усилий (осевого и тангенциального) меняется характер воздействия резца на породу и картина состояния породы под резцом. Согласно аналитическим

исследованиям [94] осевое и тангенциальное усилия, прикладываемые к резцу, порождают результирующее усилие R , которое собственно и является режущим (рис. 1.11). Как показывают результаты научных работ [94] направление усилия R определяет местоположение и размер ядра сжатия породы.

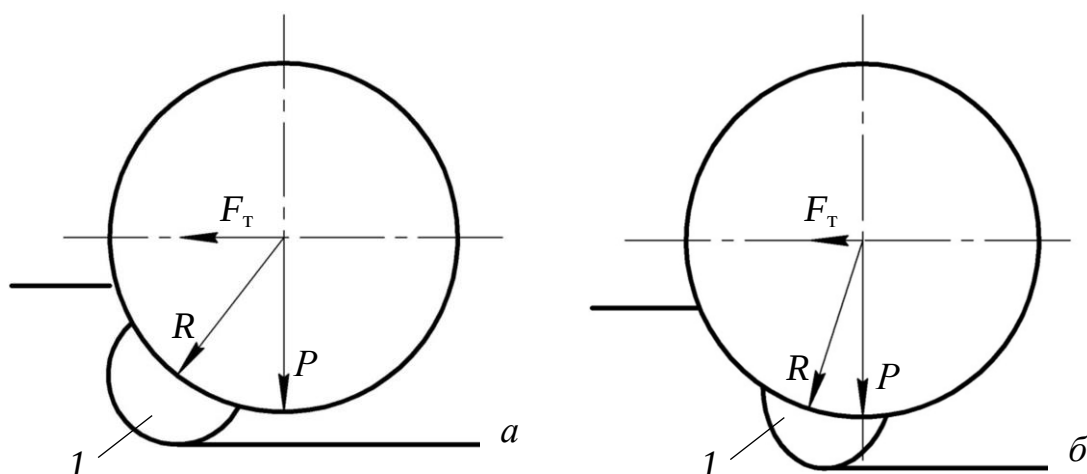


Рисунок 1.11 – Схема механизма разрушения горной породы алмазным резцом шарообразной формы: a – ядро сжатия на передней грани резца; $б$ – ядро сжатия под резцом; 1 – ядро сжатия породы; P – осевая нагрузка; F_t – тангенциальное усилие; R – результирующее усилие

Как показывают результаты научных работ [94], если тангенциальное усилие равно или больше осевого, ядро сжатия располагается на передней грани резца, если тангенциально усилие меньше осевого – под резцом. Данное утверждение указывает на возможность изменения эффективности разрушения горной породы путем регулирования величины наложения на резец сил.

При этом результаты анализа механизма разрушения [94] позволили вывести формулу, определяющую возможную величину глубины внедрения резца в породу:

$$h = r - \sqrt{r^2 - \frac{P - F_t \cos \gamma_n \sin \gamma_n}{\pi P_{ш}(1 + \tan \varphi)}}, \quad (1.2)$$

где r – радиус алмазного резца; P – осевое усилие; $P_{\text{ш}}$ – прочность породы по штампу; φ – угол внутреннего трения породы; $\gamma_{\text{п}}$ – передний угол резца.

А также формулу значения глубины лунки разрушения:

$$h_{\text{л}} = 0,25 \cos \alpha (2h + \sqrt{dh}), \quad (1.3)$$

где α – угол между вектором осевого усилия P и результирующим усилием R , который будет изменяться в зависимости от распределения системы сил на резец (рис.1.11); d – диаметр алмаза.

Аналитические исследования [11; 39; 83; 94; 144; 157] установили, что в случае применения для разрушения породы резцов типа *PDC* результаты зависят не только от величины тангенциального и осевого усилия, но и от ориентации каждого *PDC* в буровом инструменте. При этом направление распространения ядра сжатия определяет режим разрушения горной породы.

Случай, когда сила R ориентирована под прямым углом к плоскости цилиндрического резца, приводит к концентрации ядра сжатия породы на его передней режущей грани. В работах [90; 94] такая схема распределения сил определяется как установившийся режим разрушения горной породы. При этом глубина резания-скалывания породы h не изменяется и равна глубине внедрения резца в забой (рис. 1.12, *а*).

Когда результирующая R направлена вниз, ядро сжатия смещается под режущую кромку. Согласно результатам научных исследованиях [90; 94], это вызывает рост лунки разрушения породы $h_{\text{л}}$, которая в определенный момент превышает глубину внедрения резца h (рис. 1.12, *б*). Это объясняется повышением осевого усилия или наоборот резким снижением сопротивления породы внедрению резца.

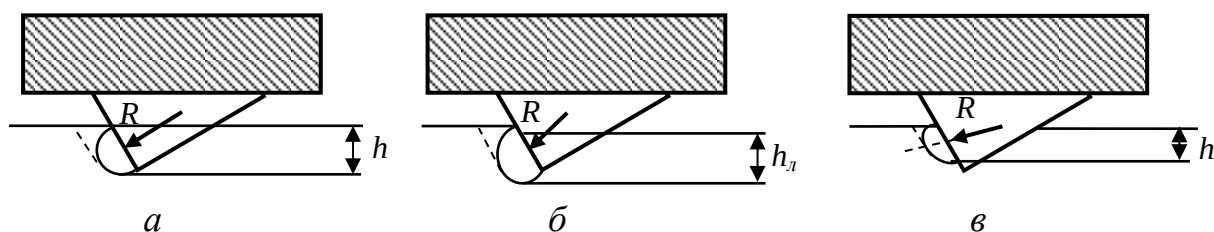


Рисунок 1. 12 – Схема механизма разрушения горной породы резцом PDC: *а* – установившийся режим резания-скалывания; *б* – лунка разрушения больше глубины внедрения резца; *в* – режим повышенного сопротивления

При ситуации, когда вектор результирующей силы R ориентирован вверх (рис. 1.12, *в*), ядро сжатия смещается ближе к поверхности забоя, глубина резания-скалывания в таком случае снижается. Данное явления исследователи связывают со снижением осевого усилия на инструмент или с повышением сопротивления породы [90; 94].

Если направление ядра сжатия задает система сил, возлагаемая на алмазный резец, то размер ядра сжатия существенно зависит от свойств породы, а точнее от ее упругости и твердости.

При этом для углубления породоразрушающего инструмента в процессе вращательного бурения обязательным условием является скалывание или раздавливание горной породы с образованием трещины отрыва перед передней гранью резца. А ориентирование линии скалывания породы в свою очередь зависит от местоположения основания ядра сжатия и его размеров, геометрии, а также переднего угла наклона резца [90; 94; 98].

Физический смысл угла скола горной породы перед передней гранью алмазного резца детально раскрыл в своих научных трудах проф. Нескоромных В.В. [90; 94; 98]. Согласно результатам данного исследования для эффективного разрушения породы с сохранением заданного углубления необходимо время для формирования трещины под действием прикладываемых усилий. Т.е. время возложения усилия должно быть меньше

времени формирования трещины, в противном случае порода перед передней гранью резца не разрушается [90; 94; 98].

Таким образом, помимо формы, размера алмазного резца на результат разрушения породы влияет система сил, действующая на алмазный резец, и время их воздействия. При неизменных геологических условиях одним и тем же резцом, меняя лишь величину осевого и (или) тангенциального усилия можно изменить режим разрушения породы и перейти от резания-скалывания (рис. 1.11, *а*) к раздавливанию, смятию породы (рис. 1.11, *б*).

Описанный механизм разрушения породы, в котором учитывается роль ядра сжатия на процесс разрушения породы, позволяет дать оценку степени влияния коэффициента внутреннего трения на величину затрат сил для реализации процесса бурения, определить условия перехода от резания к скалыванию, далее к раздавливанию и к упругому деформированию [34; 36; 94].

При этом, согласно полученным данным многих научных исследований [8-10; 37], работу алмазных резцов следует изучать в группе. Первым, кто обратил внимание на необходимость применения комплексного подхода был Д. Н. Башкатов. Предложенный метод исследования [6] позволил выдвинуть ряд теорий и построить модели взаимодействия алмазов коронки с породой.

Результаты аналитических исследований работы группы резцов показали, что в процессе бурения прослеживается взаимное влияние зон разрушения породы соседними резцами [6; 9; 29; 32]. При одном и том же режиме эксплуатации алмазные резцы бурового инструмента могут работать абсолютно по-разному. Как показали многочисленные испытания алмазного инструмента [6; 9; 67; 74; 86; 94; 115], это связано с расположением резцов, неравномерностью их выпуска и степенью их износа.

Наибольшую нагрузку несут так называемые лидирующие резцы. Визуально, такие резцы на отработанном инструменте можно определить по наибольшему износу.

Согласно результатам работ, проведенных группой исследователей под руководством Г. А. Блинова [9; 10], в одной и той же линии резания бурового инструмента алмазные резцы работают по-разному. Часть алмазных резцов 1 работает в режиме внешнего трения, т. е. деформирует горную породу упруго, без хрупкого разрушения. Другая часть алмазов 2 деформирует породу с хрупким разрушением, при этом некоторые алмазы 3 скользят по разрушенному впереди идущим алмазом слою породы, а часть алмазов 4 скалывает ослабленную в результате растягивающих напряжений горную породу (рис. 1.13).

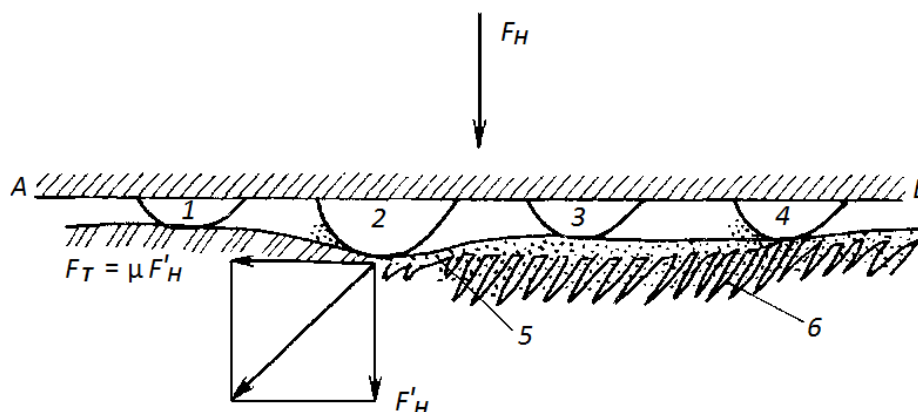


Рисунок 1.13 – Схема взаимодействия резцов алмазной коронки с горной породой по Блинову Г. А.: 5 – зона разрушения; 6 – зона предразрушения

Как показали исследования А. А. Бугаева, при большом количестве алмазов, расположенных на линии резания и вступающих в контакт с породой, каждый из них разрушает небольшой слой породы, толщина которого зависит от тангенциального усилия τ_a , воздействующего на алмаз (рис. 1.14) [9-10]. В результате была получена зависимость определения величины выступания алмазов h :

$$h = \frac{a A_n v_{\text{мех}}}{A_m n m_K}, \quad (1.14)$$

где A_n – абразивная способность частиц шлама, которая определяется как весовой износ штабика из эталонного материала при трении о шлам горной породы; A_m – износостойкость матрицы, которая определяется как весовой износ штабика из матрицы при трении по эталонному абразиву; a – безразмерный коэффициент; $v_{\text{мех}}$ – механическая скорость бурения [9].

Представленная формула (1.14) подтверждает необходимость исследования тангенциальной составляющей нагрузки, возлагаемой на алмаз. При этом полученное выражение не учитывает наличие осевой нагрузки и пригодна только для расчетов параметров импрегнированного инструмента, армированного очень мелким резцом.

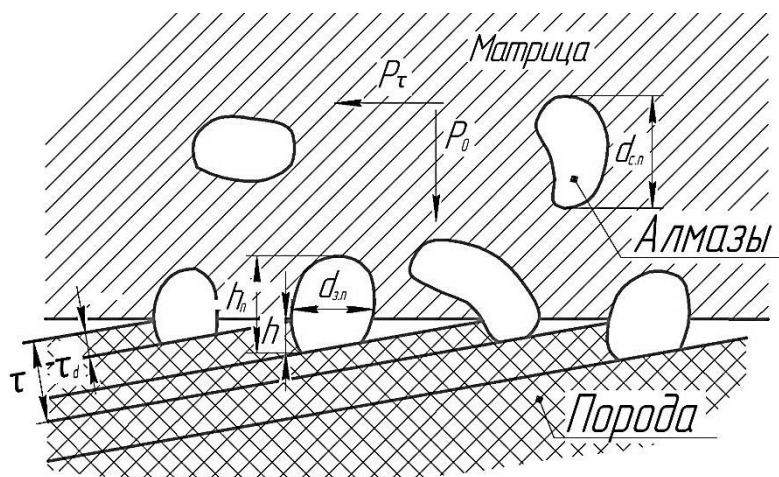


Рисунок 1.14 – Схема работы алмазных зерен по А. А. Бугаеву

Анализ приведенной на рисунке 1.14 схемы наглядно демонстрирует влияние неравномерного выпуска на величину толщины слоя породы снимаемого алмазом, что подтверждает выводы [9] о неравномерности нагрузки резцов.

Таким образом, при разработке высокоресурсного бурового инструмента обоснована необходимость создания таких геометрических параметров, при которых алмазные зерна не зависимо от размера по возможности были бы равномерно нагружены.

1.2 Экспериментальные исследования разрушения горных пород с учетом процессов и явлений, возникающих при бурении

В последнее время при исследовании работы и разработке бурового инструмента особое внимание уделяется динамическим, гидродинамическим, гидробарическим процессам, протекающим на забое скважины. В известных работах [2; 4; 8; 10; 15-17; 19; 20; 24; 29; 39; 44; 46; 48; 67-72; 78; 83; 85; 90; 115; 126; 140; 143; 146; 156; 158; 167] авторы рассматривают процесс разрушения горной породы с учетом разнообразных параметров системы бурения, например, скорости перемещения резца. Такой подход, позволил удостовериться в том, что механизм разрушения породы в динамике сложнее представленной статической схемы, основанной на методе внедрения индентора.

Еще учеными Шрейнером Л.А. и Остроушко И.А. была замечена сложность характера взаимодействия механической скорости бурения от динамических нагрузок, возлагаемых на алмазный инструмент [115; 160]. Однако, рассмотренные ими процессы имели много ограничений и с учетом существующих возможностей современного бурового оборудования представляются не до конца исследованы.

Изучение динамических процессов обосновано применением экспериментальных методов исследований подкрепляемых аналитическими выводами. Так, например К. И. Борисов в своих работах [15-17] рассмотрел вопрос влияния линейной скорости перемещения резца *PDC* на процесс разрушения горной породы [15-17]. Результаты обработки экспериментальных данных, приведенные в научных трудах [15-17], подтвердили неоднородность работы резцов бурового инструмента. Автору удалось доказать, что эффект разрушения горной породы зависит от радиуса размещения резцов в корпусе инструмента. Экспериментальные исследования показали, что по мере увеличения линейной скорости перемещения резца растет сопротивление породы разрушению (рис. 1.15).

К. И. Борисов [15-17] установил, что величина внедрения резца в породу в процессе бурения меняется в зависимости от значения динамической силы R_x , которая действует как выталкивающая на алмазный резец [15-17] и вывел формулу для определения величины внедрения резца в горную породу:

$$h_y = \frac{(G_0 - R_x - C \cdot e^{k \cdot x})}{b \cdot H_{\text{од}} \cdot \mu}, \quad (1.4)$$

где G_0 – осевая нагрузка, Н; $H_{\text{од}}$ – динамическая твердость горной породы, Н/м²; b – ширина резца, м; k – коэффициент пропорциональности; R_x – сила реакции породы на торец резца, возникающая за счет воздействия его передней грани на разрушаемую горную породу при перемещении вдоль оси x , Н; μ – коэффициент трения [15; 17].

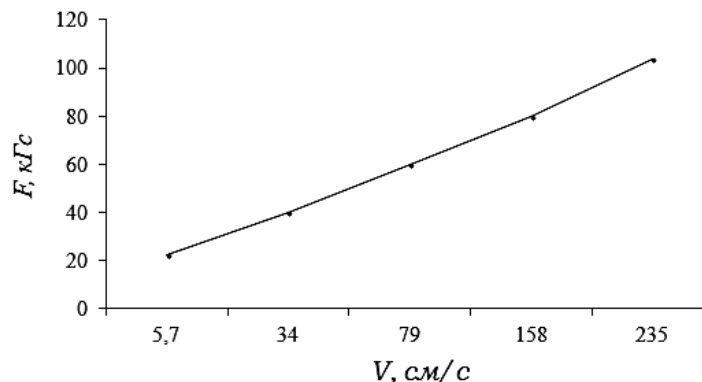


Рисунок 1.15 – Влияние линейной скорости перемещения резца V на сопротивление породы при резании с силой F (по Борисову К.И. [15])

Величину силу выталкивания автор предложил определять исходя из известного решения Фламана- Буссинеска как:

$$\sigma_h = \frac{3F \cos \varphi \sin \varphi}{2\pi r^2}, \quad (1.5)$$

где σ_h – напряжения, возникающие от силового воздействия передней грани резца на уступ твердого тела и действующие на торец этого резца; $F = h \cdot b \cdot \sigma$ – сила, с которой резец воздействует на твердое тело передней гранью; σ –

напряжения в породе; φ – угол, характеризующий положение точки, для которой определяются напряжения σ_h ; r – величина, характеризующая положение точки приложения силы F [15; 17].

При этом степень сопротивления предлагается рассматривать через коэффициент сопротивления резанию, который, согласно результатам стендовых испытаний [15] изменяется в зависимости от условий возложения нагрузки на резец.

По данным эксперимента удалось получить графическую зависимость возможного изменения коэффициента сопротивления резанию от осевой нагрузки (рис. 1.16) [15; 17].

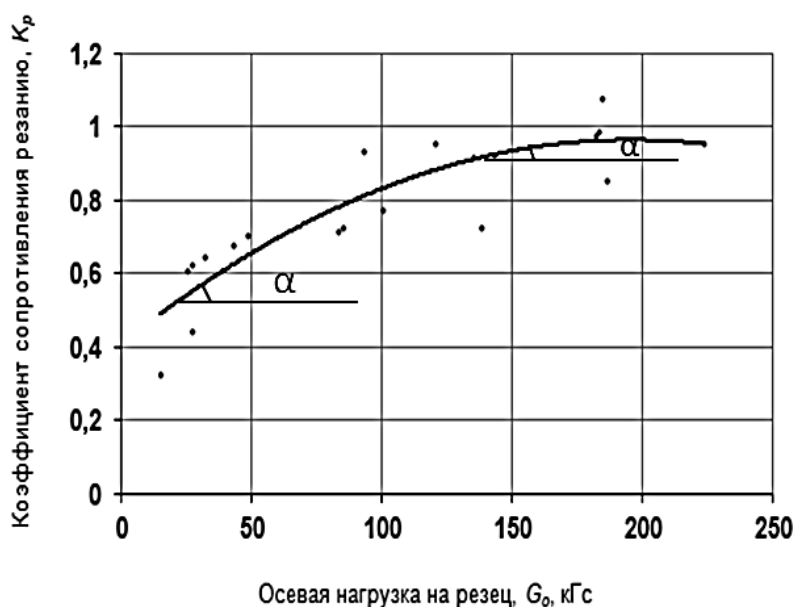


Рисунок 1.16 – Зависимость коэффициента сопротивления резанию от осевой нагрузки на единичный резец [15; 17]

Как видно из графика, коэффициент сопротивления растет до определенной величины. Это происходит в момент реализации упругого деформирования горной породы. Далее при достижении объемного разрушения породы либо в момент образования трещин величина

коэффициента начинает снижаться. При этом в интервале малых значений осевого усилия степень нарастания сопротивления более активна, о чем можно судить по углу наклона кривой графика (α , рис. 1.16). По мере увеличения осевой нагрузки степень роста коэффициента сопротивления падает, значение угла α становится меньше.

Полученные результаты вносят весомый вклад в развитие исследований и разработки алмазного инструмента. Однако, следует отметить, что предложенные результаты учитывают лишь часть динамических процессов, сопутствующих бурению. Описанный коэффициент сопротивления не учитывает наличия непрерывно циркулирующей промывочной жидкости, не удаленного с забоя шлама, частиц разрушенной горной породы, а также возможного износа алмазного резца.

Третьяк А.А. в своей научной работе, посвященной исследованию работы бурового инструмента, армированного пластинами АТП, отдельное внимание уделил износу пластин и влиянию этого процесса на эффективность разрушения породы [152]. Износ определялся размером площадки притупления пластин АТП. Исследование проводилось на основе эксперимента с учетом комплексного влияния параметров бурения.

На рисунке 1. 17 представлен график зависимости механической скорости бурения, площадки притупления резца и диаметра коронки от проходки бурового инструмента, полученный в результате обработки экспериментальных данных [152].

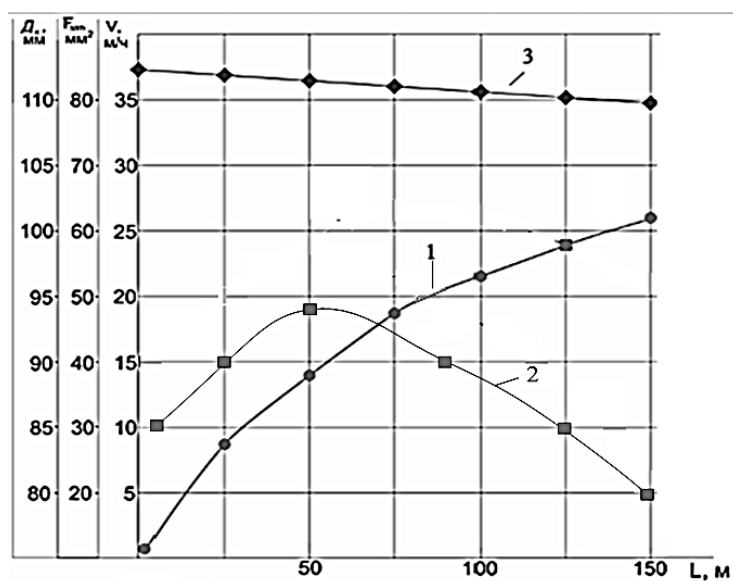


Рисунок 1.18 – График изменения механической скорости бурения, площадки затупления и диаметра коронки от проходки скважины: 1 – изменение площадки затупления, мм²; 2 – скорость бурения, м/ч; 3 – диаметр коронки, мм (результаты экспериментальных исследований Третьяка А.А.) [152]

График наглядно демонстрирует неоднородность работы инструмента в различный период процесса бурения. Изменение параметров наблюдается по мере увеличения проходки бурового инструмента. Полученные результаты указывают на изменение механизма разрушения горной породы в процессе бурения. Согласно анализу экспериментальных результатов [152] и полученных аналитических выводов, на механизм разрушения оказывает влияние режим работы резца, а также степени его износа.

Автором [152] проделана большая работа в области исследований влияния технологии эксплуатации инструмента на итоговые показатели бурения. На рисунке 1.19 представлен график зависимости механической скорости бурения от осевой нагрузки на буровой инструмент, полученный в результате обработки данных полевых испытаний коронки 225АТП в породах VII категории по буримости [152]. Анализ графика указывает на повышение значений механической скорости бурения при возрастании

величины осевой нагрузки до определенных пределов. Как видно из графика, дальнейшее превышение осевой нагрузки не дает должного прироста механической скорости, а наоборот начинает снижать ее значение, что указывает на появление сил сопротивления внедрению резцов в породу и дальнейший их рост по мере увеличения нагрузки.

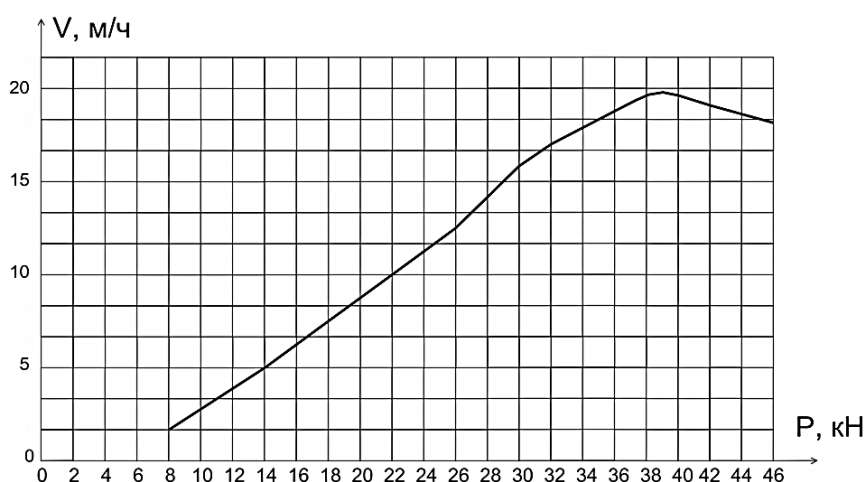


Рисунок 1.19 – Зависимость механической скорости бурения (V) от осевой нагрузки (P) [152]

Полученные результаты многочисленных научных работ [10; 15-17; 19; 20; 24; 30; 33; 43; 46; 50; 68; 73; 74; 83; 126; 137; 141; 146; 149; 152; 156; 158] указывают на важное влияние параметров режима бурения на ресурс и производительность бурового процесса. Согласно полученным данным [15-17; 90; 94; 152], повышение параметров бурения не всегда ведет к улучшению технико-экономических показателей, а наоборот приводит, например, к чрезмерному износу инструмента, снижению углубления за оборот или появлению сил сопротивления. Причем важно учитывать одновременное влияние и осевой нагрузки, и частоты вращения, и подачи промывочной жидкости.

На рисунке 1.20 приведен график, отражающий зависимость экспериментальных исследований, проведенных под руководством Третьяка А.А. [152]. Анализ приведенной зависимости указывает на то, что

чрезмерная нагрузка на алмаз ведет к снижению его режущих способностей. А при определенном сочетании параметров бурения наблюдается высокие результаты выраженные в повышенной величине механической скорости бурения.

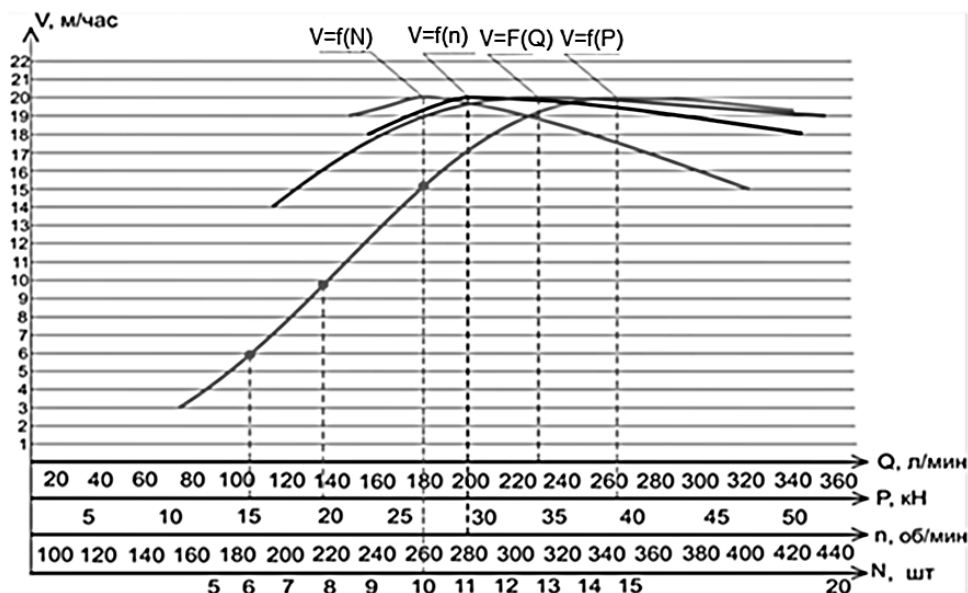


Рисунок 1.20 – Зависимость механической скорости бурения V_m от количества промывочной жидкости (Q), осевой нагрузки на коронку (P), частоты вращения (n), количества резцов АТП (N) [152]

Пояснить такую закономерность снижения эффективности работы бурового инструмента при повышении нагрузки можно используя данные аналитических исследований [15-17; 90], указывающих на повышение сопротивления со стороны забоя, связанного с несовпадением времени воздействия нагрузки и скорости разрушения связей в целике горной породы.

Таким образом, на характер разрушения горной породы оказывает влияние система сил, воспринимаемая резцом и зависящая от режима бурения. Отсюда следует, что помимо осевой нагрузки немаловажное значение имеет тангенциальное усилие, воспринимаемое каждым отдельным алмазом инструмента.

Известны результаты исследований, выполненных под руководством Н.И. Корнилова [74–75], целью которых было изучение влияния динамических нагрузок, воспринимаемых единичным алмазным кристаллом, на результаты разрушения породы. В установке, схема которой представлена на рисунке 1.21, закреплялся алмаз и осуществлялось резание им горной породы. В процессе эксперимента производилась запись осевого и тангенциального усилия.

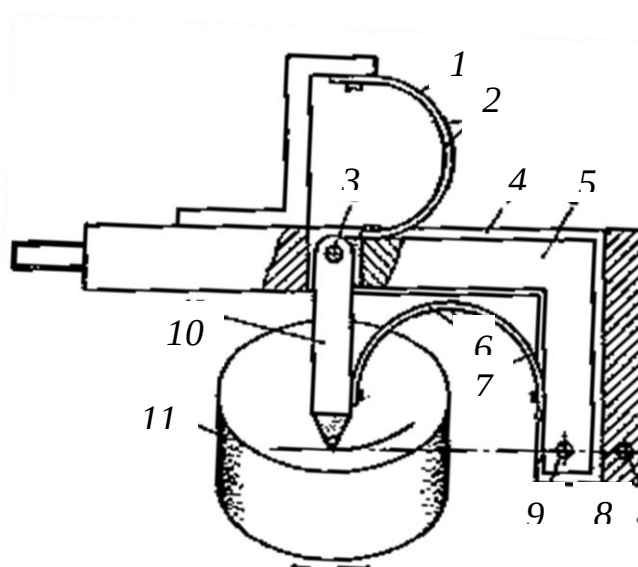


Рисунок 1.21 – Экспериментальная установка для регистрации тангенциальной и вертикальной составляющих на алмаз [74]: 1, 7 – скобы; 2, 6 – тензодатчики; 3, 8, 9 – оси; 4, 5 – рычаги; 10 – держатель для крепления алмаза; 11 – стол

Результаты экспериментальных данных показали, что сила трения алмаза о породу во многом зависит от соотношения величин осевого и тангенциального усилий. При этом для реализации эффективного бурения с образованием достаточной лунки разрушения величина отношения осевого усилия к тангенциальному должно соответствовать твердости породы.

Полученные результаты были аналитически обоснованы Нескоромных В.В [94]. Как следствие, имеются рекомендации о том, что средняя величина отношения осевой нагрузки к тангенциальному усилию в случае армирования бурового инструмента необработанным алмазом и применении

его при разрушении пород средней твердости должна составлять 1,37, при разрушении твердых пород – 1,79 [94]. Для овализированного алмаза соответственно 1,41 и 1,6.

В итоге результаты научных исследований внедрения индентора в горную породу, дополняются данными изучения экспериментальных испытаний бурового инструмента. При этом актуальным остается дополнительное изучение наличия динамических процессов, возникающих при реализации бурения, которые выражаются в виде скорости перемещения резца и циркуляции промывочной жидкости. При этом необходимо определение влияния наличия твердой фазы в виде горной породы в различном агрегатном состоянии, находящейся на забое, а также условий ее образования и накопления.

Исходя из вышеизложенного, результаты многочисленных аналитических исследований взаимодействия алмазного резца с горной породой требуют проверки методами эмпирических исследований. Результаты экспериментальных испытаний бурового инструмента носят косвенный характер, указывающий на степень влияния того или иного фактора. При изучении динамических процессов эксперимент может иметь значительную погрешность из-за действия дополнительных нагрузок, колебаний, вибраций и т.д. К тому же такой метод не позволяет наглядно изучать процесс разрушения породы единичным резцом, что в условиях неоднородности нагрузки резцов инструмента усложняет интерпретацию выводов.

1.3 Проектирование алмазного бурового инструмента методами компьютерного моделирования

Система взаимодействия алмазного резца с горной породой с учетом всех явлений и процессов, сопутствующих бурению, очень сложная и при этом мелкогабаритная для экспериментального метода исследования.

Возможности изучения данной области расширяются с использованием современных методов компьютерного имитационного моделирования. Опыт использования методов компьютерного моделирования указывает на доступность проектирования и изучения особо сложных процессов с достаточно точной достоверностью и без особых затрат [70; 142; 151; 171; 179; 182; 187; 189; 191].

Известные мировые компании по разработке и производству современного алмазного бурового инструмента основную часть своих разработок осуществляют с привлечением передового программного обеспечения.

Так, сотрудники компании *Smith Bits* разработали собственную инженерно-аналитическую компьютерную систему *IDEAS*. Включенные в систему модули программирования позволяют осуществлять глубокий анализ конструкций долот с учетом наличия динамической среды бурения.

Разработка *Smith Bits*, позволяет исследовать разрушающую способность породоразрушающего инструмента с учетом геологических условий, изменения силового всестороннего воздействия, литологических особенностей, скоростей бурения, вариантов ориентации резцов, износа долота и других необходимых многочисленных факторов. При этом действующие на долото силы, определяются программой автоматически с учетом динамических процессов всей бурильной колонны и взаимодействия инструмента с породой. Составной модуль системы *IDEAS* – программа *i-Drill* позволяет прогнозировать поведение долота в скважине в различных условиях, а результаты выводит в виде четырехмерных моделей.

С использованием *IDEAS Smith Bits* удалось реализовать проектирование с последующим производством долот, отличающихся оптимальной эффективностью. При этом цикл разработки инструмента был значительно сокращен.

В результате применения инженерно-аналитической системы *IDEAS* разработаны буровые долота, обладающие увеличенным сроком службы и

скоростью проходки, а инструмент предназначенный для наклонно-направленного бурения отличается особой стабильностью работы (рис. 1.22).

Долота типа *IDEAS*, предназначенные для бурения наклонно-направленных скважин, по конструкции отличаются от стандартных. Они имеют меньшее количество лопастей, армированы алмазными резцами большего диаметра, которые располагаются в корпусе инструмента под меньшим углом наклона.

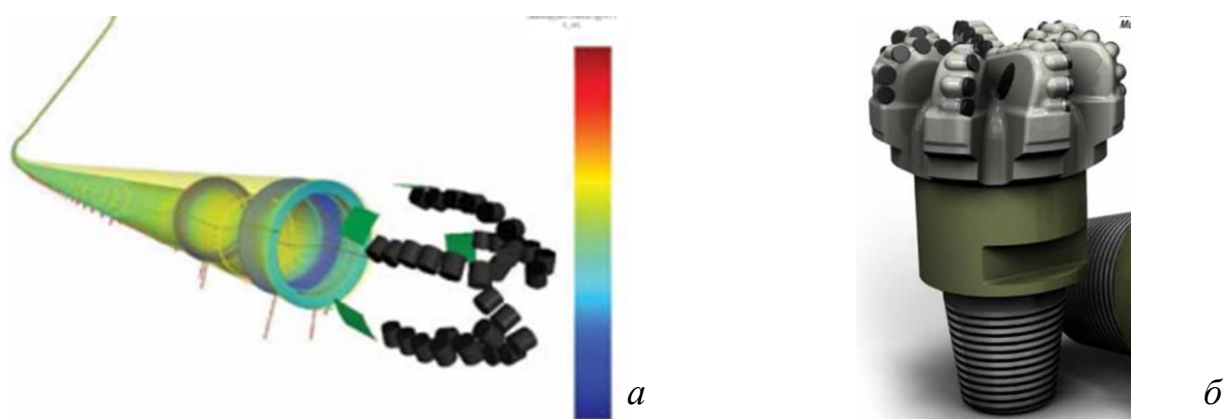


Рисунок 1.22 – Пример разработки долот *IDEAS*: *а* – результаты компьютерного моделирования; *б* – долото *IDEAS*

Одним из важных заключений, полученных в результате проектирования долот посредством моделирования является вывод о том, что оптимальную плотность вооружения инструмента обеспечивает большой диаметр алмазных резцов, что позволяет реализовывать более высокую нагрузку и достигать в процессе бурения максимально возможных значений глубины внедрения резца. Именно такой тип армирования бурового инструмента способствует максимизации скорости проходки.

База данных *DRS* компании *Smith Bits* содержит информацию о трех миллионах отработанных буровых долот. Информация собиралась с разнообразных месторождений мира, что позволяет использовать имеющийся опыт при проектировании бурового инструмента, а также оптимизировать выбор долот *DBOS* для реализации эффективного бурения в конкретном геологическом разрезе.

Помимо собственных компьютерных разработок компания *Smith Bits* успешно практикует использование известных модулей гидродинамического моделирования *CFD* (*Computational Fluid Dynamics*). Моделирование в *Computational Fluid Dynamics* позволяет осуществлять инженерное исследование влияния геометрии лопастей, наличие и местоположение гидродинамических насадок на скорость и направление потока промывочной жидкости в процессе бурения скважин с учетом сопутствующих факторов (рис. 1.24). Результаты моделирования внедрены в проектирование конструкций долот, отличающихся эффективностью бурения за счет использования гидравлической энергии струи.

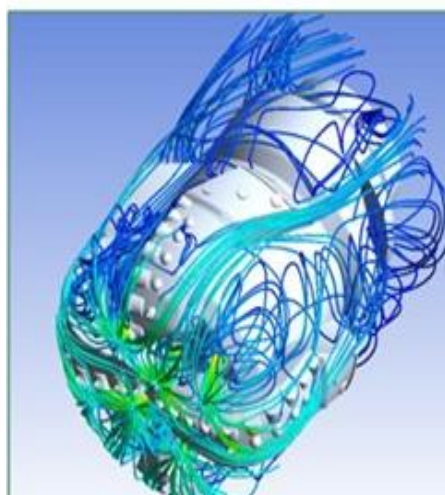


Рисунок 1.24 – Результаты исследования гидродинамических процессов, протекающих при бурении долото

Так, в результате применения моделирования гидродинамических процессов, была разработана конструкция промывочной системы *Turphoon*, в которой используются специальная комбинированная схема насадок. Удлиненные насадки *VE* предназначены для очистки внешней части вооружения, они располагаются поочередно с насадками для очистки внутренней части вооружения *J3* (рис. 1.23). В настоящее время система промывки *Turphoon* может использоваться с долотами диаметром от 406 мм и более.

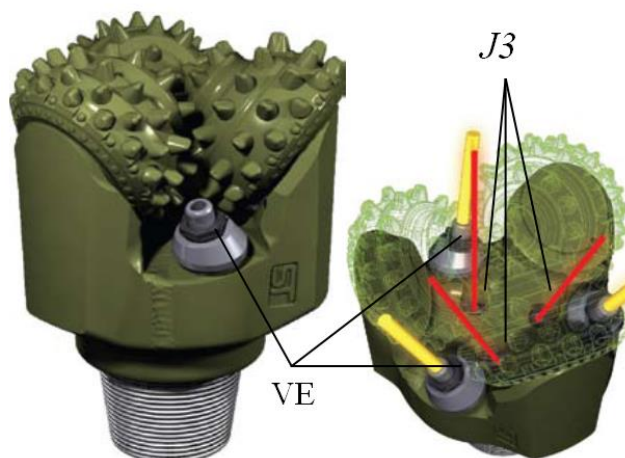


Рисунок 1.23 – Долото *Shamal Typhoon* с насадками: *VE* – для очистки внешней части вооружения; *J3* – для очистки внутренней части вооружения

С целью оптимизации промывочной системы бурового инструмента и выбора приемлемого типа и свойств промывочной жидкости компанией *Smith Technologies* была разработана программа моделирования гидродинамических процессов бурения *Yield Point*, которая успешно внедрена в проектирование бурового процесса и создание инструмента.

Для исследования особенностей бурового инструмента компанией *Varel* разработан собственный программный продукт под названием *SPOT™*, который позволяет оценивать качество долот, их ресурс и производительность. Помимо этого разработчики компании успешно используют программы *GeoScience* и *CFD*. В своей работе сотрудники *Varel* используют исследование разрушающей способности как единичного резца так и всех режущих элементов инструмента. В результате виртуальных исследований *Varel* разработала конструкцию долот, оснащенных насадками, ориентирующими поток жидкости горизонтально забою вдоль линии расположения резцов, где наблюдается аномальное скопление шлама (рис. 1.24).



Рисунок 1.24 – Разработки компании *Varel*

Улучшенная система очистки забоя за счет особенностей конструкций гидравлических насадок позволяет организовать качественную очистку забоя и охлаждение резцов. На сегодняшний день долота фирмы *Varel* применяют при бурении пород различной твердости и абразивности.

Основываясь на полученных результатах имитационного компьютерного моделирования, фирма *Varel* внедряет в свои разработки принцип комбинирования алмазного сырья различного качества [190].

Компания АО «НПП «Бурсервис» разработку конструкций породоразрушающего инструмента начинает с компьютерного моделирования работы единичного резца в горной породе. В результате такой работы получены данные о распространении напряжений в породе под резцами различной формы (рис. 1.25), подтверждающие результаты аналитических исследования работы алмазных резцов различной формы. При одинаковой силовой нагрузке на резец, наибольшие напряжения возникают под резцами конической формы, режущая способность такого резца выше, поэтому именно ее рекомендуют для армирования инструмента, применяемого при бурении в твердых горных породах.

Выводы сделаны специалистами «Бурсервис» на основании анализа зоны трещинообразования, которую наглядно можно наблюдать на графике программы моделирования (рис. 1.25).

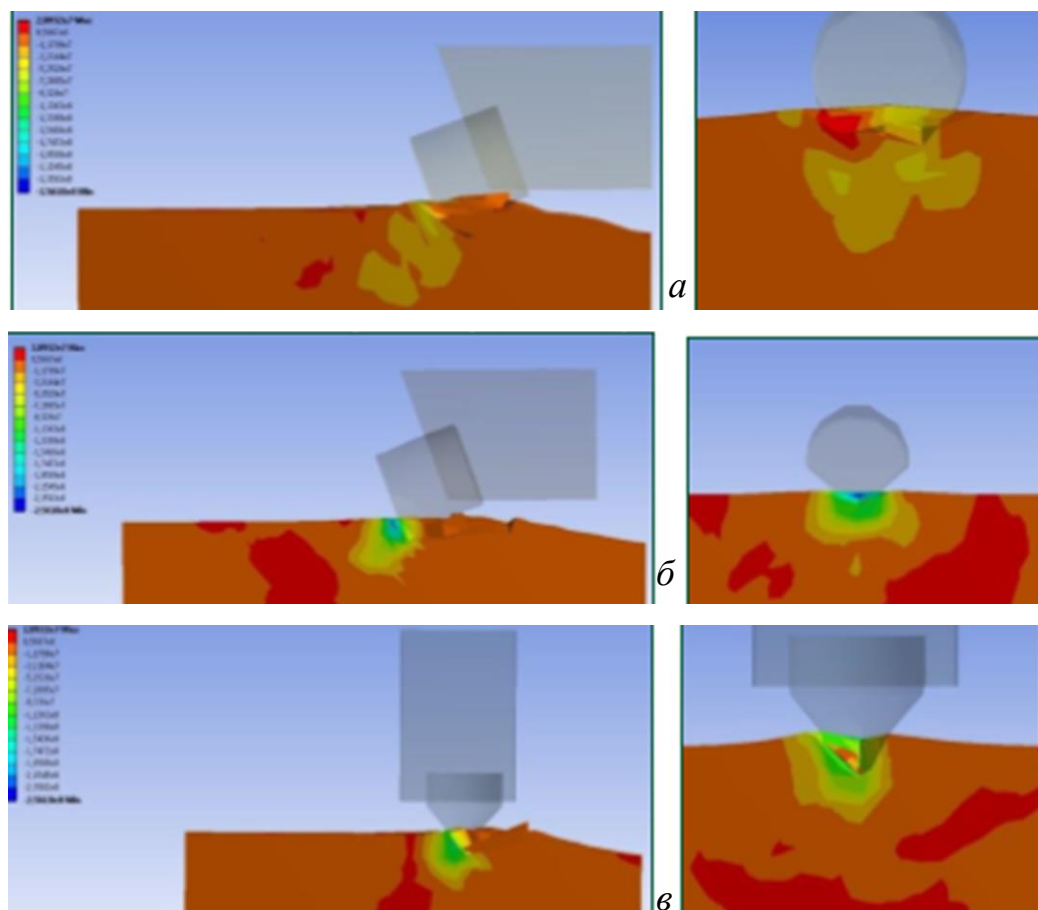


Рисунок 1.25 – Результаты моделирования разрушения породы резцом *PDC*: *а* – круглой формы; *б* – заостренной формы; *в* – конической формы

Основываясь на результатах моделирования была разработана конструкция долота *BULAVA*, имеющее комбинированное вооружение из резцов *PDC* круглой и конической формы, позволяющее осуществлять бурение в породах средней твердости и твердых. В производственных условиях долото зарекомендовало себя как эффективный породоразрушающий инструмент с высокими показателями ресурса [26].

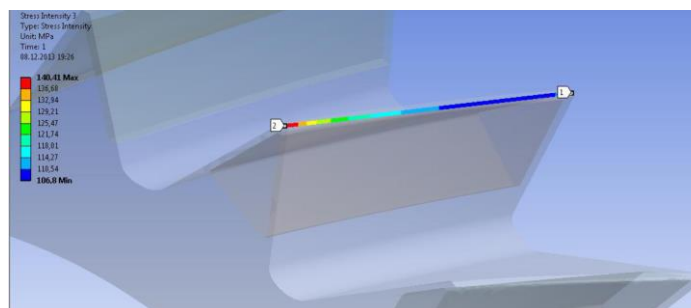
Еще одним востребованным при конструировании бурового инструмента является опыт использования продукта программирования *MSC Patran* или *MD Nastran* (*MacNeile Shreider Corporation/ NASA Structural*

Analysis). Данные компьютерные программы позволяют производить расчеты напряжений, прочности, деформаций в заданных точках детали, узла, конструкции и создавать визуальные образы, самое главное, что все расчеты можно осуществлять с учетом условий динамики, что незаменимо в условиях конструирования алмазного инструмента.

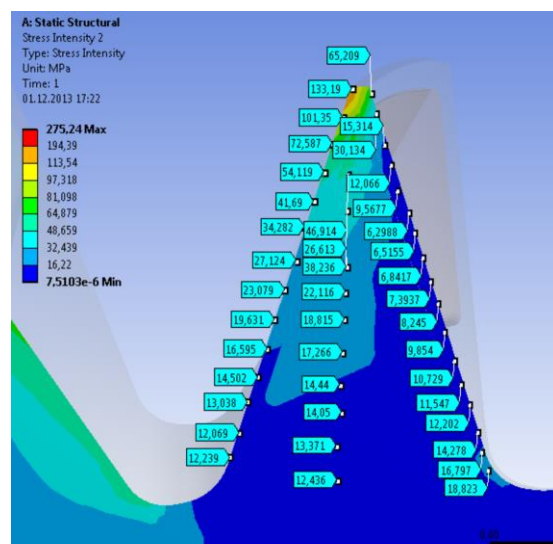
При проектировании компании-разработчики бурового инструмента часто используют программный пакет *ANSYS*, обладающий разнообразными возможностями конечно-элементного анализа. Программный комплекс *ANSYS* включает в себя более 20 модулей, основными из которых являются *Design Modeler*, *Meshing Application*, *Fluent Engeneering Data*, *Finite Element Modeler*.

Сериковым Д.Ю. посредством моделирования в системе *ANSYS* удалось определить и обосновать наличие наиболее нагруженных сечений косозубого вооружения по ширине венца шарошечного долота (рис. 1.26, *а*). Определив сечение зуба, в котором возникают максимальные напряжения, посредством метода компьютерного моделирования, удалось исследовать это сечение по высоте (рис. 1.26, *б*), на основании чего были предложены меры по повышению эффективности косозубого вооружения [142].

Важно отметить, что *ANSYS* позволяет имитировать процесс разрушения горной породы в любых, даже часто изменяющихся геологических условиях. Моделирование в данной системе позволяет учитывать агрегатное состояние каждого домена модели исследования. *ANSYS* позволяет создавать материал доменов с необходимыми физико-механическими свойствам. Причем задаваемый материал может быть как однородным (*Pure Substance*), так и состоять из смеси (*Fixed Composition Mixture* или *Variable Composition Mixture*), что несомненно является преимуществом при моделировании разрушения в перемежаемом неоднородном интервале пород любой кондиции.



а



б

Рисунок 1.26 – Результаты моделирования в системе ANSYS: а – распределение напряжений в зубе шарошечного долота по ширине; б – распределение напряжений в зубе шарошечного долота по высоте [142]

Компьютерное имитационное моделирование позволяет исследовать очень мелкие элементы системы реализации бурового процесса. Например, система ANSYS хорошо зарекомендовала себя при изучении характера распределения температуры на забое скважины с учетом наличия гидродинамических процессов [130]. Система позволяет проследить траекторию течения жидкости в мелком зазоре, например, перед рядом резцов PDC (рис. 1.27, а) [39], исследовать степень теплопроводности от породы к алмазу (рис. 1.27, б) [70], определять характер температурного состояния даже внутри одного алмазного резца бурового инструмента любого размера (рис. 1.27, в) [130], легко перестраивать конструкцию изучаемого элемента или модели.

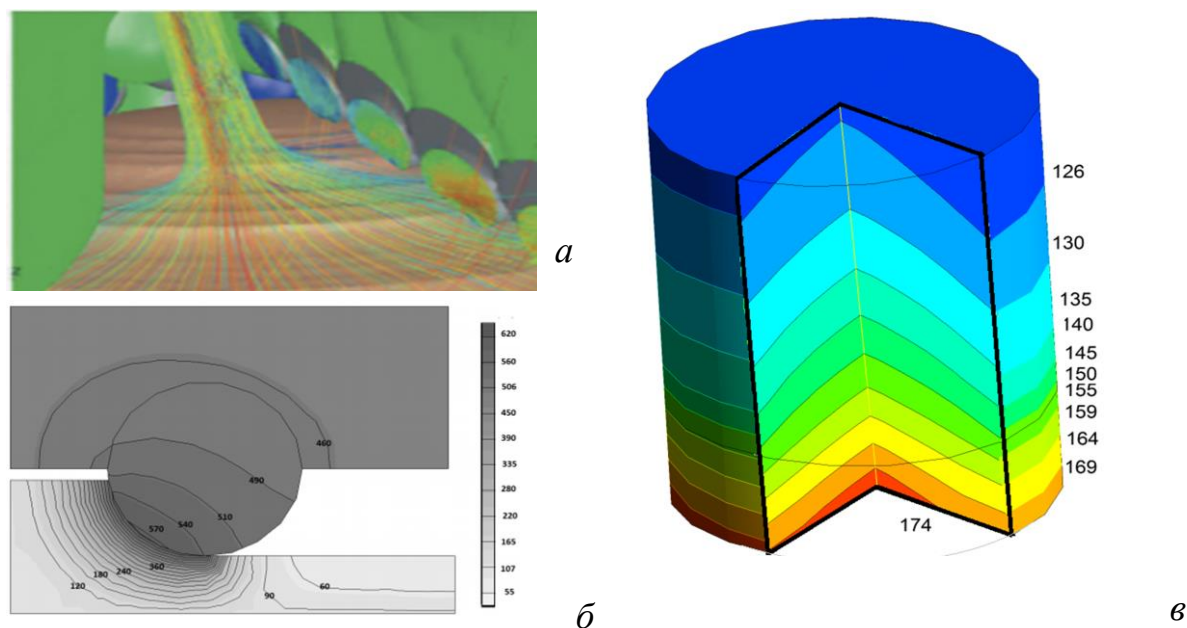


Рисунок 1.27 – Результаты компьютерного моделирования в системе ANSYS: *а* – течение жидкости перед рядом резцов PDC [39]; *б* – теплопроводность от контакта алмаза с породой [70]; *в* – распределение температуры в одном алмазе [130]

Таким образом компьютерное моделирование – современный, надежный и востребованный в проектировании бурового инструмента метод, позволяющий без лишних затрат времени и ресурсов осуществлять точные и достоверные исследования не прибегая к ограничениям при создании моделей.

1.4 Анализ технического уровня алмазного бурового инструмента

На сегодняшний день существует множество конструкций бурового инструмента. Одной выделяющейся современной тенденцией при разработке бурового инструмента является комбинирование режущих элементов. Это обосновано производственными требованиями к буровому инструменту, конструкции которых должны обеспечивать высокий ресурс при использовании их в неоднородных геологических условиях.

Армирование бурового инструмента резцами различной формы способствует расширению номенклатуры его использования. Так, долота *Security DBS* серии *FM3000*™ компании *Varel* в составе своего вооружения содержат резцы *PDC* эллипсовидной и круглой формы (рис. 1.27, а). Наличие эллипсовидных вставок *PDC* (*R1*) в долоте обеспечивает возможность бурения в твердых горных породах без смены инструмента. Аналогичный подход используют в своих конструкциях и компании *Smit Bits* (рис. 1.28, з), «Бурсервис» и др. Для бурения пропластков твердых горных пород они используют вооружение с коническими вставками, например, *Stinger* (рис. 1.28, в), которые способствуют снижению нагрузки от ударов, возникающих при бурении пластов, содержащих твердые включения [184].

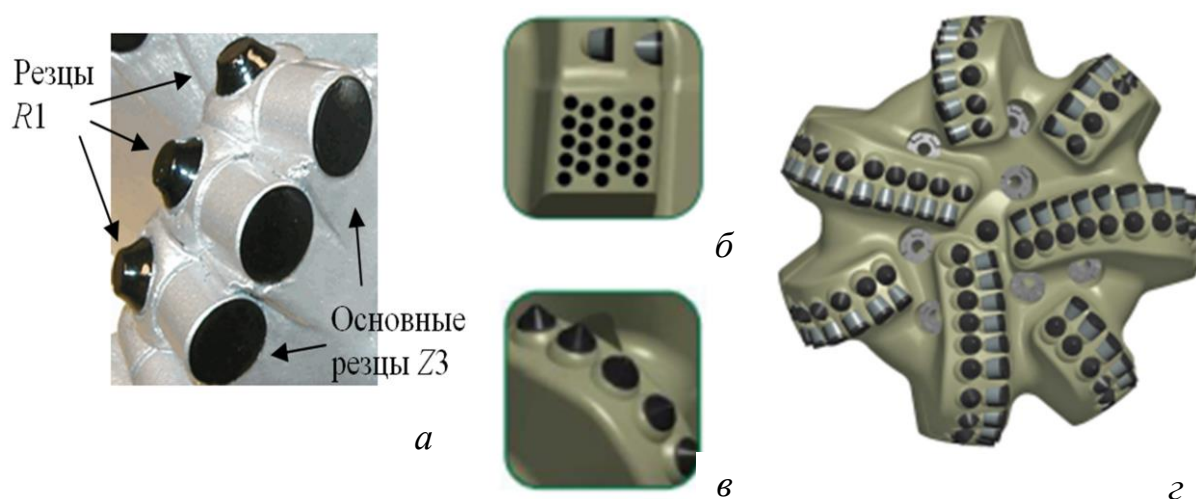


Рисунок 1.28 – Конструкции комбинированного вооружения: а – долота *Security*; б – с теплостойкими алмазными вставками; в – *Stinger*; г – долото *Smit Bits* [184]

Для предотвращения износа современный буровой инструмент по наружному диаметру или в местах повышенной нагрузки армируется разнообразными вставками, например в виде теплостойких алмазов (рис. 1.28, б).

Некоторые принципы комбинирования могут выглядеть как сочетание различных видов разрушающих элементов. Так компании *Backer Hughes*

разработало долото «*Kymera*TM», которое содержит в своей режущей части шарошечные долота и лопасти с резцами *PDC* (рис. 1.29, *а*) [116; 150]. А долота *UniDrill*, разработанные специалистами ОАО «Универсальное бурение» имеют матричный корпус, состоящий из импрегнированных сегментов различной формы (рис. 1.29, *в*).



Рисунок 1.29 – Передовые конструкции бурового инструмента долота типа: *а* – *Kymera*TM; *б* – *Ulterro's*; *в* – *UniDrill*

Многочисленные инженерные исследования конструкций бурового инструмента подтвердили необходимость создания условий образования свободных поверхностей забоя скважины, что способствует повышению эффективности разрушения породы. Обеспечения указанного условия добиваются путем соответствующего расположения режущих элементов в корпусе инструмента или изменения формы торцевой поверхности импрегнированной матрицы. Так коронки *Atlas Copco* и *Boart Longyear* изготавливаются с плоским торцом, в виде полусферы, и в форме усеченной полусферы. При этом наиболее перспективной является W-образная форма, образующая наибольшее количество свободных поверхностей.

Опыт конструирования показывает, что ресурс инструмента может регулироваться высотой матрицы. К примеру, коронка *Alpha Stage* (рис. 1.30, а) обладает матрицей высотой 25,4 мм, снабженной промывочными окнами таким образом, чтобы при износе верхнего слоя матрицы, оголенная часть имела возможность промывки торцевой поверхности.

В некоторых конструкция алмазных коронок повышение ресурса достигается внедрением развернутой промывочной системы. Хорошо зарекомендовавшие себя в работе коронки типа *Hobic* снабжены дополнительными промывочными каналами на торце (рис. 1.30, б), что способствует лучшей очистке и охлаждению их режущей поверхности.

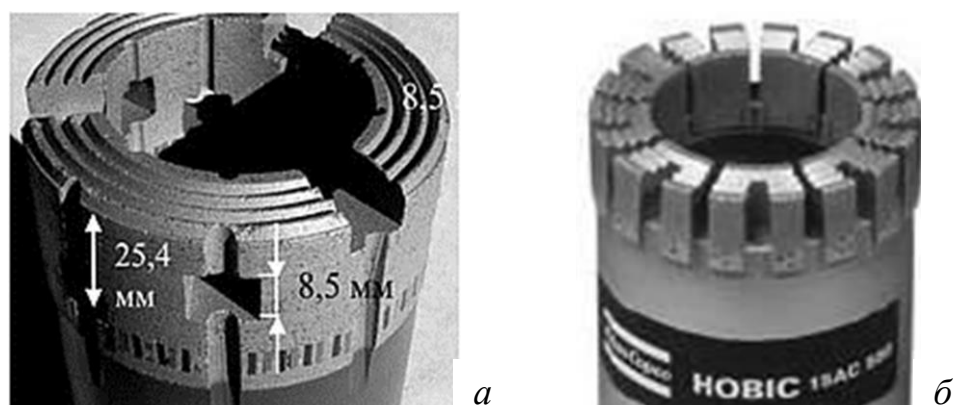


Рисунок 1.29 – Импрегнированные коронки компании Boart Longyear: а – *Alpha Stage3*; б – *Hobic*

В случае применения в качестве вооружения алмазного кристалла регулирование области его применения и ресурса может достигаться путем изменения выпуска алмаза, твердости матрицы, размеров резцов соответственно твердости разрушаемой породы.

В конструкциях перспективного бурового инструмента особое внимание уделяется схеме размещения алмазных резцов [8; 11; 25; 29; 31; 43; 48; 75; 77; 130]. Помимо повышения режущей способности ориентация резцов *PDC* придает конструкции инструмента дополнительные функции. Так, например, долота компании *Ulterro's New Counter Force Texnology*,

армированы резцами, размещенными по «ломаной» линии резания (рис. 1.29, б). Такая конструкция осуществляет борьбу с поперечными колебаниями инструмента, а также способствует повышению эффективности бурения.

Борьбе за повышение ресурса способствует внедрение принципов динамизации и рационализации конструкции инструмента. Долото *ONYX*, в наиболее нагруженных местах рабочей поверхности армировано вращающимися вокруг своей оси резцами *PDC* (рис. 1.31).

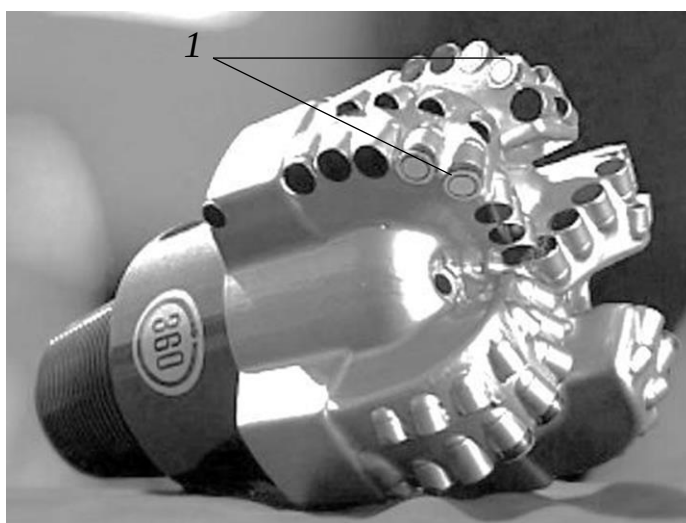


Рисунок 1.31 – Долото *ONYX 360*: 1 – вращающиеся вокруг своей оси резцы *PDC*

Такая конструкция позволяет повышать проходку на долото более чем на 19 % [5].

Еще одним методом повышения ресурса, который используется при проектировании современного бурового инструмента, является синтез композитного материала. Так добавка графена в состав материала резцов способствует упрочнению, повышению прочностных свойств резцов, улучшению их теплопроводности, износостойкости [109; 181; 183; 186]. Перспективными добавками при этом являются материалы типа борофен, аэрогель, прозрачный алюминий, способствующие улучшению свойств режущих элементов.

Анализ современного передового алмазного бурового инструмента указывает на то, что единого подхода к разработке конструкций не имеется. Все указывает на отсутствие общепринятой аналитической основы, в полной мере описывающей механизм разрушения горной породы алмазными резцами (с учетом всех явлений и процессов сопутствующих бурению). Из-за этого активно используемый аппарат компьютерного моделирования при проектировании бурового инструмента используется не полноценно.

ВЫВОДЫ

На основании проведенного анализа современного состояния научного исследования, существующих методов проектирования и технического уровня алмазного бурового инструмента можно сделать следующие выводы:

1. востребованность и область применения алмазного бурового инструмента велика;
2. современному проектированию бурового инструмента доступно большое разнообразие алмазных резцов и возможности их сочетания;
3. большой объем результатов и достижений в области научного исследования работы алмазного бурового инструмента требует систематизации и упорядочения;
4. схема механизма разрушения горной породы алмазным резцом является базовой для научного изучения особенностей процесса алмазного бурения;
5. износ алмазного резца изменяет механизм разрушения породы;
6. повышению ресурса бурового инструмента способствует создание условий равномерной нагрузки всех его резцов;
7. на характер разрушения горной породы оказывает влияние система сил, воспринимаемая резцом и зависящая от режима бурения;
8. при исследовании динамических процессов необходимо дополнительное изучение наличия на забое горной породы в различном агрегатном

состоянии, условий ее образования и накопления в режущей зоне алмазного бурового инструмента;

9. компьютерное моделирование – современный, надежный и востребованный в проектировании бурового инструмента метод, позволяющий без лишних затрат времени и ресурсов осуществлять точные и достоверные исследования не прибегая к ограничениям при создании моделей.

Отсюда возникает необходимость разработки метода проектирования бурового инструмента с использованием компьютерного моделирования основанного на комплексном подходе, учитывающем особенности изменения механизма разрушения горной породы алмазным резцом, геометрические параметры и технологию дальнейшего использования инструмента.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ БУРОВЫМ АЛМАЗНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ С УЧЕТОМ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИЗАБОЙНОЙ СРЕДЫ

2.1 Граничные условия научного исследования

В виду теоретического характера работы, учитывая обширность имеющейся базы научных и производственных результатов, крайне важно определиться с параметрами граничных условий научного исследования.

Изучая процесс бурения, необходимо учитывать неоднородность любого геологического разреза. Горная порода – чаще всего конгломерат и представить механизм ее разрушения в виде однообразного процесса невозможно. Например, при прочих равных технических условиях, процесс резания может сопровождаться скалыванием, а раздавливание переходить в резание и обратно. При этом нужно отметить, что в зависимости от физико-механического состояния породы можно выделить преобладание какого-либо из перечисленных процессов разрушения.

Основываясь на анализе имеющихся результатов и обобщив ранее проведенные научные исследования и опыт применения алмазного бурового инструмента, можно выделить несколько укрупненных групп соответствия резец-порода-характер разрушения.

1. Резец типа *PDC* является самым крупным из алмазных резцов. Такой резец обладает правильной цилиндрической формой и в размере составляет от 8 до 20 мм. Используется такой тип резца при бурении в мягких породах и породах средней твердости (II-V категории по буримости). Учитывая склонность мягких пород к пластической деформации, при их разрушении резцами *PDC* реализуется процесс резания с редким присутствием скалывания, возникающим в случае встречи с более твердыми горными породами. Схема механизма разрушения таким резцом показана на рисунке

2.1. При внедрении резца в породу перед его режущей поверхностью образуется ядро сжатия горной породы 1; от ядра сжатия по направлению к поверхности забоя формируется линия скола 3; оставшая часть породы остается в сложно-напряженном состоянии 2.

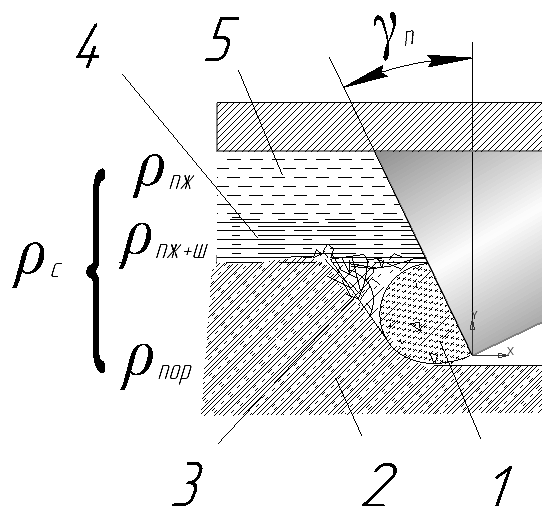


Рисунок 2.1 – Схема механизма разрушения горной породы резцом PDC: 1 – ядро сжатия горной породы; 2 – массив горной породы; 3 – разрушенная горная порода; 4 – резец

2. Крупный (5-10 шт/карат), дробленый алмаз с режущими гранями применяется при разрушении пород средней твердости с прослойками твердых (IV-VIII категории по буримости). Согласно механизму разрушения, при бурении перед режущей гранью такого резца осуществляется процесс скалывания породы, при этом под резцом образуется лунка, глубина которой может превышать глубину внедрения резца в породу. Таким образом происходит реализация процесса резания-скалывания породы.

3. Алмаз овализированный, зернистостью 20-40 шт/карат (1,8-1,5 мм) в породах средней твердости и твердых реализует процесс резания-скалывания, который при повышении сопротивления забоя переходит к раздавливанию. Скалывание породы осуществляется за счет высокого коэффициента трения (из-за шероховатости поверхности), в результате напряжений растяжения на передней грани резца.

4. Полированный алмаз зернистостью 50-150 шт/карат (1,3-0,9 мм) в твердых горных породах в силу снижения коэффициента трения за счет своей гладкой поверхности, реализует механизм раздавливания, разрушая таким образом забой. В этом случае горная порода раздавливается непосредственно под алмазом, шлам спрессовывается под алмазом и выдавливается по сторонам, отслаиваясь в виде стружки за алмазом. При этом в случае бурения упруго-хрупких пород, как следует из опыта [2; 6; 9; 33; 37], за алмазом может образовываться шлейф из осколков разрушенной породы.

5. Очень мелкий (200-500 шт/карат) алмаз не поддается какой-либо обработки, поэтому в промышленности применяется в необработанном виде. Его острые грани являются обязательным условием разрушения породы. При этом, в силу малых размеров его режущей поверхности, напряжения на контакте с породой достигают больших значений. Поэтому при бурении им даже в очень твердых горных породах реализуется процесс микрорезания, механизм которого аналогичен механизму резания крупным резцом в мягкой породе.

2.2 Теоретические основы механики разрушения горной породы алмазным резцом с учетом динамических процессов резания-скалывания-раздавливания горной породы и сопротивления призабойной среды

На эффективность работы любого бурового инструмента прежде всего оказывает влияние разрушающая способность резцов, которыми армирован данный инструмент. Говоря об алмазном буровом инструменте, помимо отмеченных в первой главе качественных преимуществ (прочности, формы, размеров) алмазных резцов, следует отметить возможности их разрушения горной породы.

Результаты анализа экспериментальных данных по резанию-скалыванию-раздавливанию горной породы единичным кристаллом алмаза [15] показывают, что во взаимодействии с горной породой находится незначительный участок алмаза. При этом размеры, форма борозды разрушения определяются в основном профилем той части алмаза, которая взаимодействует с горной породой, а не средним размером алмаза. Т.е. при исследовании работы алмазов различной крупности и формы необходимо учитывать прежде всего профиль их работающей части.

Как показал анализ параметров алмазных резцов, проведенный в главе 1, основными их формами выступают: ромбододекаэдр, октаэдр, куб (алмазный кристалл) (рис. 2.2), цилиндр (*PDC*) и сфера (овализированный алмаз).

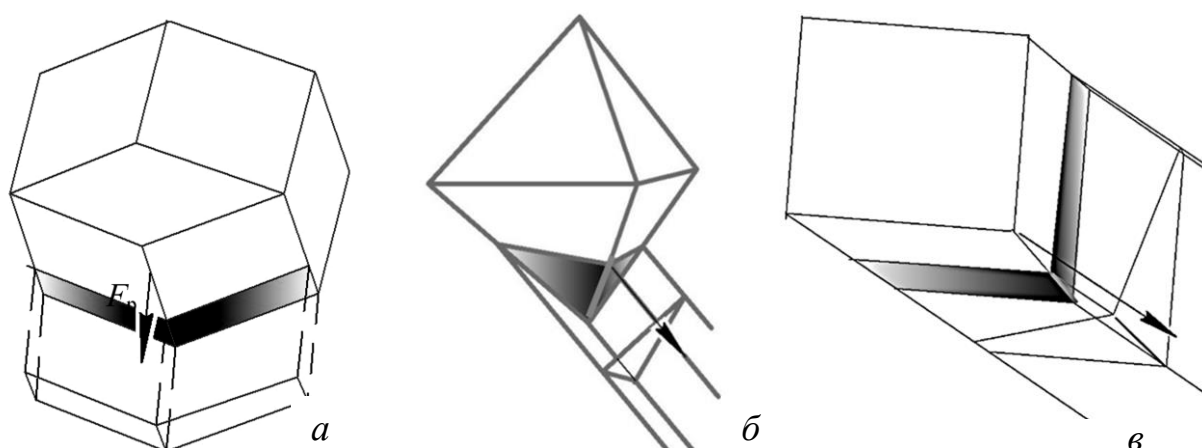


Рисунок 2.2 – Схемы возможного внедрения алмаза в породу: стрелочкой указано направление движения; серым отмечена возможная плоскость взаимодействия алмаза с породой при форме алмаза: *a* – ромбододекаэдр; *б* – октаэдр; *в* – куб

Для реализации резания-скалывания горной породы необходимо ориентировать синтетические алмазные кристаллы правильной формы режущей гранью по направлению движения бурового инструмента. В таком случае, механизм разрушения горной породы необработанным алмазом

можно представить аналогично механизму разрушения твердосплавным резцом. Однако, в случае октаэдра, есть возможность ориентирования алмаза как с положительным так и с отрицательным значением переднего угла резания (γ_n), а куб и ромбододекаэдр можно ориентировать либо при отрицательном значении угла γ_n либо при равном нулю $\gamma_n=0$.

При бурении в породе внедряется часть алмаза, представляющая собой форму клина с широкими боковыми гранями, которые также как и ребро (основной режущий элемент) участвуют в разрушении горной породы (рис. 2.2). При исследовании внедрения клиновидного индентора в породу (рис. 2.3) установлено, что напряжения концентрируются у вершины режущей грани алмаза, а ядро сжатия формируется по боковой поверхности внедренной части клина. При этом сопротивление внедрению индентора оказывает сила трения на поверхностях внедренной в породу его части (T) [94].

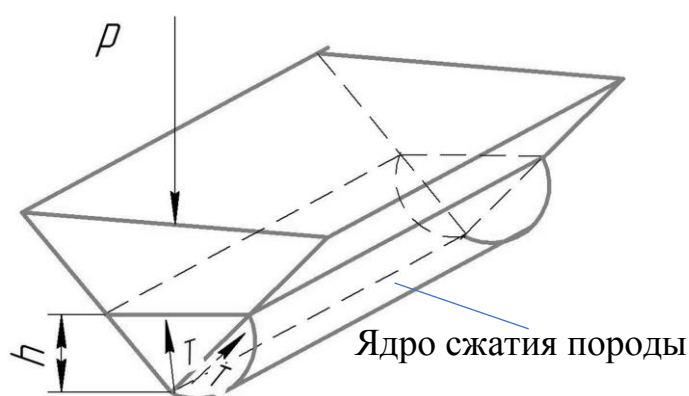


Рисунок 2.3 – Внедрение клина в породу: P – осевая нагрузка; h – глубина внедрения в породу; T – сила трения на поверхностях клина

Опираясь на ранее полученные результаты [74; 94], можно утверждать, что при внедрении резца с острой гранью, на резец действует осевое усилие P , а сопротивление породы разрушению состоит в проявлении реакций забоя N_1 и N_2 (рис. 2.4).

Реакция N_1 определяется как сопротивление, возникающее на опорной поверхности задней грани резца, где выделяется область смятия горной

где $S_{\text{ск}}$ – площадь скалывания породы; $\sigma_{\text{ск}}$ – предел прочности породы на скалывание.

В процессе вращательного бурения на алмазный резец помимо осевого усилия P оказывает влияние тангенциальное усилие, совместным действием они реализуют усилие резания-скалывания-раздавливания горной породы F_p .

Перед режущей поверхностью резца обязательно образуется ядро сжатия горной породы 1 (рис. 2.1, 2.7). При достижении критических значений действующей на резец нагрузки в ядре сжатия породы происходят структурные изменения, в результате чего порода приобретает мелкодисперсное состояние. Размеры и форма ядра сжатия зависят от упругости и твердости породы. В мягких породах формируется ядро сжатия больших размеров, оно не обладает достаточной плотностью и поэтому при даже незначительном усилии на него порода выходит на поверхность. В твердых породах ядро формируется небольшого размера, имеет ярко выраженные очертания в виде полусферы.

С одной стороны на ядро сжатия действует усилие резца, а с другой – реакция еще не разрушенной горной породы. Как указано в работе [15; 90; 94] усилие не разрушенной горной породы определяется прочностными свойствами горной породы и зависит от скорости резания-скалывания породы резцом. Значение данного усилия можно определить по известной формуле [15]:

$$R_{\text{п}} = \frac{\sigma_{\text{ск}} K \pi h^{\frac{3}{2}} \sqrt{d}}{2 \sin \gamma_{\text{ск}}} \quad (2.3)$$

Находясь под действием всестороннего давления порода в ядре сжатия разрушается до фракции мелкого дробления. Такому состоянию породы Ю. И. Протасов дал определение «псевдожидкость». Иными словами, порода на передней грани резца значительно уплотняется [90; 94].

Разрушение горной породы связано с постоянной деформацией породы в той или иной зоне. Состояние породы может изменяться даже в области

ядра сжатия. Как уже было сказано, обязательным условием углубления и разрушения горной породы является образование трещины отрыва. Линия скалывания породы перед ядром сжатия ориентируется с учетом размеров, геометрии ядра сжатия и переднего угла наклона резца [94]. Как правило, алмазный инструмент применяется для бурения в породах средней твердости и твердой. Трещины в таких породах возникают, разрушая связь между минеральными зёрнами, поэтому физико-механические свойства, гранулометрический и химический состав встречающихся в процессе бурения горных пород во многом влияют на изменение скорости образования трещин. Регулирование процесса образования трещины отрыва породы перед рабочей гранью алмаза возможно путем изменения нагрузки и скорости перемещения резца по забою или иными словами частоты вращения породоразрушающего инструмента. Причем даже при достаточной нагрузке, но недостаточном времени ее приложения к разрушаемому участку образования трещины может не произойти. Отсюда, скорость развития трещины должна быть меньше скорости перемещения резца [94].

Порода выше трещины отрыва считается разрушенной и отделяется от горного массива, превращаясь в шлам.

Поэтому под резцом у забоя скважины в месте, где промывочная жидкость встречается с разрушенной горной породой, образуется плотная зона обильного насыщения промывочной жидкости шламом. Именно в этой зоне может происходить проникновение части промывочной жидкости в забой, что способствует дополнительному разупрочнению горной породы.

При движении, учитывая плоскость поверхности, со стороны боковых граней выпущенной части алмаза возникает сопротивление промывочной жидкости, непрерывно циркулирующей между матрицей и забоем $R_{пж}$ (рис. 2.4). Ближе к плоскости контакта с породой, как уже было упомянуто, промывочная жидкость насыщается разрушенной породой (шламом) и на контакте промывочной жидкости с породой возникает сопротивление образованной плотной массы $R_{пж+ш}$ (рис. 2.4).

К тому же, внедренная в породу часть алмаза испытывается сопротивлением со стороны смятой (в ядре сжатия), частично разрушенной (над трещиной отрыва) и не разрушенной горной породы (массив горной породы забоя). Со стороны внедренной части боковых поверхностей – это сопротивление частично разрушенной и смятой породы $R_{см}$. Со стороны режущего ребра сопротивление оказывает описанное выше усилие N_2 . При этом осевому усилию P сопротивление оказывает усилие N_1 (рис. 2.4).

Таким образом, согласно схеме механизма разрушения породы (рис. 2.7, 2.10), на алмазный резец, не зависимо от его типа, в случае реализации резания-скалывания-раздавливания породы воздействует система разнонаправленных сил, часть из которых оказывает сопротивление его снедрению.

В пределах области контакта алмазного резца с горной породой (рис. 2.1, 2.7) можно выделить несколько зон, отличающихся физико-механическими свойствами, состоянием и составом:

- зона постоянно циркулирующей и находящейся под давлением промывочной жидкости, плотность которой ($\rho_{пж}$, рис. 2.1, 2.7) зависит от принятого ее вида и в рассматриваемой зоне будет больше, чем на устье скважины;
- зона промывочной жидкости обильно насыщенной шламом, плотность ($\rho_{пж+ш}$, рис. 2.1, 2.7) которой будет зависеть помимо как от вида промывочной жидкости так и от свойств разрушаемой в данный момент породы;
- зона горной породы, плотность ($\rho_{пор}$, рис. 2.1, 2.7) которой зависит от ее физико-механических свойств и состояния (разрушенная, не разрушенная, сжатая, смятая).

В совокупности перечисленные зоны представляют собой некую среду, образовавшуюся на забое скважины. Учитывая динамические процессы, протекающие на забое скважины при бурении (циркуляция промывочной жидкости, вращение бурового инструмента, колебания бурильной колонны и

т.д.), среда находится под давлением и оказывает сопротивление движению резца R_c :

$$R_c = R_{п.ж} + R_{п.ж+ш} + R_{см}, \quad (2.4)$$

Сопротивление среды можно рассчитать как для скоростного напора по известной формуле Бернулли:

$$R_c = 0,5v_p^2 C_c \rho_c S. \quad (2.5)$$

где C_c – коэффициент формы резца (ориентировочно может изменяться от 1 – плоский резец, до 0,5 – приостренный, ориентированный гранью вперед); ρ_c – весовая плотность среды, Н/м³; S – площадь передней режущей поверхности алмазного резца, на которую действует сопротивление среды, т.е. той части торца алмазного резца, которая взаимодействует и с буровым раствором (выше линии заглабления резца) и с разрушаемой горной породой (ниже линии заглабления резца) м²; v_p – скорость перемещения резца, м/с.

Скорость перемещения алмазного резца (v_p) можно считать линейной и в случае бурения вращательным способом рассчитывать по формуле:

$$v_p = 2\pi\omega r_p, \quad (2.6)$$

где ω – частота вращения бурового инструмента; r_p – расстояния от центра инструмента до места фиксации алмазного резца.

Форма, размер и геометрия установки алмазного резца влияет на площадь контакта его с породой. Так, например, учитывая геометрию алмазного резца правильной формы (рис. 2.2), значение площади передней режущей поверхности алмазного резца S будет зависеть от величины выпуска (H) и радиуса алмаза (r) (рис. 2.5):

$$S = H \cdot d \quad (2.7)$$

Форма резца также влияет на площадь площадки скалывания $S_{ск}$. Так для ромбододекаэдра согласно схеме на рис. 2.5, имеем:

$$S_{\text{ск}} = \frac{h}{\operatorname{tg} \gamma_{\text{ск}}} d, \quad (2.8)$$

где h – глубина резания-скалывания-раздавливания горной породы; d – диаметр алмаза; $\gamma_{\text{ск}}$ – угол скола породы перед рабочей гранью резца.

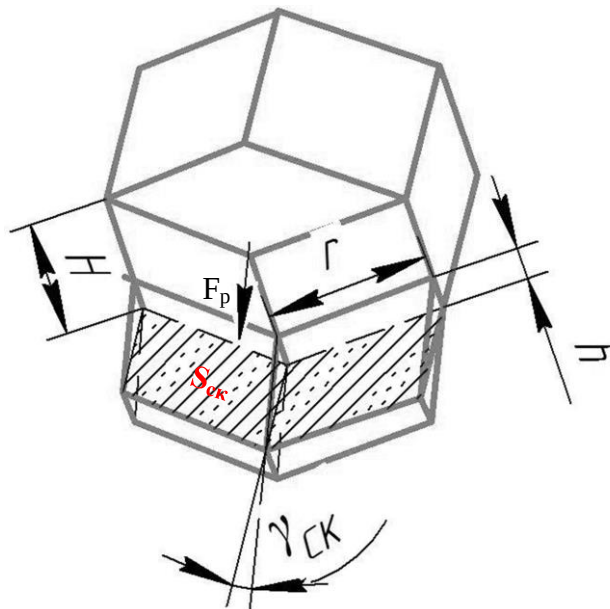


Рисунок 2.5 – Схема для определения площади площадки скалывания

В случае кубической формы, учитывая его ориентацию под отрицательным передним углом $\gamma_{\text{п}}$, можно предположить, что площадь площадки смятия определяется как площадь прямоугольного треугольника с катетами равными глубине резания горной породы h .

В таком случае (рис. 2.6), площадь площадки смятия $S_{\text{см}}$ можно определить как:

$$S_{\text{см}} = \frac{1}{2} h \cdot h = \frac{h^2}{2}, \quad (2.8)$$

где h – глубина резания-скалывания горной породы резцом.

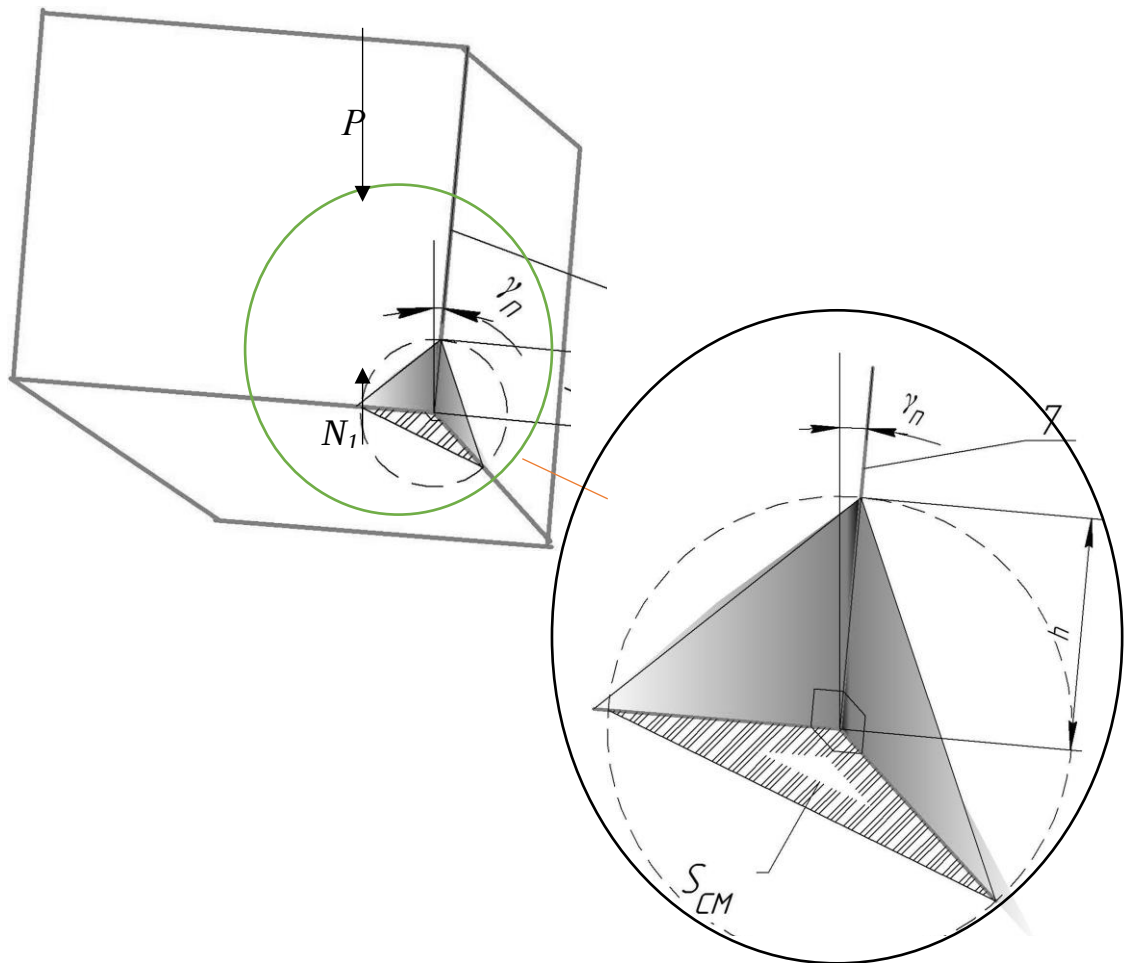


Рисунок 2.6 – Схема внедрения алмаза кубической формы: 7 – режущее ребро алмаза

В процессе бурения острые грани алмазного кристалла изнашиваются и резец приобретает шарообразную форму. В таком случае площадь передней режущей поверхности можно определить как:

$$S = 0,125\pi dH \quad (2.9)$$

Таким образом, исходя из анализа формул (2.7 – 2.9) на степень сопротивления среды будет оказывать влияние размер, выпуск резца и глубина его внедрения в горную породу, определяющие площадь, на которую воздействуют силы сопротивления.

2.2.1 Исследование механизма разрушения горной породы резцом в виде алмазного кристалла

В процессе бурения на алмазный резец округлой формы действует осевая и тангенциальная силы, создающие напряженно-деформированное состояние в породе. Совместным действием эти силы порождают результирующую силу R (рис. 2.7). Направление и величина силы R определяет характер воздействия резца на забой. Со стороны забоя внедрению резца в породу оказывает сопротивление жидкая среда и массив горной породы (F_{Π}) (рис.1).

Разрушение горной породы произойдет только в том случае, когда сила резания F_p будет больше сопротивления забоя F_{Π} .

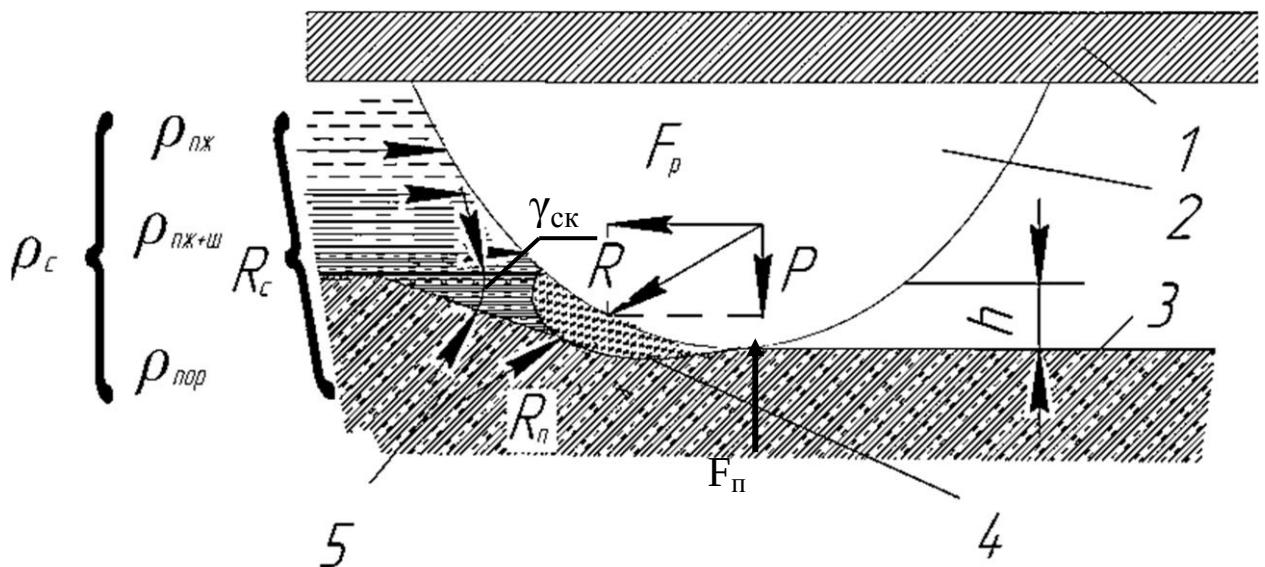


Рисунок 2.7 – Схема механизма разрушения горной породы алмазным резцом округлой формы: 1 – матрица; 2 – резец; 3 – массив горной породы; 4 – ядро сжатия породы; 5 – трещина отрыва.

Усилие резания-скалывания-раздавливания горной породы алмазным резцом округлой формы можно определить путем анализа схемы механизма разрушения горной породы, представленной на рисунке 2.7.

Основываясь на ранее проведенных исследованиях механизма разрушения горной породы алмазным резцом округлой формы [94, формула (3.25)], с учетом гидродинамики призабойной среды, усилие резания-скалывания-раздавливание можно получить следующим образом:

$$F_p = \frac{\pi(h+0.25\sqrt{dh})^2 \sigma_{ск}(1+tg\varphi_n)}{2tg\gamma_{ск}} + f(P - F_n) + R_c \cos\gamma_n, \quad (2.10)$$

где h – глубина внедрения алмаза в горную породу, м; d – диаметр алмазного резца, м; $\sigma_{ск}$ – предел прочности на скалывание горной породы, Па; φ_n – угол внутреннего трения в деформируемых объемах породы перед передней гранью резца, град; $\gamma_{ск}$ – угол скалывания горной породы перед передней гранью резца, град; f – коэффициент трения алмазного резца о горную породу в условиях присутствия среды; P – осевая нагрузка на резец, Н; F_n – усилие, вызванное сопротивлением забоя, направленное навстречу осевому усилию, Н; $F_{тр}$ – сила трения алмазного резца о породу в условиях присутствия среды, Н; R_c – сопротивление со стороны среды, через которую движется со скоростью v_p резец бурового инструмента, Н; γ_n – передний угол резца, град.

Угол скалывания горной породы перед рабочей гранью алмазного кристалла ($\gamma_{ск}$) условно определяется как угол между поверхностью забоя и образованной трещиной отрыва породы (рис. 2.7). Исходя из описанных результатов исследований [90; 94], учитывая возможный износ алмаза и изменение геологических условий бурения, эта величина является непостоянной и может изменяться в процессе бурения. При этом основное влияние на изменение величины угла $\gamma_{ск}$ оказывают: параметры режима бурения; физико-механические свойства перебуриваемой горной породы и ее состояние на момент встречи с резцом.

Особенностью округлого резца является то, что его передний угол γ_n – величина переменная. Варьирование значения переднего угла зависит от глубины углубления резца в горную породу.

При этом передний угол γ_n можно определить по зависимости, полученной путем анализа геометрии схемы механизма разрушения, представленной на рисунке 2.8:

$$\gamma_n = \beta + \Delta = (90 - \alpha) + \arctg \frac{h}{\sqrt{dh}}, \quad (2.11)$$

где α – угол между вектором результирующего режущего усилия резца R и осевого усилия (рис. 3.3), град; h – глубина внедрения алмаза в породу; угол $\beta = (90 - \alpha)$, а угол Δ определен исходя из значений величины $h=AC$ и расстояния AB , равного $\sqrt{dh - h^2}$. Из-за малости величины h^2 AB принято равным $\sqrt{dh}$.

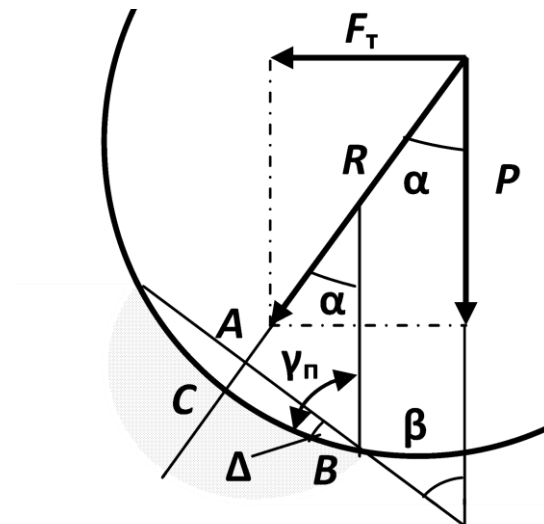


Рисунок 2.8 – Геометрическая схема распределения параметров определения переднего угла γ_n

Как следует из формулы (2.10), усилие резания F_p частично затрачивается на преодоление сил трения в деформируемом участке породы, сил трения резца о породу и сил сопротивления среды. При этом возникает дополнительное сопротивление со стороны массива породы F_n , которое противодействует внедрению резца и снижает действие осевой нагрузки P_{oc} . Это указывает на необходимость при росте сопротивления среды повышения

осевого усилия на резец с целью сохранения глубины резания-скалывания горной породы.

В тоже время, исходя из геометрии схемы механизма разрушения горной породы алмазным резцом (рис. 2.7), результирующее усилие R , являющееся результатом действия на резец сил резания-скалывания F_p и осевого усилия P , можно определить как:

$$R = \frac{F_p}{\cos \gamma_{\Pi}} = \frac{P - F_{\Pi}}{\sin \gamma_{\Pi}}. \quad (2.12)$$

Отсюда, как вектор F_p усилие резания-скалывания-раздавливания горной породы можно представить также следующим образом:

$$F_p = \frac{(P - F_{\Pi})}{\operatorname{tg} \gamma_{\Pi}} \quad (2.13)$$

где P – осевое усилие на резец; F_{Π} – сопротивление забоя; γ_{Π} – передний угол резца.

Силу, вызванную сопротивлением среды и противодействующую осевой нагрузке F_{Π} можно определить как проекцию вектора сопротивления среды R_c на вертикальную плоскость, с учетом предварительной проекции ее на плоскость резца (согласно схеме на рис. 2.9) и рассчитать по формуле:

$$F_{\Pi} = R_c \sin \gamma_{\Pi} \cos \gamma_{\Pi}. \quad (2.14)$$

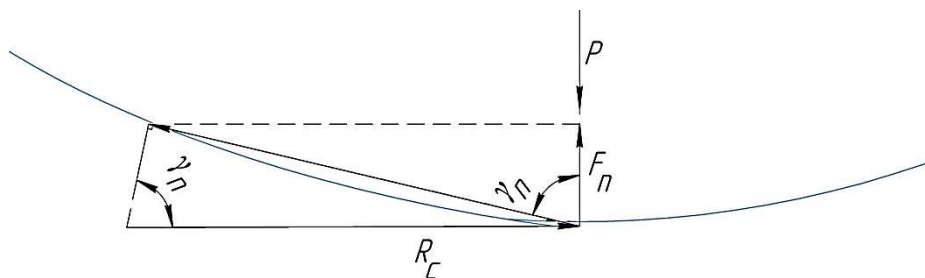


Рисунок 2.9 – Схема определения силы сопротивления забоя F_{Π} с учетом формы поверхности округлого алмаза

Учитывая выражение (2.5) имеем:

$$F_{\Pi} = 0,5v_p^2 C_c \rho_c S \sin \gamma_{\Pi} \cos \gamma_{\Pi}. \quad (2.15)$$

Для округлого алмазного резца площадь S будет зависеть от величины его выпуска (H) и диаметрального размера (d):

$$S = 0,125\pi dH. \quad (2.16)$$

С учетом того, что в породе внедряется часть выпущенной поверхности алмазного кристалла, площадь воздействия среды можно определить как:

$$S = 0,5 \left[r^2 \arccos \left(1 - \frac{H}{r} \right) - (r - H) \sqrt{2rH - H^2} \right] \quad (2.17)$$

Приравняем уравнение (2.10) и (2.13), получим

$$\frac{\pi(h+0,25\sqrt{dh})^2 \sigma_{\text{СК}}(1+tg\varphi_{\Pi})}{2tg\gamma_{\text{СК}}} + f(P - F_{\Pi}) + R_c \cos \gamma_{\Pi} = \frac{(P-F_{\Pi})}{tg\gamma_{\Pi}}, \quad (2.18)$$

Для решения уравнения (2.18) относительно величины глубины резания-скалывания-раздавливания породы h , после преобразования, упростим это выражение до вида:

$$A(h + 0,25\sqrt{dh})^2 + B = C \quad (2.19)$$

где

$$A = \frac{\pi \sigma_{\text{СК}}(1+tg\varphi_{\Pi})}{2tg\gamma_{\text{СК}}} \quad (2.20)$$

$$B = f(P - F_{\Pi}) + R_c \cos \gamma_{\Pi} \quad (2.21)$$

$$C = \frac{P - F_{\Pi}}{tg\gamma_{\Pi}} \quad (2.22)$$

Пусть $C - B = D$, тогда выражение (2.19) будет иметь вид:

$$A(h + 0,25\sqrt{dh})^2 = D. \quad (2.23)$$

Преобразуем и получим

$$h + 0,25\sqrt{d}h = \sqrt{\frac{D}{A}}; \quad (2.24)$$

$$h + 0,25\sqrt{d}\sqrt{h} - \sqrt{\frac{D}{A}} = 0. \quad (2.25)$$

Пусть $x = \sqrt{h}$, следовательно $h = x^2$, преобразовав (2.25) имеем квадратное уравнение типа:

$$x^2 + 0,25\sqrt{d}x + \left(-\sqrt{\frac{D}{A}}\right) = 0, \quad (2.26)$$

корнями которого являются:

$$x_{1,2} = \frac{-0,25\sqrt{d} \pm \sqrt{(0,25\sqrt{d})^2 - 4\left(-\sqrt{\frac{D}{A}}\right)}}{2}, \quad (2.27)$$

т.е.

$$x_1 = \frac{-0,25\sqrt{d} + \sqrt{(0,25\sqrt{d})^2 + 4\sqrt{\frac{D}{A}}}}{2}; \quad (2.28)$$

$$x_2 = \frac{-0,25\sqrt{d} - \sqrt{(0,25\sqrt{d})^2 + 4\sqrt{\frac{D}{A}}}}{2}. \quad (2.29)$$

Таким образом,

$$h_{1,2} = \left(\frac{-0,25\sqrt{d} \pm \sqrt{(0,25\sqrt{d})^2 + 4\sqrt{\frac{D}{A}}}}{2} \right)^2. \quad (2.30)$$

Подставив в (2.30) выражения (2.20, 2.21, 2.22, 2.23), преобразуя и решив полученное уравнение, можно получить выражение для определения значения глубины резания-скалывания-раздавливания горной породы алмазным резцом с учетом сопротивления среды, образовавшейся на забое в процессе бурения скважины:

$$h = \left(\frac{-0,25\sqrt{d} + \sqrt{(0,25\sqrt{d})^2 \pm 4 \sqrt{\frac{2tg\gamma_{\text{СК}}(P(1-tg\gamma_{\text{П}}f) - R_c \sin\gamma_{\text{П}}(\cos\gamma_{\text{П}} - f \sin\gamma_{\text{П}} + 1))}{\pi\sigma_{\text{СК}}tg\gamma_{\text{П}}(1+tg\varphi_{\text{П}})}}}}{2} \right)^2, \quad (2.31)$$

где P является нагрузкой на один резец и зависит от количества резцов, армирующих инструмент:

$$P = P_{\text{ос}} / N, \quad (2.32)$$

где $P_{\text{ос}}$ – осевая нагрузка на породоразрушающий инструмент; N – количество резцов на торце этого инструмента.

Для проверки полученного математического выражения (2.31), решение поставленной задачи можно произвести и другим способом.

Подставив в (2.15) формулу (2.18), после преобразования получим следующее выражение:

$$\frac{\pi(h+0,25\sqrt{dh})^2}{2tg\gamma_{\text{СК}}} \sigma_{\text{СК}} (1 + tg\varphi_{\text{П}}) + f(P - R_c \sin\gamma_{\text{П}} \cos\gamma_{\text{П}}) + R_c \cos\gamma_{\text{П}} - \frac{(P - R_c \sin\gamma_{\text{П}} \cos\gamma_{\text{П}})}{tg\gamma_{\text{П}}} = 0. \quad (2.33)$$

После преобразований имеем:

$$\frac{\pi(h+0,25\sqrt{dh})^2}{2tg\gamma_{\text{СК}}} \sigma_{\text{СК}} (1 + tg\varphi_{\text{П}}) + R_c \cos\gamma_{\text{П}} + (P - R_c \sin\gamma_{\text{П}} \cos\gamma_{\text{П}}) \left(f - \frac{1}{tg\gamma_{\text{П}}} \right) = 0 \quad (2.34)$$

Для упрощения вычислений выражения (2.34), введем параметры A и B .

Пусть:

$$A = \frac{\pi\sigma_{\text{СК}}(1+tg\varphi_{\text{П}})}{2tg\gamma_{\text{СК}}} \quad (2.35)$$

$$B = R_c \cos\gamma_{\text{П}} + (P - R_c \sin\gamma_{\text{П}} \cos\gamma_{\text{П}}) \left(f - \frac{1}{tg\gamma_{\text{П}}} \right) \quad (2.36)$$

подставив (2.35) и (2.36) в (2.34) получаем квадратное уравнение следующего вида

$$A(h + 0.25\sqrt{dh})^2 + B = 0 \quad (2.37)$$

Согласно выражению (2.36) параметр B зависит от значения переднего угла установки алмазного кристалла γ_{π} , который как было упомянуто, в отличие от других резцов, является величиной переменной и зависит от глубины внедрения резца в породу, а следовательно от направления распространения ядра сжатия породы. Отсюда, следует, что изучаемую систему механизма взаимодействия алмазного кристалла с горной породой в процессе бурения можно охарактеризовать как мелкогабаритную, динамическую с изменяющимися во времени взаимодействующими параметрами.

Учитывая, что значение коэффициента трения (f , выражение (2.36)) всегда численно меньше единицы, а величина переднего угла установки резца колеблется в пределах $0^{\circ} < \gamma_{\pi} < 70^{\circ}$, соответственно $\operatorname{tg} \gamma_{\pi} < 1$, а $\frac{1}{\operatorname{tg} \gamma_{\pi}} > 1$, тогда значение выражения, входящего в состав формулы (2.36) $f - \frac{1}{\operatorname{tg} \gamma_{\pi}} < 1$, а следовательно параметр B всегда будет отрицательным.

Отсюда справедливо утверждение, что уравнение (2.37) является уравнением типа:

$$A(h + 0.25\sqrt{dh})^2 + (-B) = 0 \quad (2.38)$$

Уравнение (2.38) можно преобразовать следующим образом:

Перенесем B в правую сторону, получим:

$$A(h + 0.25\sqrt{dh})^2 = |B| \quad (2.39)$$

Разделим левую и правую сторону на A , получим:

$$(h + 0.25\sqrt{dh})^2 = \frac{|B|}{A} \quad (2.40)$$

из правой и левой части извлечем корень:

$$h + 0.25\sqrt{dh} = \sqrt{\frac{|B|}{A}} \quad (2.41)$$

Перенесем $\sqrt{\frac{|B|}{A}}$ в левую сторону и получим уравнение следующего вида:

$$h + 0.25\sqrt{d}h - \sqrt{\frac{|B|}{A}} = 0, \quad (2.42)$$

Приведем полученное выражение к виду классического квадратного уравнения типа:

$$ax^2 + bx + c = 0 \quad (2.43)$$

Пусть $x = \sqrt{h}$, тогда, подставив выражение (2.42) приобретет вид квадратного уравнения:

$$x^2 + 0.25\sqrt{d}x + \left(-\sqrt{\frac{|B|}{A}}\right) = 0. \quad (2.44)$$

Основываясь на том, что корнями выражения (2.44) является выражение:

$$x_{1,2} = -\frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (2.45),$$

получим корни уравнения (2.44) в следующем виде:

$$x_1 = -\frac{0.25\sqrt{d} + \sqrt{(0.25\sqrt{d})^2 - 4\left(-\sqrt{\frac{|B|}{A}}\right)}}{2} \quad (2.46)$$

$$x_2 = -\frac{0.25\sqrt{d} - \sqrt{(0.25\sqrt{d})^2 - 4\left(-\sqrt{\frac{|B|}{A}}\right)}}{2} \quad (2.47)$$

Учитывая, что $x = \sqrt{h}$ тогда $h = x^2$, имеем:

$$h_1 = \left(-\frac{0.25\sqrt{d} + \sqrt{(0.25\sqrt{d})^2 + 4\sqrt{\frac{|B|}{A}}}}{2}\right)^2 \quad (2.48)$$

$$h_2 = \left(-\frac{0.25\sqrt{d} - \sqrt{(0.25\sqrt{d})^2 + 4\sqrt{\frac{|B|}{A}}}}{2}\right)^2 \quad (2.49)$$

Отсюда, формулу определения глубины резания-скалывания-раздавливания горной породы можно представить в виде выражения:

$$h_{1,2} = \left(\frac{-0,25\sqrt{d} \pm \sqrt{(0,25\sqrt{d})^2 + 4\sqrt{\frac{|B|}{A}}}}{2} \right)^2. \quad (2.50)$$

Подставив выражение (2.35) и (2.36) в (2.50), путем преобразования, получаем формулу полностью идентичную (2.30).

Анализ выведенного выражения (2.31) показывает, что на динамическую глубину резания-скалывания-раздавливания породы резцом в виде алмазного кристалла оказывают влияние такие параметры, как:

- размер резца;
- коэффициенты внешнего и внутреннего трения, величина которых зависит от геолого-технических факторов;
- прочность разрушаемой горной породы на скалывание;
- скорость резания-скалывания-раздавливания породы, которая определяется как линейная скорость перемещения резца по забою скважины – v_p . При этом повышение скорости v_p способствует снижению глубины резания-скалывания-раздавливания породы, что связано с повышением сопротивления призабойной среды.

2.2.2 Исследование механизма разрушения горной породы резцом типа *PDC*

Как правило, резцы *PDC* располагаются в буровом инструменте по определенной схеме, формируя линии резания. В отличие от алмазного кристалла каждый *PDC* имеет свой фиксированный передний (γ_n) и фронтальный (ϕ_p) угол установки. Значение этих углов влияет на то, какая

геометрическая часть режущей поверхности резца войдет в контакт с горной породой. Также, в зависимости от свойств разрушаемой породы, это повлечет к неоднородности распределения сил, действующих на резец при его контакте с породой.

Учитывая цилиндрическую форму резца *PDC* с плоской рабочей поверхностью, согласно результатам исследований, описанных в главе 1, в случае фиксации постоянной величины глубины резания-скалывания h , результирующее усилие резца на породу R будет ориентировано под прямым углом к плоскости резца (рис. 1.12, *a*) [90; 94].

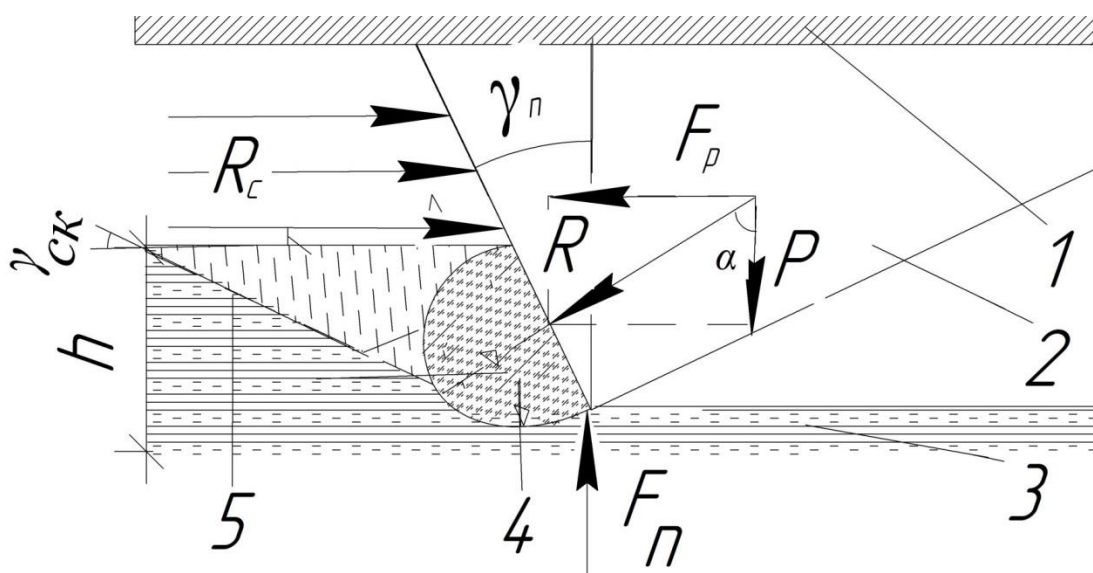


Рисунок 2.10 – Схема механизма разрушения горной породы алмазным резцом типа *PDC*: 1 – матрица; 2 – резец; 3 – неразрушенный участок горной породы; 4 – ядро сжатия породы; 5 – трещина отрыва

Из анализа схемы механизма разрушения (рис. 2.10) и результатов исследования [94], усилие резания-скалывания резцом *PDC* с учетом динамических процессов на забое можно определить по формуле (2.13) или как:

$$F_p = S_{ск} \sigma_{ск} (1 + \operatorname{tg} \varphi) + f(P - F_n) + R_c, \quad (2.51)$$

где $S_{\text{ск}}$ – площадь площадки скалывания породы на передней грани резца, м^2 ; $\sigma_{\text{ск}}$ – предел прочности породы на скалывание, Па ; φ – угол внутреннего трения в деформируемом объеме породы на передней грани резца, град; f – коэффициент внешнего трения на контакте поверхность резца – горная порода; R_c – сопротивление со стороны среды, через которую движется со скоростью v_p резец бурового инструмента.

Учитывая цилиндрическую форму *PDC* размер площадки скалывания породы $S_{\text{ск}}$ можно рассчитать как площадь половины эллипса с полуосями $0,5\rho$ и AB (рис. 2.11, б) [96]:

$$S_{\text{ск}} = 0,5 \pi \rho AB = 0,5 \pi \sqrt{dh} \frac{h}{\sin \gamma_{\text{ск}}}, \quad (2.52)$$

где d – диаметр резца, м; h – глубина внедрения резца в породу, м; $\gamma_{\text{ск}}$ – угол скалывания породы на передней грани резца, град [96].

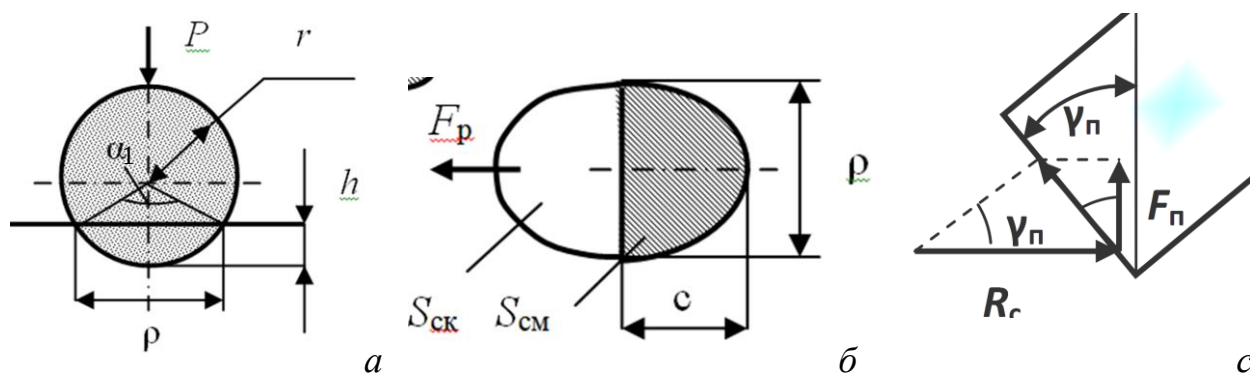


Рисунок 2.11 – Схема для расчета: а, б – площадок смятия и скалывания породы резцом *PDC* цилиндрической формы; в – усилия сопротивления забоя $F_{\text{п}}$

После подстановки (2.52) в формулу (2.51) определим усилие резание-скалывания породы резцом *PDC* с учетом возможности установки резца 1 согласно рекомендации [11; 94] поворота его в направлении резания-

скалывания породы, т.е. с фиксированным значением фронтального угла φ_p [96]:

$$F_p = \frac{\pi \sigma_{ск} h \sqrt{ah}}{\sin \gamma_{ск}} \cos \varphi_p (1 + tg \varphi) + f(P - F_{п}) + R_c. \quad (2.53)$$

Величина сопротивления среды R_c аналогично как для алмазного кристалла определяется по формуле (2.5), при этом площадь поверхности резца S – площадь резца или его проекции на линию резания, если угол резания φ_p больше нуля (в пределах не более $5 - 10^\circ$).

Площадь рабочей поверхности резца S состоит из двух частей. Одна часть находится над забоем, ее величину справедливо определить как

$$S_2 = \frac{360}{\alpha_1} \pi r^2 - \rho(r - h) = \frac{360}{\alpha_1} \pi r^2 - \sqrt{2rh}(r - h), \quad (2.54)$$

Вторая углублена в породу и ее значение рассчитывается по следующей зависимости:

$$S_1 = \pi r^2 - \left[\frac{360}{\alpha_1} \pi r^2 - \sqrt{2rh}(r - h) \right]. \quad (2.55)$$

В формулах (2.54) и (2.55) угол α и расстояние ρ (рис. 2.11, а) зависят от геометрических параметров резца и, согласно схеме установки режущей поверхности резца при бурении, их значения находятся по следующим зависимостям:

$$\alpha_1 = 2 \arccos \frac{r-h}{r};$$

$$\rho = \sqrt{2rh}.$$

где r – радиус рабочей поверхности резца PDC.

Усилие $F_{п}$ является результатом сопротивления среды со стороны забоя, поэтому в выражениях (2.51) и (2.53) его можно найти как проекцию

усилия R_c на вертикальную ось. Для этого предварительно вектор усилия R_c необходимо спроецировать на плоскость резца, которая как известно установлена под отрицательным углом $(-\gamma_n)$, а затем уже на вертикальную линию (рис. 2.11, в) [96].

Отсюда следует, что усилие F_n будет равно

$$F_n = 0,5v_p^2 \rho_c S C_c \sin \gamma_n \cos \gamma_n. \quad (2.56)$$

С учетом полученных формул составляющих выражения (2.53), получим следующий вид зависимости (2.56):

$$F_p = \frac{\pi \sigma_{ск} h \sqrt{dh}}{\sin \gamma_{ск}} \cos \varphi_p (1 + tg \varphi) + f(P - 0,125v_p^2 \rho_c \pi d^2 C_c \sin \gamma_n \cos \gamma_n) + 0,125v_p^2 \rho_c \pi d^2 C_c \cos \gamma_n. \quad (2.57)$$

Анализ полученного выражения 2.57 указывает на то, что усилие резания-скалывания зависит от большого количества параметров. Так, например, его значение определяет предел прочности породы на скалывание $\sigma_{ск}$, что необходимо учитывать при создании условий, способствующих эффективному процессу разрушения. При этом данная величина пропорционально зависит от размера резцов, переднего угла их установки.

Величина усилия резания должно соответствовать необходимой глубине разрушения породы h , с учетом значения переднего угла резания-скалывания φ_p .

При неизменных условиях нагрузки резца усилие резания может быть различным. Меньшее при высоких показателях коэффициента трения резца о породу, плотности среды, в которой работает резец.

Значительное влияние на усилие резания оказывает скорость перемещения резца. Так как именно этот параметр оказывает влияние на рост или снижение сопротивления среды как со стороны забоя так и со стороны режущей поверхности резца.

Преобразовав, формулу (2.57) можно представить в более упрощенном виде:

$$F_p = \frac{\pi \sigma_{\text{ск}} h \sqrt{dh}}{\sin \gamma_{\text{п}}} \cos \varphi_p (1 + tg \varphi) + f(P_{\text{ос}} - A \sin \gamma_{\text{п}}) + A, \quad (2.58)$$

где $A = 0,125 v_p^2 \rho_c \pi d^2 C_c \cos \gamma_{\text{п}}$.

Используя ранее полученное выражение (2.13) для расчета F_p , можно определить глубину резания-скалывания породы h из равенства полученных формул (2.13) и (2.58).

Глубина резания-скалывания будет равна:

$$h = \sqrt[2]{\left\{ \frac{[(P - A \sin \gamma_{\text{п}})(1 - f tg \gamma_{\text{п}}) - A tg \gamma_{\text{п}}] \sin \gamma_{\text{ск}}}{\pi \sigma_{\text{ск}} \sqrt{d} tg \gamma_{\text{п}} \cos \varphi_p (1 + tg \varphi)} \right\}^3}, \quad (2.59)$$

где $A = 0,125 v_p^2 \rho_c \pi d^2 C_c \cos \gamma_{\text{п}}$.

Таким образом, динамическую глубину резания-скалывания резцом *PDC* с учетом влияния гидродинамических процессов испытывающих призабойной средой, можно определить по формуле:

$$h = \sqrt[2]{\left\{ \frac{[(P - (R_c \cos \gamma_{\text{п}} \sin \gamma_{\text{п}})(1 - f tg \gamma_{\text{п}}) - R_c \cos \gamma_{\text{п}} tg \gamma_{\text{п}}] \sin \gamma_{\text{ск}}}{\pi \sigma_{\text{ск}} \sqrt{d} tg \gamma_{\text{п}} \cos \varphi_p (1 + tg \varphi)} \right\}^3}, \quad (2.60)$$

Или, подставив 2.5 в 2.60, получим:

$$h = \sqrt[2]{\left\{ \frac{[(P - (0,5 v_p^2 C_c \rho_c S \cos \gamma_{\text{п}} \sin \gamma_{\text{п}})(1 - f tg \gamma_{\text{п}}) - 0,5 v_p^2 C_c \rho_c S \cos \gamma_{\text{п}} tg \gamma_{\text{п}}] \sin \gamma_{\text{ск}}}{\pi \sigma_{\text{ск}} \sqrt{d} tg \gamma_{\text{п}} \cos \varphi_p (1 + tg \varphi)} \right\}^3}. \quad (2.61)$$

Анализ выведенной формулы показывает, что на динамическую глубину резания-скалывания породы резцом *PDC* оказывают влияние многочисленные факторы такие как геометрические параметры резца, а именно передний $\gamma_{\text{п}}$ и фронтальный φ_p углы установка; диаметр.

Также как и для резца в виде алмазного кристалла, глубина резания резцом *PDC* снижается в случае повышения коэффициента трения резца о породу или внутри слоев горной породы; прочности горной породы и скорости перемещения резца v_p^2 .

Как следует из формулы (2.61), повышение величины переднего отрицательного угла γ_n приводит к снижению глубины резания-скалывания породы за счет компенсации части осевого усилия реакцией среды (разрушаемой горной породы и бурового раствора, насыщенного образующимся шламом). Повышение угла поворота резца ϕ_p приводит к увеличению глубины резания-скалывания h , что можно связать со снижением сопротивления резанию-скалыванию породы из-за уменьшения ширины борозды разрушения [96].

При этом становится очевидна роль скорости резания-скалывания породы при формировании борозды разрушения и размера рабочей грани резца на степень сопротивления призабойной среды. Согласно выражению 2.61, повышение скорости и площади контакта влечет за собой снижение глубины резания-скалывания породы.

2.3 Влияние коэффициента сопротивления горной породы на глубину резания-скалывания-раздавливания горной породы алмазным резцом

Сопротивление, возникающее со стороны забоя, оказывает влияние на итоговые производительные результаты бурения. Сопротивление горной породы является препятствующим усилием внедрению резцов бурового инструмента в породу. Изменение сопротивления со стороны забоя сигнализирует о смене физико-механического состояния горного массива в зоне, на которую оказывает воздействие режущая часть инструмента или об износе резца.

Оценить степень влияния сопротивления на результативность бурения можно величиной тангенциального усилия резания-скалывания горной породы и коэффициента ее сопротивления [74; 15-17].

Имея выражение, определяющее крутящий момент, можно найти тангенциальное усилие F_t , возникающее при резании-скалывании горной породы буровым алмазным инструментом, как:

$$M_{кр} = F_t R_{и} = \frac{N}{\omega}, \quad (2.70)$$

где $R_{и}$ – средний радиус торца бурового инструмента [94]; а расчет забойной мощности N можно осуществить путем использования известного выражения:

$$N = \frac{\mu_k P R_{и} \omega}{97,5} \quad (2.71)$$

где μ_k – коэффициент сопротивления резцу; P – осевая нагрузка на буровой инструмент; ω – частота вращения [94].

Подставим в выражение (2.70) формулу (2.71) и преобразовав полученное в результате выражение с учетом количества алмазных резцов на бурового инструмента и условие разрушения породы, получим выражение, позволяющее рассчитать тангенциальное усилие, которое примет следующий вид:

$$F_t = \frac{\mu_k P_{ос} h_{л}}{N_c h} \quad (2.72)$$

где N_c – число алмазных резцов, армирующих торец породоразрушающего инструмента; $h_{л}$ – величина глубины лунки разрушения породы.

Учитывая возможную величину площади контакта резца и призабойной среды, формула расчета реакции сопротивления среды R_c может принять следующий вид

$$R_c = 0,0625 v_p^2 C_c \rho_c \pi d H. \quad (2.73)$$

Принимая во внимание, что скорость резания-скалывания определяется как скорость перемещения резца по забою $v_p = 2\pi\omega r_p$, то согласно (2.73) можно определить сопротивление среды в зависимости от частоты вращения бурового инструмента ω и радиуса торца алмазного бурового инструмента:

$$R_c = 0,25 \pi^3 \omega^2 r^2 C_c \rho_c d H. \quad (2.74)$$

С учетом параметра сопротивления R_c тангенциальное усилие, представленного в формуле (2.72) будет выглядеть следующим образом:

$$F_T = \frac{\mu_k P_{oc} h_l}{N_c h} + 0,25 \pi^3 \omega^2 r^2 C_c \rho_c d H = \frac{\mu_k P_{oc} h_l}{N_c h} + R_c. \quad (2.75)$$

Если рассмотреть схему разрушения горной породы алмазным резцом [90-102] (рис. 2.8 и 2.10) с геометрической точки зрения, то становится очевидным то, что отношение $\frac{F_T}{P_{oc}}$ – это ничто иное, как тангенс угла α – угла между действующим осевым усилием P_{oc} и результирующей силой R резания-скалывания-раздавливания горной породы, по направлению которой формируется ядро сжатия горной породы.

Согласно схеме механизма разрушения горной породы алмазным резцом [90-102] (рис. 2.8 и 2.10), угол α можно определить как

$$\alpha = \arctg \frac{F_T}{P}, \quad (2.76)$$

а с учетом выражения (2.75) угол α будет равен

$$\alpha = \arctg \frac{\mu_k h_l}{N_c h}. \quad (2.77)$$

Принимая во внимание результаты исследования режущей способности единичного алмазного резца, в случае равенства глубины резания-скалывания глубине лунки разрушения (при установившемся режиме резания), согласно выражению (2.77), коэффициент сопротивления резания-

скалывания-раздавливания горной породы единичным алмазом можно найти как:

$$\mu_k = \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.78)$$

Согласно аналитическому исследованию схемы механизма разрушения горной породы алмазным резцом, приведенного в работе [94], принимая во внимание полученные результаты, значение угла между действующим осевым усилием P_{oc} и результирующей силой R резания-скалывания-раздавливания горной породы можно выразить в виде

$$\alpha = \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{h}{d}}, \quad (2.79)$$

Исходя из представленного анализа, можно получить равенство следующего вида

$$\frac{\mu_k h_L}{N_c h} + \frac{R_c}{P_{oc}} = \sqrt{\frac{h}{d}}. \quad (2.80)$$

Из данной формулы, осуществив преобразование относительно μ_k , следует, что коэффициент сопротивления горной породы внедрению резца, с учетом гидродинамических процессов, протекающих на забое скважины можно определить по следующей математической зависимости:

$$\mu_k = \frac{N_c h \left(\sqrt{\frac{h}{d}} - \frac{R_c}{P_{oc}} \right)}{h_L}. \quad (2.81)$$

При этом известно, что значение коэффициента сопротивления перемещению резцов зависит от величины коэффициента трения резцов о породу f и коэффициента сопротивления породы разрушению μ_b . Т.е. коэффициент μ_k можно записать как выражение:

$$\mu_k = \mu_b + f. \quad (2.82)$$

Формула (2.81) не включает коэффициента трения f поэтому правомерно включить данный параметр в полученную зависимость. В связи с учётом вышеприведенного, коэффициент сопротивления μ_k можно рассчитать по формуле, имеющей следующий вид:

$$\mu_k = \frac{N_c h \left(\sqrt{\frac{h}{d}} - \frac{R_c}{P_{oc}} \right)}{h_{л}} + f. \quad (2.83)$$

где N_c – число алмазных резцов, армирующих торец породоразрушающего инструмента; h – глубина внедрения резца в породу; $h_{л}$ – величина глубины лунки разрушения породы; d – диаметр резца; R_c – гидродинамическая составляющая сопротивления забоя (реакции сопротивления среды); P_{oc} – осевая нагрузка на буровой инструмент; f – коэффициента трения резца о породу.

В формуле (2.83) отражено влияние на коэффициент сопротивления μ_k таких параметров как глубина внедрения резца в породу h , количество резцов на торце породоразрушающего инструмента N_c и их диаметральный размер d , величина формируемой лунки разрушения $h_{л}$, коэффициент трения резца о горную породу f и динамическая составляющая работы бурового инструмента R_c .

Согласно формуле (2.83) динамическая составляющая сопротивления R_c вызывает снижение коэффициента сопротивления μ_k , что объясняется тем, что рост линейной скорости перемещения резца v_p , вызванный повышением частоты вращения бурового инструмента ω приводит к снижению глубины формируемой борозды разрушения. На рисунке 2.12 представлены зависимости, полученные экспериментально, показывающие связь частоты вращения ω и глубину формируемой резцом борозды разрушения $h_{л}$ [15].

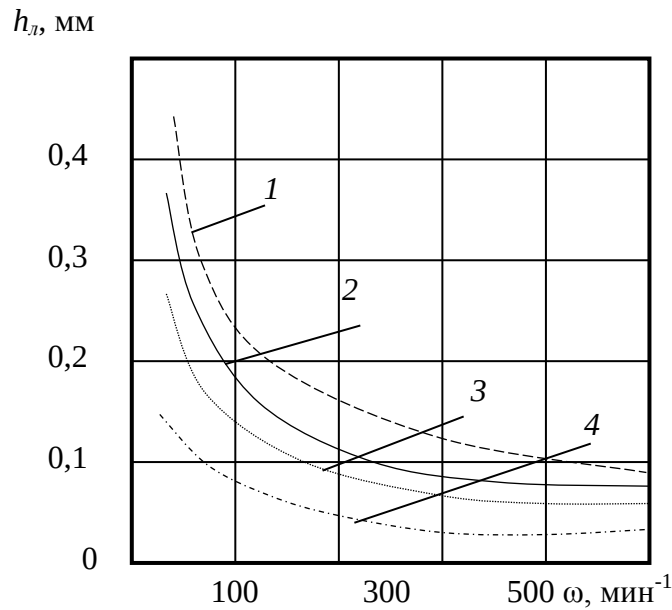


Рисунок 2.12 – Зависимость глубины борозды разрушения алмазным резцом ($h_{л}$) от частоты вращения (ω) при осевых нагрузках на алмазный резец: 1 – 140 Н; 2 – 100 Н; 3 – 56 Н; 4 – 35 Н [15]

В работе [15] на основании экспериментальных данных представлена графическая зависимость коэффициента сопротивления μ_k от частоты вращения породоразрушающего инструмента ω в процессе бурения (рис. 2.13).

Как следует из приведённых данных с повышением частоты вращения ω коэффициент сопротивления μ_k снижается. Это осуществляется из-за того, что происходит снижение величины глубины борозды разрушения $h_{л}$. Анализ полученной формулы (2.83) указывает на то, что повышение глубины $h_{л}$ действительно приводит к снижению μ_k . Таким образом, основываясь на результатах экспериментальных данных, приведенных в работе [15], обосновано доказательство правомерности выведенной зависимости.

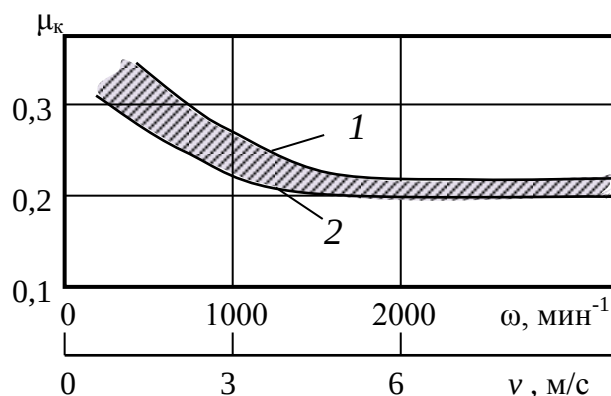


Рисунок 2.13 – Зависимость коэффициента сопротивления μ_k от линейной скорости перемещения резца (v) и частоты вращения (ω) при: 1 – осевой нагрузке 12 кН; 2 – осевой нагрузке 6 кН [15]

В формуле (2.83) также участвует соотношение $h/h_{\text{л}}$. Отношение значений глубины внедрения резца в породу h к глубине лунки борозды разрушения $h_{\text{л}}$ зависит от твердости перебуриваемой горной породы и размера алмазного резца, армирующего породоразрушающий инструмент.

Например, для более пластичных и менее твердых горных пород, а также более мелких резцов глубина внедрения резца в породу будет равна глубине борозды разрушения, т. е. $h/h_{\text{л}} = 1$, что указывает на то, что в разрушении породы участвуют все резцы торцевой части инструмента (при их количестве N_c).

Если глубина борозды разрушения превышает глубину внедрения резца в породу, отношение $h/h_{\text{л}} < 1$. Это указывает на то, что режим разрушения от резания-скалывания переходит в режим раздавливания, что характерно для применения крупных и полированных алмазных резцов и разрушения более твердых и упругих горных пород.

Как следует из анализа приведенного выражения (2.83) на коэффициент сопротивления μ_k определенное влияние оказывает размер алмазных резцов. Следовательно, и на энергоемкость разрушения породы тоже.

В ходе экспериментальных работ [15] было определено влияние на значение величины коэффициента сопротивления μ_k диаметального размера

алмазного резца (рис. 2.14). Анализ графика, приведенного на рисунке 2.14, показывает, что уменьшение размера алмазного резца приводит к увеличению коэффициента сопротивления. Причем с уменьшением размера резца на 1 мм коэффициент сопротивления возрастает на 0,025. Полученные закономерности правомерно интерпретировать и на изменения показателей значения забойной мощности. Это объясняет результаты полученные опытным путем, когда при бурении по одной и той же породе импрегнированным буровым инструментом затраты мощности были на 20–25 % больше, чем при бурении однослойным породоразрушающим инструментом [15].

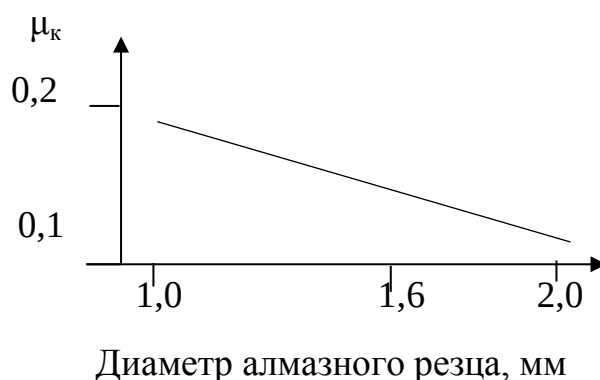


Рисунок 2.14 – Зависимость коэффициента сопротивления от диаметра алмазного резца по [15]

Руководствуясь вышесказанным, можно утверждать, что коэффициент сопротивления μ_k правомерно считать своеобразным показателем эффективности разрушения [91].

Согласно имеющимся данным справочного материала величиной коэффициента сопротивления μ_k принято считать значение, находящемся в пределах от 0,02 до 0,6. При этом бурение алмазным инструментом характеризуется показателями в пределах от 0,22 до 0,31 [74; 91; 94].

Исходя из того, что коэффициент сопротивления μ_k является параметром, характеризующим степень изменения показателя углубления за

оборот, можно классифицировать состояние разрушения породы по значению величины μ_k [91].

1. Случай отсутствия разрушения возможен при $\mu_k = f$.

Если резцы перемещаются по поверхности забоя, осуществляя лишь трение, но при этом не внедряясь в породу, углубление наблюдаться не будет, т.е. $h = 0$. Исходя из выражения (2.83) коэффициент сопротивления будет минимален и равен коэффициенту трения резца о породу. По известным данным [74] коэффициент трения зависит от свойств горной породы, материала резца и среды их взаимодействия и, как правило, находится в пределах от 0,02 до 0,13.

2. Случай износа алмазного резца ($\mu_k = 0,02-0,15$; $\mu_k = 0,4-0,6$).

Износ алмазного резца происходит при условии, если глубина внедрения его в породу (h) составляет 0,16...0,36 диаметра алмаза. Согласно экспериментальным данным [74; 15] при бурении заполированным алмазным режущим элементом величина μ_k составляет 0,02...0,15. При термомеханическом разрушении рабочей части бурового инструмента μ_k достигает больших значений (от 0,4 до 0,6).

3. Случай эффективного разрушения горных пород ($\mu_k = 0,15 - 0,4$).

Учитывая, что при алмазном бурении показатель μ_k находится в диапазоне от 0,22 до 0,31, можно заключить, что эффективное разрушение горных пород алмазным инструментом соответствует ограниченному пределу значений коэффициента μ_k от 0,15 до 0,4, которого и рекомендуется придерживаться для обеспечения эффективного бурения.

Анализ графических данных, полученные в результате проведения опытных работ [15-17] (рис. 2.13), указывают на то, что увеличение частоты вращения ведет к снижению коэффициента сопротивления μ_k , а рост осевой нагрузки приводит к повышению его значения. Полученные выводы можно обосновать особенностью механизма разрушения горной породы, которые характеризуются изменением углубления за оборот при варьировании величины частоты вращения бурового инструмента. Так усталостно-

поверхностное разрушение горной породы возникает в том случае, когда инструмент создает на забое напряжения, но они не достаточны для реализации разрушения, и накапливаются до определенного показателя. В этом случае значение осевой нагрузки недостаточно для реализации объемного разрушения. При этом только рост частоты вращения приведет к росту углубления. Однако, похожий режим может наблюдаться и в случае зашламования забоя скважины. Даже если осевой нагрузки будет достаточно для объемного разрушения породы, но при этом подача промывочной жидкости будет недостаточной для качественной очистки забоя от шлама, характер разрушения останется усталостно-поверхностным. Отличить такой режим можно, наблюдая снижение коэффициента сопротивления при росте значения механической скорости бурения.

При реализации объемного разрушения породы повышение сил сопротивления возможны при высоких показателях скорости резания. В этом случае к снижению углубления за оборот ведет именно повышение частоты вращения.

Отсюда коэффициент сопротивления можно считать величиной характеризующей интенсивность разрушения горной породы. Характер изменения и величина этого показателя позволяет осуществлять прогноз возможностей разрушения горной породы. Например, коэффициент сопротивления равный коэффициенту трения f указывает на отсутствие углубления.

Таким образом полученное выражение (2.83) аналитически подтверждает результаты экспериментальных исследований [74; 15-17; 152], демонстрирующих снижение глубины борозды разрушения породы h_d с повышением частоты вращения ω . Это объясняется тем, что с ростом скорости перемещения резца v_r , повышается сопротивление среды R_c (формула 2.83) и такое перераспределение сил приводит к смещению ядра сжатия породы под резец. Испытывая повышающееся сопротивление забоя,

резец приобретает траекторию движения в направлении поверхности забоя, что в свою очередь приводит к снижению коэффициента сопротивления μ_k .

ВЫВОДЫ

На основании проведенных теоретических исследований получены следующие выводы:

1. в процессе бурения на забое образуется жидкая среда, оказывающая сопротивление резцу вследствие наличия динамических сил;
2. система механизма взаимодействия алмазного резца с горной породой в процессе бурения является мелкогабаритной и динамической с изменяющимися во времени взаимодействующими параметрами такими, как размер и форма резца, свойства горной породы, нагрузка на резец, сопротивление резцу;
3. увеличение скорости резания-скалывания-раздавливания горной породы повышает сопротивление призабойной среды, тем самым снижая динамическую глубину внедрения резца в горную породу;
4. коэффициент сопротивления породы является показателем интенсивности разрушения горной породы и зависит от скорости перемещения резца по забою.

Таким образом, значительное влияние на эффективность процесса разрушения горных пород алмазными резцами (*PDC* и алмазные резцы в виде кристаллов) оказывают явления, связанные с динамическими процессами работы буровых инструментов, а именно скоростью резания-скалывания и раздавливания породы, сопротивлением призабойной среды и разрушаемой горной породы, гидробарические процессы. По этой причине теоретические исследования механизма разрушения породы буровым алмазным инструментом с учетом динамических процессов и сил сопротивления призабойной среды нуждаются в подкреплении его изучения методом компьютерного моделирования.

ГЛАВА 3 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ АЛМАЗНЫМ БУРОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Основой исследования процесса разрушения горной породы алмазным буровым инструментом является система взаимодействия резца с забоем. При этом, согласно результатам аналитических исследований, важно учитывать все явления сопутствующие данному процессу. Исходя из наличия сил, вызванных динамической составляющей, необходимой для реализации бурения, рассматриваемая система становится сложной и, учитывая размеры области взаимодействия резца с забоем, мелкомасштабной, а работа по исследованию затрудняется отсутствием необходимого аппарата натурной реализации изучаемой системы. В связи с этим, а также обращая внимание на достижения применения в области инженерного проектирования и научных работ метода имитационного моделирования, актуальным в данном случае научного исследования является компьютерное моделирование, позволяющее решить поставленные задачи.

3.1 Исследование механизма разрушения горной породы методом компьютерного моделирования

3.1.1 Разработка программы моделирования процесса разрушения горной породы алмазным резцом в системе *LabVIEW*

Учитывая результаты аналитических исследований механизма разрушения горной породы алмазным резцом, следует отметить, что взаимодействие алмазного резца с горной породой – мелкогабаритная система, состоящая из переменных параметров. Износ резца, изменяющий его форму и размер в процессе бурения, свойства разрушаемой породы и промывочной жидкости, а также режимы бурения влияют на характер

взаимодействия резца с породой, который в условиях бурения не может оставаться неизменным. Поэтому для изучения представленной системы «алмазный резец-порода» необходим инструмент, позволяющий отслеживать возможные изменения всех элементов системы и вычислять влияние их взаимодействия на конечный результат. К тому же решение полученных математических уравнений типа (2.30) относительно h аналитически затруднительно, а выражения (2.31) и (2.60) нуждаются в исследовании на адекватность.

С целью проверки достоверности полученных выражений для определения величины глубины резания-скалывания-раздавливания породы алмазным резцом с учетом сил сопротивления среды, динамических и гидродинамических процессов, протекающих на забое скважины, посредством языка программирования *LabVIEW* разработан программный продукт *Burenie_almazom03.avi*, который реализует всесторонний расчет полученной математической модели (2.30).

Среда разработки программ *LabVIEW* – аппарат виртуального исследования, позволяющий устранить возможные допущения [84]. Данная система программирования позволяет осуществлять одновременно несколько видов моделирования: аналитическое, имитационное, натурное, что отвечает целям проводимого исследования.

Исходными данными (вводимыми вручную или автоматически, что предусмотрено возможностями системы *LabVIEW*) для компьютерного программирования являлись:

- 1) r – радиус алмазного резца;
- 2) P – нагрузка на алмаз;
- 3) F_T – тангенциальное усилие;
- 4) $\sigma_{ск}$ – предел прочности породы на скалывание;
- 5) H – выпуск алмаза;
- 6) v_p – скорость резания-скалывания;

- 7) ρ_c – весовая плотность среды с учетом плотности бурового раствора, насыщенного шламом из зоны разрушения и разрушаемой горной породы;
- 8) $P_{ш}$ – твердость породы по штампу;
- 9) φ_n – угол внутреннего трения породы ;
- 10) $\gamma_{ск}$ – угол скола породы;
- 11) C_c – коэффициент сопротивления со стороны резца, определяемый формой плоскости резца;
- 12) f – коэффициент внешнего трения на контакте поверхность резца горная порода;
- 13) γ_n – передний угол установки алмазного резца.

При разработке программы за основу приняты математические модели (2.31) и (2.60), а также геометрические особенности элементов схемы механизма разрушения.

Полученная в результате программа учитывает размеры алмазного резца, переводит все размерности исходных данных в систему СИ и, реализуя алгоритм последовательных вычислений формул (2.5, 2.6, 2.15, 2.17), а также, определяя составляющие уравнения (2.30), находит его корни. Далее, автоматически проводит сравнительный анализ полученных числовых результатов и, выбрав положительный корень решения уравнения, определяет величину глубины резания породы алмазом с учетом сил сопротивления, оказывающих образовавшейся на забое жидкой средой подверженной динамическому воздействию системы взаимодействия бурового инструмента с забоем.

Преимуществом данного программного продукта является возможность отследить решения на каждом шаге вычислений и на любом этапе построить график зависимости исследуемых параметров (рис. 3.1), осуществить проверку вычислений и вывести все результаты на экран. К тому же программа *Burenie_almazom03.avi* способна визуализировать полученные результаты путем вывода их на экран в виде графического построения блок-схем последовательности вычислений (рис. 3.1, а), схемы

механизма разрушения горной породы алмазным резцом, таблиц результатов моделирования, различных графиков, необходимых для быстрого анализа полученных результатов исследования.

Интерфейс программы представленный на рисунке 3.2, позволяет одновременно наблюдать изменения в системе механизма разрушения и оценивать численные результаты каждого параметра.

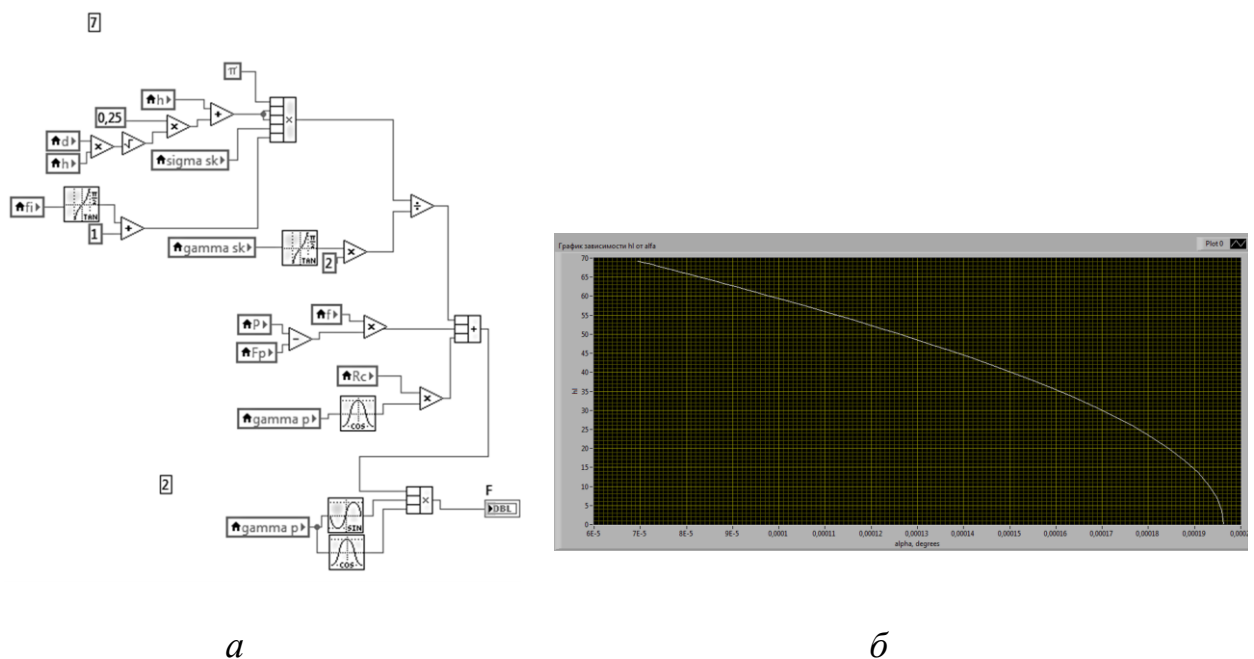


Рисунок 3.1 – Возможности программы *Burenie_almazom 03.avi*: *а* – визуализация этапа расчета; *б* – график зависимости изменения глубины борозды разрушения от угла между вертикальной составляющей и усилием резания α

Для полноценной картины разрушения горной породы алмазным резцом, помимо глубины резания-скалывания-раздавливания породы, необходимо также рассматривать с целью оценки эффективности разрушения размеры и направление распространения зоны предразрушения. С этой целью в программу заложен расчет глубины проникновения ядра сжатия

породы в направлении действия осевой силы, т.е. глубины борозды разрушения по [94]:

$$h_{\text{л}} = 0,25 \cos \alpha (2h + \sqrt{dh}), \quad (3.1)$$

где α – угол между вектором осевого усилия P и результирующей усилия резания R (рис. 2.8, 2.10) программа измеряет автоматически.

А также расчет величины глубины проникновения ядра сжатия породы, которая зависит от направления действия результирующей осевого и тангенциального усилий – силы R , действующей на алмаз. С этой целью были использованы результаты ранее проведенных аналитических расчетов, в результате которых получена формула [94]:

$$MN = 0.25(2h + \sqrt{dh}). \quad (3.2)$$

где h – глубина резания-скалывания-раздавливания породы резцом, рассчитываемая с учетом динамических сил, возникающих на забое скважины по формуле (2.31) или (2.60) в зависимости от вида резца.

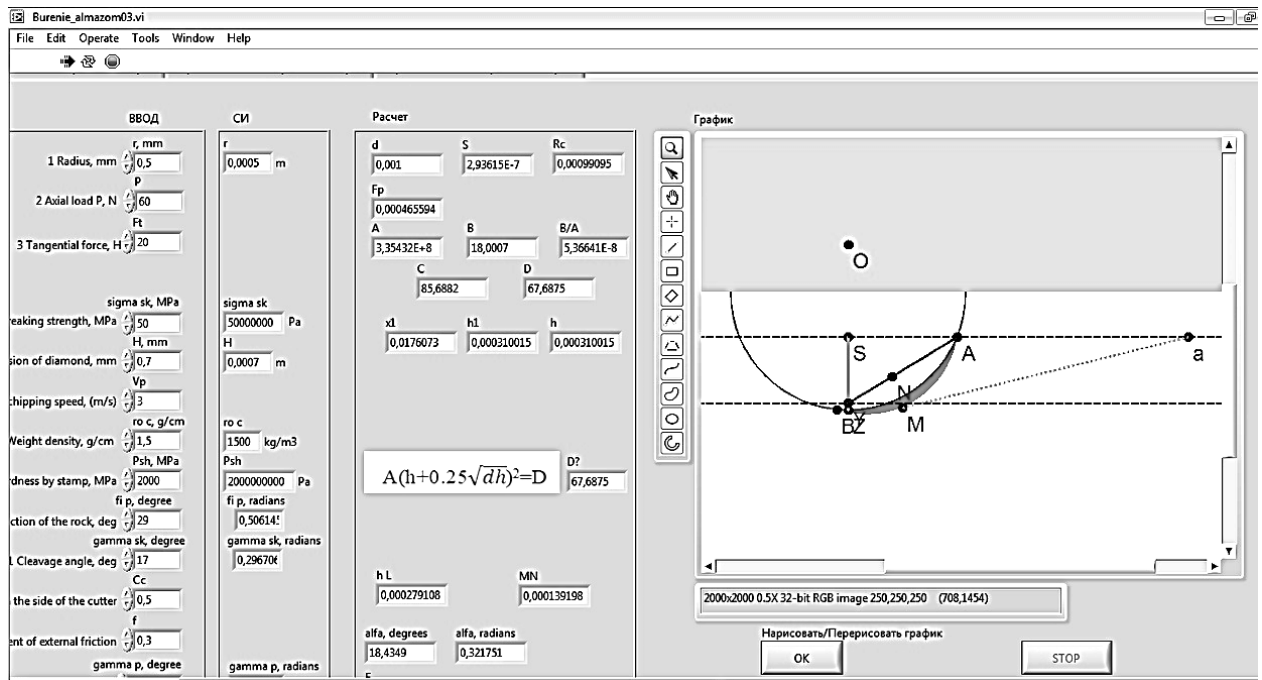


Рисунок 3.2 – Пример интерфейса программы *Bureniealmazom03.avi*, разработанной в системе *LabVIEW*

Математические модели определения глубины борозды разрушения и глубины проникновения ядра сжатия тщательно расписаны в математическом аппарате системы программирования и приняты согласно результатам аналитических исследований, приведенных в работе [94].

Для более точного изображения схемы механизма разрушения породы в программу заложена функция, позволяющая определять координаты точек, отображающих линий контура ядра сжатия породы в зависимости от сложившейся в результате обработки данных системы взаимодействия резца с забоем.

Все линии системы описаны уравнениями математики. При изменении параметров имитационной модели схема механизма разрушения, являющуюся реакцией на изменения, отображается мгновенно в режиме реального времени (рис. 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.8). Геометрия построения системы основывалась на том, что резец является окружностью, тогда, с учетом аналитического описания механизма разрушения горной породы алмазным резцом, согласно графике представленной на рис. 3.3, 3.2. координаты точек имеют следующие значения:

1. координаты точки z ($0; r$);
2. координаты точки O ($0; r-OZ$), где $OZ=H$;
3. прямая $ON=OS/\cos \alpha$;
4. координаты точки N ($x;y$), согласно геометрическим данным схемы можно определить как:

$$X=X_0+\cos\alpha\cdot ON$$

$$Y=Y_0+\sin\alpha\cdot ON;$$

5. координаты точки M определим из координат точки N ($X_N; Y_N$) как:

$$X=X_N+\cos\alpha\cdot(MN+NO)$$

$$Y=Y_N+\sin\alpha\cdot(MN+NO)$$

Значения радиуса резца (r) и выпуска алмаза (H) – параметры, являющиеся исходными значениями, задаваемыми пользователем.

Угол α – угол между вертикалью и вектором результирующей R , направление которой зависит от величины осевого и тангенциального усилий. Данное значение определяется геометрическими построениями и изменяется автоматически, что значительно упрощает процесс изучения механизма разрушения горной породой и является полезной функцией, учитывая результаты аналитических исследований, описанных в главе 3.

Разработанный алгоритм программы позволяет исследовать труднодоступные для производственного или натурального эксперимента процессы. Появляется возможность научного исследования механизма разрушения породы одним алмазным резцом, размер которого может достигать десятые доли миллиметра, а площадь разрушения породы при этом – не превышать 1 мм^2 . При этом имитационное компьютерное моделирование происходит путем изменения размера алмазных резцов при заданном (или предполагаемом) выпуске алмаза, различных показателей осевого (*Axial load*, P , п. 2 на рис. 3.2) и тангенциального усилий, свойств разрушаемой породы с учетом сопротивления среды, образовавшейся на забое скважины.

Результаты поэтапного расчета в компьютерной системе *Burenie_almazom03.avi* показали, что из двух корней (2.28) и (2.29) x_2 всегда отрицательный, в связи с этим из выражения (2.30) можно выделить один корень уравнения равный:

$$h = \left(\frac{-0.25\sqrt{a} + \sqrt{(0.25\sqrt{a})^2 + 4\sqrt{\frac{D}{A}}}}{2} \right)^2 \quad (3.3)$$

Подставив в (3.3) выражения (2.20 – 2.23), а также математическую зависимость, определяющую значение усилия F_n , формулу площади скола породы S соответственно форме алмазного резца и выражение,

определяющее реакцию сопротивления среды R_c , преобразуя можно получить выражение для определения глубины резания-скалывания-раздавливания горной породы алмазным кристаллом:

$$h = \left(\frac{-0,25\sqrt{d} + \sqrt{(0,25\sqrt{d})^2 + 4 \sqrt{\frac{2tg\gamma_{ck}(P(1-tg\gamma_{\Pi}f) - R_c \sin\gamma_{\Pi}(\cos\gamma_{\Pi} - f \sin\gamma_{\Pi} + 1))}{\pi\sigma_{ck}tg\gamma_{\Pi}(1+tg\varphi_{\Pi})}}}}{2} \right)^2. \quad (3.4)$$

Дальнейшие расчеты программа проводит согласно алгоритму поочередного вычисления параметров математического выражения (3.4).

Аналогично проведена проверка компьютерным моделированием аналитического расчета выражения 2.60 с учетом формы и размера резца *PDC*.

3.1.2 Проверка достоверности и сходимости результатов теоретических исследований, компьютерного моделирования и экспериментальных данных

Для проверки достоверности, адекватности и определение точности разработанной программы, а также полученного математического выражения (3.4) проведено компьютерное моделирование ранее проведенного натурного эксперимента [74]. Исходные данные для моделирования были взяты из экспериментальных данных опытного определения усилий при работе единичных алмазных резцов, результаты которого представлены в таблице 3.1 [74; 94].

Для каждого из представленных в эксперименте вида пород проведено компьютерное моделирование его разрушения одним резцом в различных условиях. При моделировании постоянными параметрами выступали предел прочности породы на скалывание и твердость по штампу.

Таблица 3.1 – Результаты опытного определения усилий при работе алмазных резцов по [74; 94]

Порода	Алмаз необработанный				
	Нагрузка на алмаз P , даН	Сила трения $F_{тр}$, даН	Тангенциальное усилие F_T , даН	$\frac{P}{F_T}$	$\frac{F_{тр}}{F_T}$
<i>Средней твердости</i>					
Мрамор	8,2	3,7	7,05	1,16	0,53
Известняк	6,13	2,76	3,78	1,62	0,73
Сланец	3,99	1,8	2,98	1,34	0,61
<i>Твердые и очень твердые</i>					
Альбитофир	5,27	2,36	3,7	1,42	0,64
Роговик	5,34	2,5	2,62	2,04	0,95
Роговик магнетитовый	4,8	2,16	2,52	1,89	0,86
Гранит	3,96	1,78	2,21	1,8	0,81
	Алмаз овализованный				
<i>Средней твердости</i>					
Мрамор	2,71	1,21	2,45	1,1	0,49
Известняк	6,24	2,8	3,84	1,62	0,73
Сланец	6,1	2,74	4,0	1,52	0,69
<i>Твердые и очень твердые</i>					
Альбитофир	7,78	3,5	6,56	1,18	0,53
Роговик	6,18	2,78	4,35	1,42	0,64
Роговик магнетитовый	5,13	2,3	2,72	1,89	0,85
Гранит	6,52	2,94	3,84	1,9	0,86
	Алмаз полированный (расчетные данные при коэффициенте трения 0,056)				
<i>Средней твердости</i>					
Мрамор	2,71	0,15	1,39	1,95	0,11
Известняк	6,24	0,35	1,39	4,5	0,25
Сланец	6,1	0,34	1,6	3,8	0,21
<i>Твердые и очень твердые</i>					
Альбитофир	7,78	0,43	3,49	2,23	0,12
Роговик	6,18	0,35	1,92	3,2	0,18
Роговик магнетитовый	5,13	0,29	0,71	7,1	0,41
Гранит	6,52	0,37	0,8	8,15	0,46

Проводилось несколько серий имитационных исследований при различных значениях радиуса, выпуска алмазного резца, скорости резания-скалывания, весовой плотности среды. Переменными показателями всегда выступали значения осевого и тангенциального усилия на резец в различных соотношениях. После каждого акта моделирования фиксировались изменения в схеме механизма разрушения горных пород, отраженной в графической части интерфейса программы.

К примеру, при бурении в известняке ($\sigma_{\text{ск}} = 19$ МПа) инструментом, армированным алмазом диаметром 0,9 мм, при осевой нагрузке $P = 5$ даН и скорости резания $v_p = 3$ м/с, перебирая значения тангенциального усилия F посредством программы *Burenie_almazom03.avi* наблюдается изменение направления смещения ядра сжатия породы (рис. 3.3).

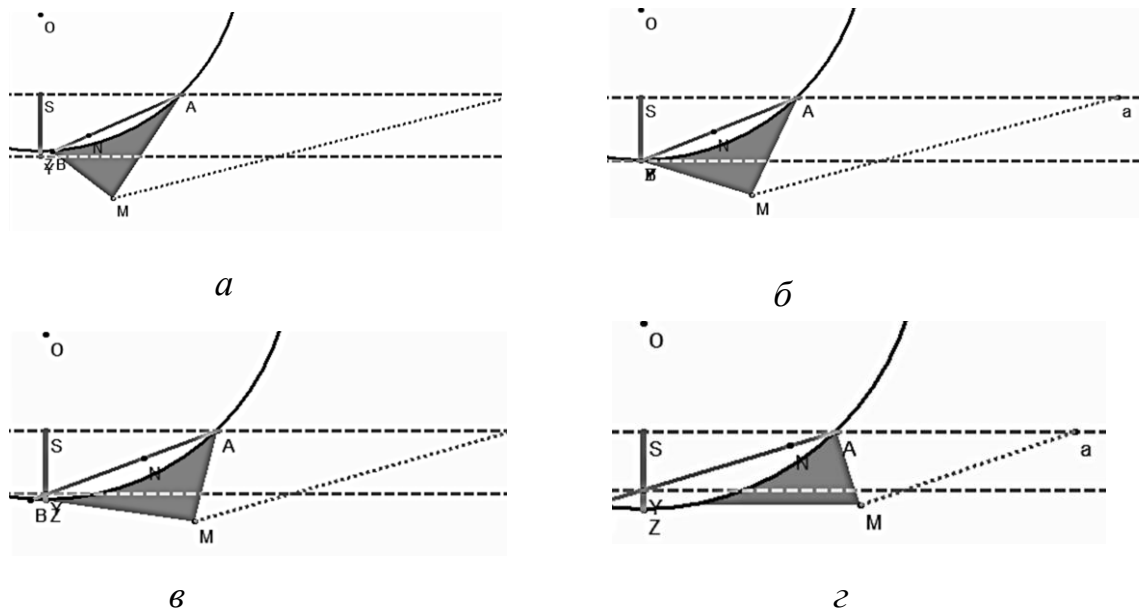


Рисунок 3.3 – Результаты компьютерного моделирования (в программе *Burenie_almazom03.avi*) механизма разрушения известняка алмазом 0,9 мм при осевом усилии 5 даН: *а* – $F = 2$ даН; *б* – $F = 3$ даН; *в* – $F = 4$ даН; *г* – $F = 6$ даН

Изменение показателя F программа *Burenie_almazom03.avi* позволяет осуществлять поочередным вводом значений вручную или автоматически, задав интервал граничных условий и шаг перебора данных, что расширяет интервал исследуемых значений усилия, оказываемого на алмазный резец.

Результаты моделирования показывают, что при значениях F от 1 до 3 даН ядро сжатия породы находится под алмазом (рис. 3.3, *а, б*). При значениях F больше 3 даН ядро начинает перемещаться к передней грани алмаза (рис. 3.3, *а, б*).

Известняк – осадочная горная порода средней твердости. Для достижения должного эффекта бурения рекомендуется разрушать такую породу резанием [15; 33; 66; 74; 94; 125; 160]. Следовательно, при осевой нагрузке на один алмаз в 5 даН оптимальным будет значение тангенциального усилия F от 4 до 7 даН. В этом случае ядро сжатия располагается в области передней грани резца, что приводит к скалыванию и резанию, а учитывая твердость известняка – такое расположение сил способствует более эффективному бурению.

Породы средней твердости рекомендуется разрушать крупными алмазами зернистостью от 20 до 2 шт/кар [11; 94]. В этом случае размер резца может составить более 1 мм. Моделирование внедрения алмаза в известняк при тех же условиях, но алмазом большего диаметра – 1,5 мм показало, что область и характер распространения ядра сжатия в породе несколько меняется (рис. 3.4). Увеличение размера алмазного резца при неизменных значениях нагрузок привело к снижению величины глубины внедрения алмаза в породу h (некоторые результаты приведены в таблице 3.2).

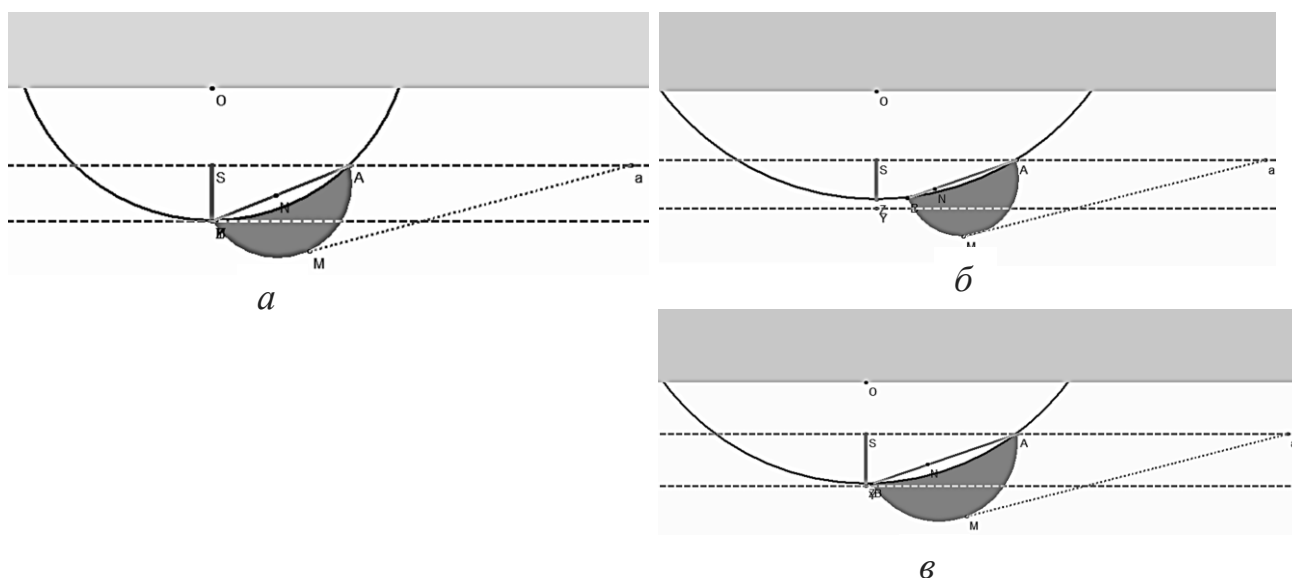


Рисунок 3.4 – Графическое изображение механизма разрушения известняка в программе *Burenie_almazom03.avi*: *а* – диаметр алмаза $d=0,9\text{ мм}$, $P=5$ даН, $F=6$ даН; *б* – диаметр алмаза $d=1,5\text{ мм}$, $P=5$ даН, $F=6$ даН; *в* – диаметр алмаза $d=1,5\text{ мм}$, $P=8$ даН, $F=6$ даН.

Схема на рисунке 3.4, *б* указывает на недостаток осевой нагрузки и необходимость ее повышения. При повышении осевого усилия до 8 даН программа демонстрирует как область распространения ядра сжатия породы заметно увеличивается (рис. 3.4, *в*). Такие результаты моделирования позволяет сделать вывод о том, что такое расположение сил способствует более эффективному бурению. При этом, как показывают результаты расчета параметров, возрастает величина глубины внедрения резца в породу и глубины лунки разрушения h_d .

Таблица 3.2 – Некоторые результаты компьютерного моделирования резания горной породы алмазным резцом в *Burenie_almazom03.avi*

Диаметр алмаза d , мм	Выпуск алмаза H , мм	P , даН	F , даН	P/F	h , мм	Глубина лунки h_l , мм
известняк						
0,9	0,3	5	2	2,5	0,000126127	0,0001367590
		5	4	1,25	0,000126127	0,0001150170
		5	6	0,83	0,000126127	0,0000942951
1,5		5	3,53	1,41	0,000109182	0,0001272470
		5	3,6	1,38	0,000109182	0,0001264070
		5	6	0,83	0,000109182	0,0000997173
		8	6	0,33	0,000148209	0,0001535840
		8	5,68	1,41	0,000148209	0,0001565370
диорит						
1,5	0,3	8	5,68	1,41	0,000127444	0,0001410850
		8	6		0,000127444	0,0001384230
		8	9		0,000127444	0,0001149540
		8	4,47	1,79	0,000127444	0,0001511049
		5	2,8	1,79	0,000093526	0,0001225010
0,9		5	8	0,62	0,000108900	0,0000703390

Согласно результатам аналитического исследования [94], основанного на экспериментальных данных [74] соотношение P/F в зависимости от качества обработки алмаза должно составлять 1,37-1,41 при бурении пород средней твердости и 1,6-1,79 – твердых пород.

С целью изучения влияния отношения осевого усилия к тангенциальному на эффективность разрушения горной породы алмазным

резцом, проведем анализ полученных результатов моделирования. И сравним полученные данные с результатами эксперимента [74].

Компьютерное моделирование показывает, что при $P=5$ даН, $F=3,53$ даН (что соответствует отношению $P/F=1,41$) по сравнению с $P=5$ даН, $F=6$ даН ($P/F=0,83$) глубина внедрения резца не изменилась, а глубина лунки разрушения возросла на 20 %. При этом нагрузка на резец снизилась на 40%.

Если $P=8$ даН, $F=5,68$ даН ($P/F=1,41$) по сравнению с $P=8$ даН, $F=6$ даН ($P/F=0,33$) глубина внедрения резца не изменилась, а глубина лунки разрушения возросла на 2 %. При этом нагрузка на резец снизилась на 5%.

При $P=8$ даН, $F=5,68$ даН ($P/F=1,41$) глубина внедрения резца в породу увеличилась на 26 % по сравнению с показателем при $P=5$ даН, $F=3,53$ даН ($P/F=1,41$), а глубина лунки возросла на 19 %. При этом осевая нагрузка на алмаз возросла на 30%.

Таким образом, результаты компьютерного моделирования указывают на то, что разрушение известняка при заданных условиях эффективнее алмазным резцом диаметром 1,5 мм при воздействии на алмазный резец осевого усилия $P=8$ даН и тангенциального усилия $F=5,68$ даН.

Проверим, как при тех же условиях (тот же инструмент и режимы бурения) будет проходить разрушения диорита в имитационной системе.

Принятые исходные данные для моделирования: предел прочности на скалывание ($\sigma_{ск} = 24$ МПа); твердость породы по штампу ($P_{шт} = 4000$ МПа); диаметр алмаза 1,5 мм; передний угол резца $\gamma_n=35$ град; осевая нагрузка $P = 8$ даН; скорость перемещения резца $v_p = 3$ м/с.

Результаты компьютерного имитационного моделирования, позволяют сделать вывод о том, что в принятых условиях величина глубины внедрения алмазного резца как и глубина лунки разрушения значительно снизились на 14 % и 10 % соответственно.

Как известно тангенциальное усилие F зависит от таких параметров как коэффициент трения, контролировать который в процессе бурения сложно, а в некоторых случаях практически невозможно. Поэтому регулировать характер разрушения проще, изменяя осевую нагрузку в допустимых пределах, что наглядно отражается и в графическом редакторе, результаты работы которого представлены в виде изображения интерфейсе программы.

Анализ результатов моделирования показал, что изменение величины отношения осевого усилия к тангенциальному P/F ведет к изменению угла, образованного между вектором осевого усилия и результирующего усилия резания-скалывания $R - \alpha$ (см. рис. 2.8, 2.10, формула 2.77, 2.78), который согласно аналитическим исследованиям является определяющим в распределении зон напряжений в горной породе под алмазным резцом. Сравнительный анализ изображения механизма разрушения породы в различных условиях не дает точного результата и обременен субъективизмом. В связи с этим, с целью получения точных результатов исследования степени влияния величины угла α на показатели исследуемой системы разрушения породы резцом и облегчения выбора оптимальных значений усилий, необходимых для реализации эффективного разрушения породы в программе *Burenie_almazom03.avi* разработана функция построения графиков, отражающих зависимость изменения величины глубины лунки разрушения от угла α (рис. 3.6).

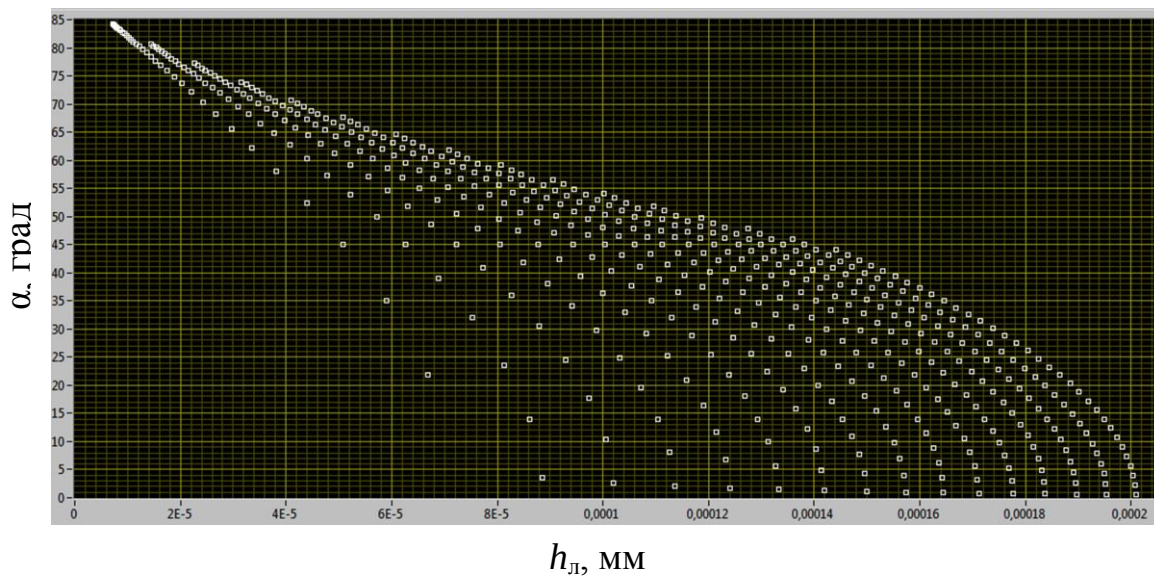


Рисунок 3.6 – График зависимости глубины лунки разрушения от угла α (*Burenie_almazom03.avi*)

Программа позволяет быстро определить оптимальные условия разрушения породы данным резцом. Например, согласно графику на рис. 3.6. наибольшее значение глубины лунки разрушения известняка достигается при значении угла в пределах $5^\circ < \alpha < 25^\circ$. В дальнейшем, учитывая твердость разбуриваемой породы, можно выбрать значения осевого и тангенциального усилий соответствующие эффективному для реализации разрушения соотношению P/F .

К примеру, учитывая, что известняк – порода средней твердости, разрушать ее следует резанием, ориентируясь на числовые данные на рисунке 3.7 и схему на рисунке 3.8. можно определить оптимальное сочетание осевого и тангенциального усилий, соответствующее наибольшему показателю глубины лунки разрушения.

	P	F	h	hl	α
1	7,6	7,76	0,000155405	0,00011467	47,9476
1,6	7,6	7,76	0,000163461	0,000124281	45,5968
2,2	7,6	7,76	0,000163461	0,000124281	45,5968
2,8	7,6	7,76	0,000163461	0,000124281	45,5968
3,4	7,6	7,76	0,000163461	0,000124281	45,5968
4	7,6	7,76	0,000163461	0,000124281	45,5968
4,6	7,6	7,76	0,000163461	0,000124281	45,5968
5,2	7,6	7,76	0,000163461	0,000124281	45,5968
5,8	7,6	7,76	0,000163461	0,000124281	45,5968
6,4	7,6	7,76	0,000163461	0,000124281	45,5968
7	7,6	7,76	0,000163461	0,000124281	45,5968
7,6	7,6	7,76	0,000163461	0,000124281	45,5968
1	7,89	7,89	0,000163461	0,000124281	45,5968
1,6	7,89	7,89	0,000163461	0,000124281	45,5968
2,2	7,89	7,89	0,000163461	0,000124281	45,5968
2,8	7,89	7,89	0,000163461	0,000124281	45,5968
3,4	7,89	7,89	0,000163461	0,000124281	45,5968
4	7,89	7,89	0,000163461	0,000124281	45,5968
4,6	7,89	7,89	0,000163461	0,000124281	45,5968
5,2	7,89	7,89	0,000163461	0,000124281	45,5968
5,8	7,89	7,89	0,000163461	0,000124281	45,5968
6,4	7,89	7,89	0,000163461	0,000124281	45,5968
7	7,89	7,89	0,000163461	0,000124281	45,5968
7,6	7,89	7,89	0,000163461	0,000124281	45,5968

Рисунок 3.7 – Результаты компьютерного моделирования разрушения известняка алмазным резцом

Так, для инструмента, армированного алмазом 1,5 мм оптимальные величины P и F должны соответствовать условиям образования угла α в пределах от 40° до 50° . Сложность характера выбора определяется стремлением к наибольшей величине глубины внедрения резца, с целью повышения параметра углубления инструмента за оборот. Как видно по результатам моделирования для описанных условий (рис. 3.7), наиболее эффективным является режим разрушения при $\alpha=45,59^\circ$ ($P=7,6$ даН и $F=7,76$ даН) чем при $\alpha=47,947^\circ$ ($P=7$ даН и $F=7,76$ даН).

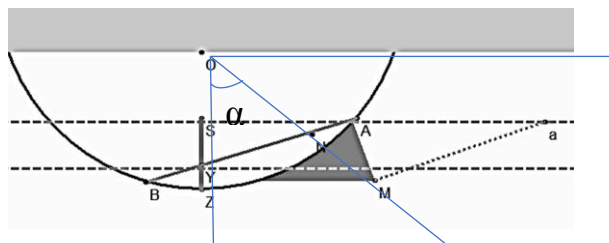


Рисунок 3.8 – Схема механизма разрушения известняка алмазом, полученная в результате имитационного моделирования в программе *Burenie_almazom03.avi*

Описанные результаты моделирования доказывают взаимную связь величины силового воздействия на резец (значение P и F), угла α , глубины лунки разрушения и внедрения резца в породу. При этом, согласно результатам моделирования, чем больше угол α тем глубина разрушения породы меньше.

Такое поведение параметра величины угла α указывает на то, что угол α является своеобразным показателем сопротивления породы, что подтверждается формулой (2.78), т.е. чем больше угол α тем больше сопротивление породы, способствующее выталкиванию резца на поверхность. Случай, когда $\alpha = 0$ указывает на отсутствие тангенциального усилия, а следовательно и вращения.

Для исследования связи угла α и коэффициента сопротивления, аналитически доказанной в главе 2, при компьютерном моделировании используется автоматический перебор в заданных значениях величин тангенциального и осевого усилия. При этом реализуется возможность наблюдения перемещения ядра сжатия и изменения глубины внедрения резца в породу в видео формате. В зависимости от выбранного шага, программа перебирает большое количество комбинаций P/F и в виде трехмерного графика выводит зависимость величины углубления резца в породу, значения глубины лунки разрушения и угла α (рис. 3.9).

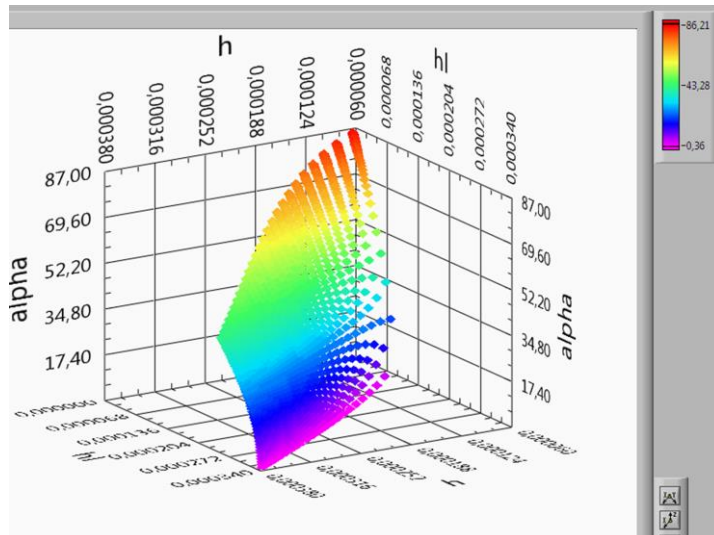


Рисунок 3.9 – Результаты компьютерного моделирования в системе *LabVIEW* (программный продукт *Burenie_almazom03.avi*): трехмерный график зависимости глубины борозды разрушения (hl), глубины резания-скалывания (h) и угла отклонения от вертикали результирующей R (α)

Имея возможность, благодаря компьютерному программированию, быстро и точно отслеживать изменение угла α в зависимости от значений осевого и тангенциального усилий, основываясь на выражении (2.78), можно подобрать режим, соответствующий наименьшему сопротивлению среды внедрению резца в породу.

Графическая интерпретация результатов, полученных путем моделирования работы резца на забое в системе *LabVIEW* и представленная на рисунке 3.10, показывает, что чрезмерное увеличение усилий ведет к увеличению степени сопротивления внедрению резца, а, следовательно, повышение затрачиваемой мощности не оправдано. Повышенное сопротивление породы влечет снижение глубины внедрения резца в породу и как, следствие, ведет к уменьшению значения углубления инструмента за оборот. Таким образом методом компьютерного моделирование подтверждено аналитическое заключение о том, что для реализации резания породы достаточно в разумных пределах уравнивать значениями осевого и тангенциального усилий.

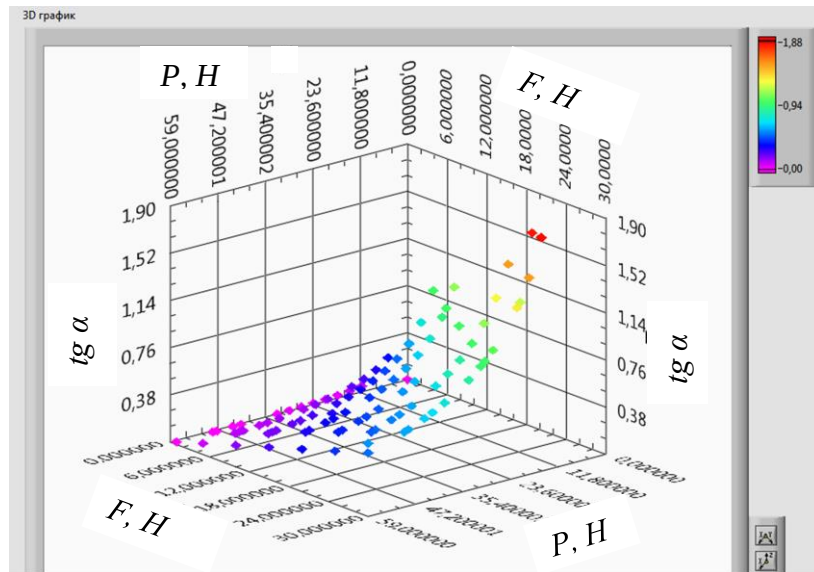


Рисунок 3.10 – Результаты компьютерного моделирования, определяющие степень изменения коэффициента сопротивления резанию-скалыванию-раздавливанию резцом горной породы ($tg\alpha$) при различных значениях осевого (P) и тангенциального (F) усилий.

Полученные результаты моделирования подтверждают результаты экспериментальных исследований динамических нагрузок на алмазы [74], указывающих на то, что помимо формы, размеров алмазов на их работоспособность оказывает влияние соотношение прикладываемых к ним осевого и тангенциального усилий.

Благодаря проведенным виртуальным исследованиям установлено, что в случае необходимости снижения режима нагрузки алмаза, есть возможность, подобрав оптимальное отношение значений осевого и тангенциального усилий, достигать достаточной величины разрушения породы.

Результаты компьютерного моделирования показывают, что среда, образовавшаяся из смеси промывочного агента и шлама на забое оказывает влияние на величину глубины резания-скалывания алмазным резцом. На изменение реакции сопротивления (R_c) данной среды влияют плотность и скорость резания, на плотность – тип промывочного агента и разрушаемой

породы, рассматриваемые как исследуемые. При этом скорость резания-скалывания определялась в зависимости от возможных для современного бурового оборудования значений частоты вращения и местоположения алмазного резца на торце бурового инструмента.

В данном случае главным преимуществом *LabVIEW* при изучении процессов разрушения горных пород выступает возможность построения графиков зависимостей нескольких параметров исследуемой модели, значения которых изменяются путем варьирования других переменных.

LabVIEW имеет возможность представления изменения результатов моделирования в виде анимации, видео, а также позволяет вращать полученные трехмерные графики, рассматривая исследуемые результаты с различных ракурсов, осуществлять перебор значений в большом интервале с различным шагом, изображать графически схему разрушения породы в пределах мелкого резца [151]. Все это делает *LabVIEW* актуальным и необходимым инструментом при сопровождении научного исследования механизма разрушения горных пород алмазным резцом. А сходимость результатов экспериментальных данных [74], всестороннего аналитического описания и расчетов элементов механизма разрушения горных пород [33; 90; 94] и результатов представленного компьютерного моделирования указывает на адекватность и пригодность программного продукта и математических моделей (2.31) и (2.60) для научного изучения системы взаимодействия алмазного резца с горной породой.

3.1.3 Исследование влияния гидродинамических процессов на глубину разрушения горной породы алмазным резцом

3.1.3.1 Исследование работы резца в виде алмазного кристалла

С целью определения степени влияния сопротивления призабойной среды на эффективность разрушения горной породы алмазным кристаллом на основании формулы (2.31), с учетом возможных условий, динамических процессов и явлений, сопутствующих бурению, проведен аналитический расчет и имитационное моделирование (в программе *Burenie_almazom03.avi*), в результате которых осуществлен анализ изменения величины глубины резания-скалывания.

Учитывая область применения бурового инструмента, армированного алмазным синтетическим кристаллом, а это как правило породы средней твердости, твердые и очень твердые, возможная плотность разрушаемых пород составит от 2,5 г/см³ (известняк) до 3,2 г/см³ (пироксенит). При этом, следует отметить, что наиболее часто применяемая с подобным буровым инструментом промывочная жидкость обладает плотностью не превышающую 1,5 г/см³.

Таким образом, исследование было проведено с граничными условиями, учитывающими, что весовая плотность среды, состоящей из промывочной жидкости, шлама, разрушенной и полуразрушенной породы ρ_c может находиться в пределах от 13 до 20 кН/м³.

Компьютерное моделирование имитирующее взаимодействие резца с горной породой в процессе бурения скважины проведено с учетом существующих размеров алмазного кристалла. В качестве переменных для изучения работы каждого типоразмера алмаза выступили параметры, характеризующие свойства горной породы, весовая плотность среды, скорость перемещения алмаза, его выпуск. Так как задача стоит в определении степени влияния среды в неизменных условиях бурения,

значения осевого и тангенциального усилий выбирались как наиболее оптимальные, согласно рекомендациям [94] и полученным на первом этапе исследования результатам моделирования (некоторые из которых приведены в п. 3.1.2) и сохранялись неизменными.

Результаты моделирования показали, что чем крупнее монокристалл, тем степень влияния среды выше (рис. 3.11).

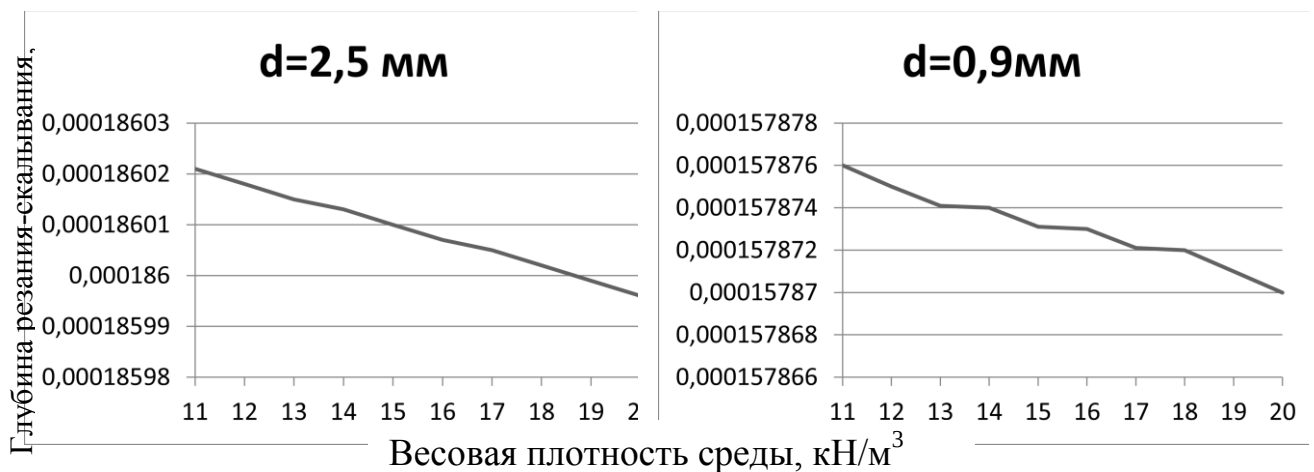


Рисунок 3.11 – Зависимость глубины резания–скалывания породы алмазным монокристаллом диаметром d от весовой плотности среды

Для наиболее крупного алмаза диаметром 2,5 мм [154] при прочих равных условиях повышение удельной плотности среды на 40% ведет к уменьшению значения глубины резания-скалывания породы на 0,008%, при тех же условиях для алмаза диаметром 0,9 мм, глубина резания уменьшается на 0,0025%.

При этом выделяется особое влияние показателя выпуска алмаза и линейной скорости перемещения резца. При прочих равных условиях увеличение выпуска алмаза на 14% ведет к повышению степени влияния среды на 40%. При исследовании работы алмазного кристалла с выпуском составляющим 16% от величины его диаметра рост весовой плотности среды на 40% ведет к снижению значения глубины резания-скалывания породы на 0,0048%, а в случае выпуска на 30% – на 0,008% (рис. 3.12).

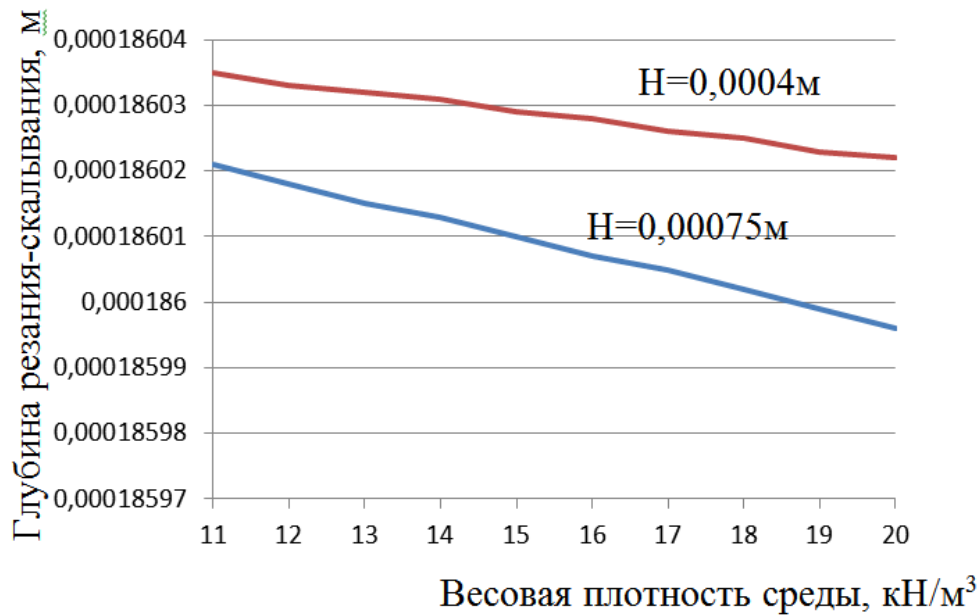


Рисунок 3.12 – График зависимости глубины резания–скалывания породы алмазным монокристаллом диаметром 2,5мм от весовой плотности среды, при выпуске алмаза H

При увеличении скорости перемещения резца степень влияния среды на показатель бурения растет. В случае увеличения скорости в два раза, при весовой плотности среды 20 кН/м^3 глубина резания-скалывания горной породы алмазным монокристаллом может снизиться на 0,02%, что при общем количестве алмазов 125 шт составит 2,5% снижения показателя углубления за оборот (рис. 3.13).

Таким образом, можно сделать вывод, что при разрушении горной породы алмазным кристаллом при прочих равных условиях в случае роста значения весовой плотности жидкой призабойной среды на 40 % глубина резания породы алмазным монокристаллом может уменьшиться на 0,003-0,008 % в зависимости от размера, выпуска и линейной скорости перемещения резца по забою, что при общем количестве резцов 125 шт снизит значение углубления за оборот до 1%.

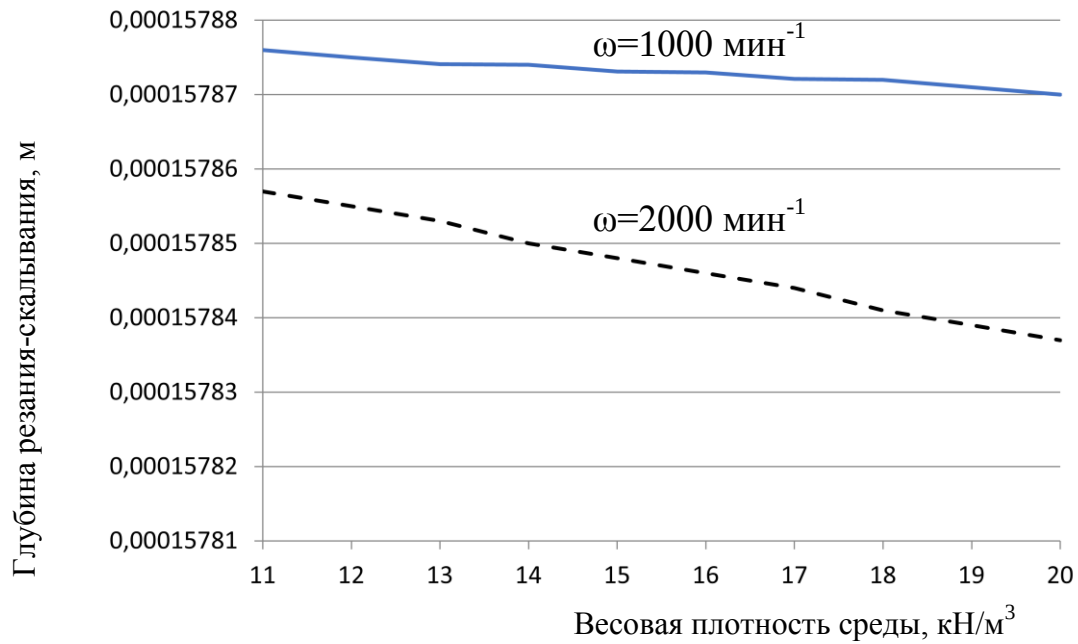


Рисунок 3.13 – График зависимости глубины резания-скалывания породы алмазом диаметром 0,9 мм от весовой плотности среды, при различной частоте вращения ω

При этом следует отметить, что по мере уменьшения размера алмазного кристалла степень влияния среды снижается. Поэтому в случае бурения мелким алмазом весовая плотность среды не оказывает влияние на результативность бурения, наиболее актуальным здесь выступает вопрос температурного режима работы инструмента также нуждающегося в улучшенной очистке от шлама, провоцирующего повышение коэффициента трения при высокочастотном бурении.

3.1.3.2 Исследование работы резца типа *PDC*

В практике породоразрушающий инструмент типа *PDC* применяется при бурении в горных породах различной твердости: мягких, средней твердости, а также в разрезах, где происходит переслаивание средних по твердости с пропластками твердых пород. Плотность таких пород колеблется в пределах от $1,9 \text{ г/см}^3$ (глина) до $2,8 \text{ г/см}^3$ (песчаник). Удельная плотность разрушаемой горной породы может составить $20\text{--}25 \text{ кН/м}^3$. Бурение таким инструментом возможно в условиях с промывкой растворами как на водной основе, плотность которых составляет от $0,9$ до $1,2 \text{ г/см}^3$, малоглинистыми растворами с плотностью $\rho=1,05\text{--}1,06 \text{ г/см}^3$, так и на нефтяной основе ($\rho=0,89\text{--}1 \text{ г/см}^3$), следовательно весовая плотность бурового раствора, насыщенного шламом может быть в пределах от 11 до 14 кН/м^3 .

Если рассмотреть область строго под резцом *PDC* при разрушении им горной породы, то можно выделить находящиеся под ним: неразрушенный участок породы; часть уплотненной и разрушенной горной породы, промывочную жидкость насыщенную шламом и зону непрерывно прибывающей промывочной жидкости, что в совокупности представляет собой жидкую среду, образовавшейся на забое в следствие бурения. Таким образом, весовая плотность рассматриваемой среды ρ_c может находиться в широких пределах и составлять от 11 до 18 кН/м^3 .

С целью определения степени влияния сопротивления представленной среды на эффективность разрушения горной породы резцом *PDC* с учетом возможных условий ее образования, на основании формулы (2.60) проведен расчет глубины резания-скалывания породы резцом при различных значениях плотности среды и аналитический анализ полученных результатов.

Результаты расчетов показали, что при прочих равных условиях в случае роста значения весовой плотности жидкой среды на 40% глубина резания породы резцом *PDC* может уменьшиться на $0,2\text{--}0,4\%$ в зависимости

от размера резца (рис. 3.14, 3.15), что при общем количестве *PDC* в 20 шт снизит значение углубления за оборот на 8%.

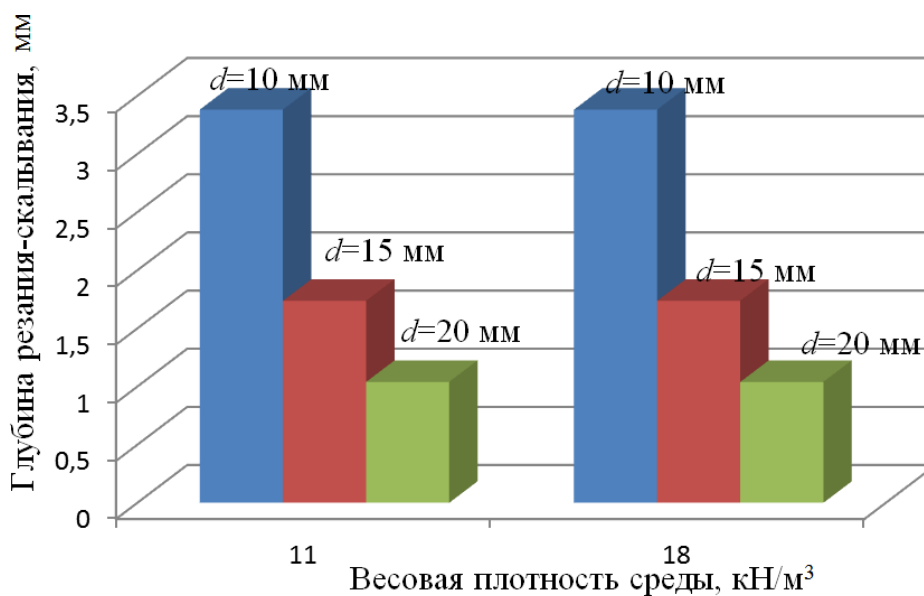


Рисунок 3.14 – Диаграмма изменения глубины резания резцами *PDC* различного диаметра от весовой плотности среды

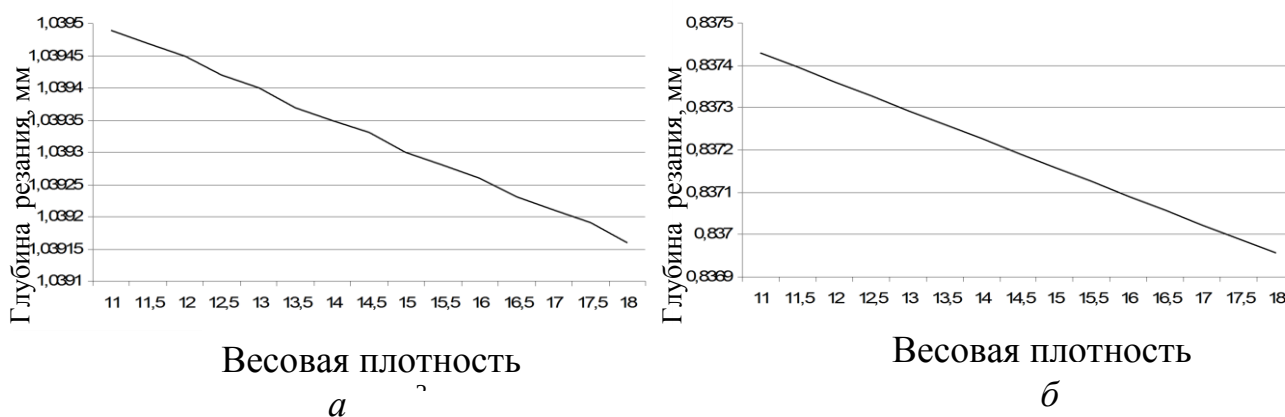


Рисунок 3.15 – Зависимость глубины резания-скалывания породы резцом *PDC* от весовой плотности среды: *а* – диаметр резца 15 мм; *б* – диаметр резца 20 мм ($\gamma_p = -20$; $v_p = 4$ м/с).

При этом особое влияние оказывает показатель линейной скорости перемещения резца. Результаты расчетов, учитывающих одинаковые условия

бурения, показали, что при скорости $v_p = 2$ м/с повышение весовой плотности на 40% приведет к снижению глубины резания резцом на 0,11%, а при $v_p = 4$ м/с – на 0,3% (рис. 3.16).

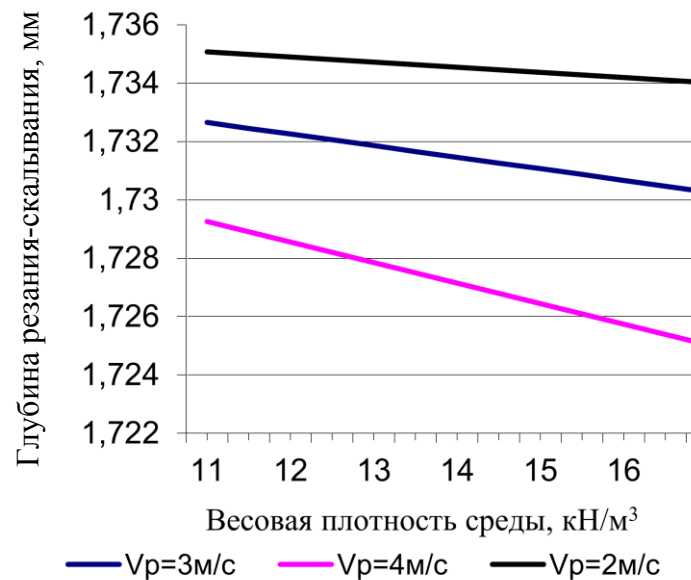


Рисунок 3.16 – Зависимость глубины резания-скалывания породы от весовой плотности жидкой среды ($d=15$ мм; $\gamma_p=-15$)

Полученный результат подтверждает положение ранее проведенных научных исследований бурения буровым инструментом, армированным резцами *PDC* [15-17], которое, дополнив результатами данной работы, можно заключить следующим образом: «по мере роста линейной скорости перемещения резца растет сопротивление среды, образовавшейся на забое скважины».

При этом аналитические расчеты по формуле (2.60) и компьютерное моделирование показывают, что чем больше значение переднего угла установки резца *PDC*, тем больше влияния оказывает среда на глубину его резания (рис. 3.17). Причем при изменении угла на 5° - 10° степень влияния может отличаться более чем в 1,5 раза.

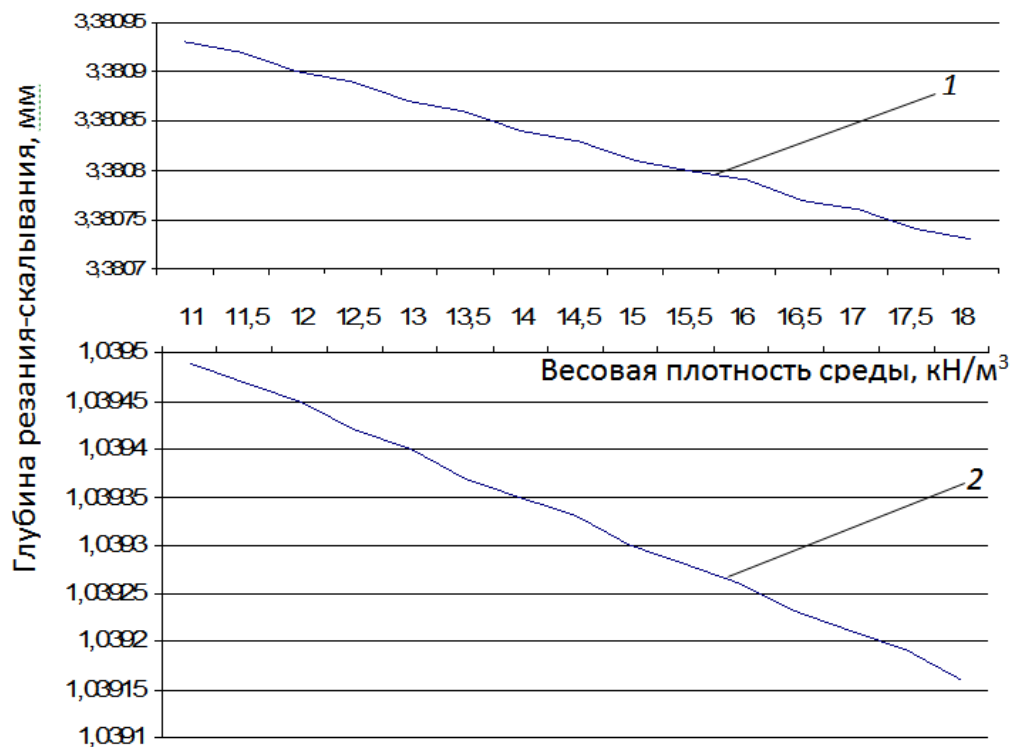


Рисунок 3.17 – Зависимость глубины резания-скалывания породы от весовой плотности жидкой среды: 1– передний угол установки резца -10° ; 2 – передний угол установки резца -20°

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при прочих равных условиях в случае роста значения весовой плотности жидкой призабойной среды на 40 % глубина резания породы резцом *PDC* может уменьшиться на 0,11...0,4 % в зависимости от размера, скорости и переднего угла установки резца (рис. 3.15-3.17), что при общем количестве резцов в 20 шт снизит значение углубления за оборот до 8%.

При этом решающим является параметр величины диаметра резца *PDC*, а в совокупности с повышенной скоростью резания и большим значением отрицательного переднего угла установки степень значения сопротивления, оказываемого призабойной средой, внедрению резца *PDC* в горную породу растет.

3.2. Исследование гидродинамических и гидробарических процессов, протекающих при бурении скважин алмазным инструментом

В процессе бурения в скважине формируется система гидродинамического состояния, характеризующаяся давлением, направлением и скоростью течения жидкости. С целью исследования гидродинамических процессов, возникающих в процессе бурения, в компьютерной системе *ANSYS* проведено моделирование бурения скважины алмазной коронкой. Основными исходными данными для составляемой модели являлись конструктивные параметры серийной геологоразведочной алмазной коронки, характеристика материалов матрицы и корпуса, горной породы, алмазов.

Составляемая имитационная модель (рис. 3.18) состоит из нескольких областей решения поставленной задачи – доменов. В каждой модели выделены домен очистного агента, породы, сектора, корпуса и алмазов.

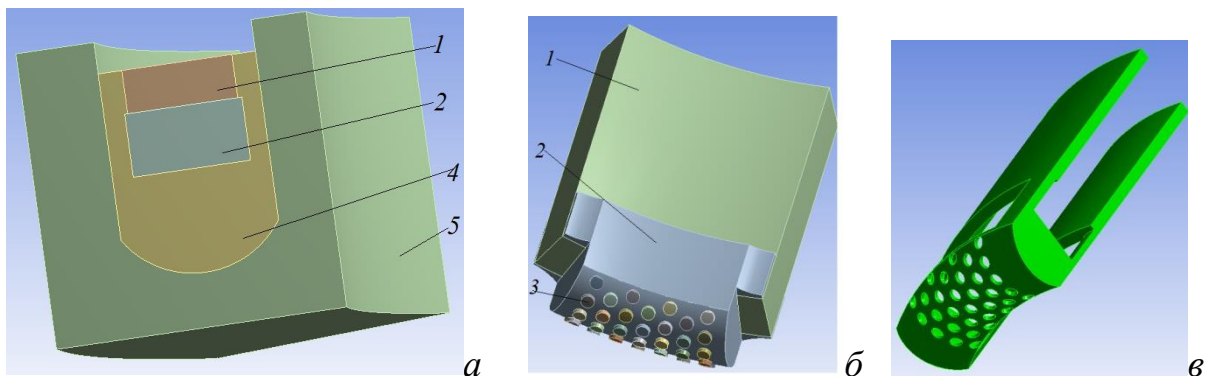


Рисунок 3.18 – Пример модели взаимодействия алмазной однослойной коронки с породой на забое скважины: *а* – модель в сборе; *б* – домен корпуса, сектора и алмазов; *в* – домен воды. 1 – корпус; 2 – сектор; 3 – алмаз; 4 – очистной агент; 5 – порода

В домене очистного агента в начальных условиях задается относительное давление равное 0 и исходное направление жидкости. Подача задается в плоскости А-А домена очистного агента (рис. 3.19, *а*) с

определенным массовым расходом. А плоскость В-В является открытой для свободного течения жидкости.

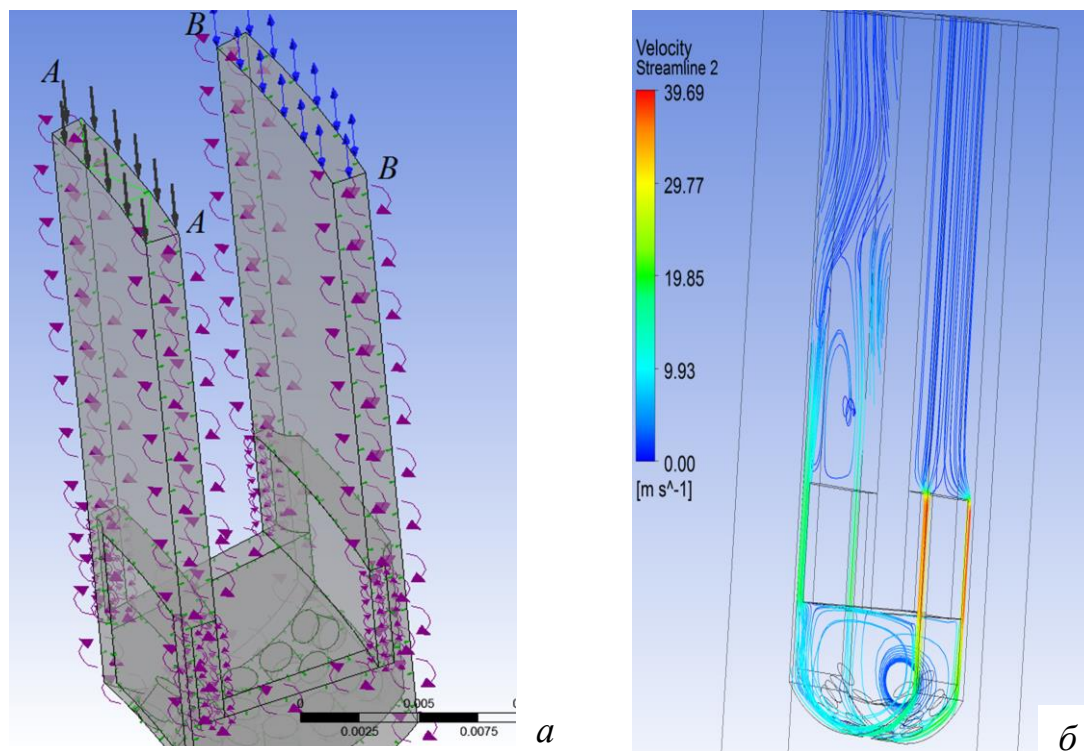


Рисунок 3.19 – Моделирование гидродинамических процессов в системе ANSYS: *а* – распределение граничных условий в домене «вода»; *б* – результаты моделирования (линии тока жидкости)

Для достоверности результатов проведено моделирование забойных процессов с различной длиной домена породы и очистного агента. Результаты показали, что длина керна не меняет сути процессов происходящих на забое. При этом характер течения жидкости в затрубном пространстве стабилен и закономерен, в то время как в призабойной зоне наблюдается смешанное течение жидкости, неоднородность направления потока жидкости и распределения гидравлического давления (рис. 3.19, б). Поэтому возникает необходимость детального изучения гидродинамических и гидробарических процессов, протекающих на забое скважины, особенно под режущей частью бурового инструмента.

3.2.1 Исследование гидробарических процессов, протекающих при разрушении горной породы резцом *PDC* в системе *ANSYS*

Итак, в процессе бурения под режущей частью алмазного резца образуется некая жидкая среда, находящаяся в динамическом состоянии. Развиваемое средой усилие сопротивления резцу может меняться в зависимости от свойств промывочной жидкости, породы, механизма разрушения и геометрии установки резцов. К тому же, учитывая форму резца *PDC*, очевидно, что чем больше площадь контакта среды с резцом, тем больше реакция ее сопротивления. При этом следует отметить, что помимо геометрической и геологической составляющих, на описанный процесс оказывает влияние гидробарическое состояние среды.

Давление жидкости на резец можно определить как

$$p = \frac{F}{S}. \quad (3.5)$$

где F – сила, с которой среда оказывает давление на резец, S – площадь контакта среды с резцом.

Тогда, с учетом гидродинамической составляющей реакции сопротивления среды (R_c , формула 2.5), давление можно найти как:

$$p = \frac{0,5v_p^2 \rho_p S C_c \cos \gamma_{\Pi}}{S} = 0,5v_p^2 \rho_p C_c \cos \gamma_{\Pi}. \quad (3.6)$$

Учитывая особенность расположения резца *PDC* (углы установки в инструменте), согласно схеме на рисунке 3.20., под резцом, при его контакте с породой, можно выделить три зоны, в каждой из которых при прочих равных условиях давление, оказываемое жидкостью на рабочую грань резца, будет не одинаковое в силу различного ее объема и площади контакта с резцом.

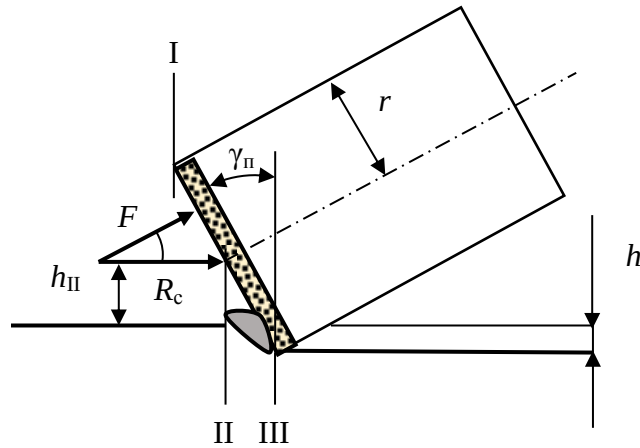


Рисунок 3.20 – Схема анализа гидродинамического процесса резания-скалывания единичным резцом *PDC*

В сечении I, наиболее приближенном к матрице инструмента (рис. 3.18), давление можно приравнять гидростатическому, которое будет равно:

$$p_I = H\rho_p g, \quad (3.7)$$

где H – глубина скважины, м; ρ_p – плотность промывочной жидкости; g – ускорение свободного падения, м/с².

В сечении II, касающееся центра режущей поверхности резца, учитывая наличие циркуляции промывочной жидкости и состояния среды в данной области, давление будет определяться как сумма давлений гидростатического и скоростного напора:

$$p_{II} = H\rho_p g + 0,5v_p^2 \rho_p C_c \cos \gamma_p = \rho_p (Hg + 0,5v_p^2 C_c \cos \gamma_p). \quad (3.8)$$

В плоскости непосредственного контакта *PDC* с породой (сечение III, рис. 3.18) давление можно определить по зависимости:

$$p_{III} = H\rho_p g + p \frac{h_{II}}{h} = H\rho_p g + 0,5v_p^2 \rho_p C_c \cos \gamma_p \frac{h_{II}}{h} = \rho_p \left(Hg + \frac{v_p^2 C_c \cos^2 \gamma_p r}{2h} \right). \quad (3.9)$$

Согласно данному аналитическому анализу выражений (3.7)-(3.9), давление будет максимальным в сечении III. Наибольшее значение давления здесь зависит прежде всего от скорости перемещения резца v_p^2 , переднего

угла установки резца γ_{Π} , его размеров и глубины резания-скалывания горной породы, а также от формы поверхности резца, которое в формуле (3.9) учитывается значением коэффициента C_c .

При этом, следует отметить, что высокое давление с одной стороны провоцирует возникновение силы, выталкивающей резец, с другой стороны, если оно возникает в плоскости контакта резца с породой, где и проходит сечение III, данное явление может способствовать активному проникновению бурового раствора в зону разрушения горной породы (рис. 3.21), что в свою очередь позволит разупрочнить породу и повысить производительность бурения. Согласно механизму разрушения горной породы резцом *PDC*, данное предположение вполне обоснованно наличием трещин, пустот и разрывов в породе, находящейся в области трещины отрыва (рис.3.19).

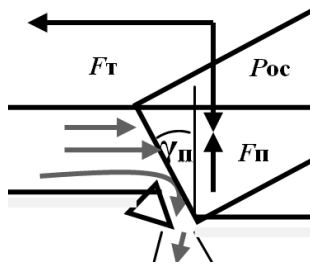


Рисунок 3.21 – Схема проникновения промывочной жидкости под резец

С целью оценки адекватности полученных аналитических результатов проведено компьютерное моделирование, иммитирующее движение резца *PDC* в жидкой среде. Моделирование проводилось в системе *ANSYS*, в модуле *CFX*, на основе метода конечных элементов с учетом основных законов механики сплошной среды.

Построение модели включало в себя: подготовку исходных данных; определение граничных условий и допущений; разбиение модели на элементы.

Исходными данными для составляемой модели являлись конструктивные параметры установки резца *PDC* в буровом инструменте, а именно передний и фронтальный углы, выбор скорости перемещения осуществлялся с учетом радиуса расположения резца на торце инструмента и рекомендуемых производственных значений частоты вращения буровым инструментом типа *PDC*.

Имитационная модель состоит из домена жидкости, геометрия которого учитывает особенности расположения и формы резца *PDC*, а также и его контакта с забоем скважины.

На результат решения задачи предложенным методом большое влияние будет оказывать сетка разбития модели на элементы. Основной областью исследования является зона взаимодействия резцов с породой, поэтому область контакта и зона под резцом разбита мелкой сеткой для получения точного и достоверного решения. Для определения оптимального количества элементов была проведена серия моделирований гидродинамических процессов, протекающих на забое скважины под резцом *PDC* в одинаковых условиях, но с различным количеством элементов. Количество элементов и время моделирования, превышая которые не удалось зафиксировать изменение результатов, приняты как оптимальные.

Составленная имитационная 3D модель позволяет определять скорость течения жидкости и давление среды в любой точке призабойной зоны.

Результаты моделирования показали, что в процессе бурения перед резцом повышается давление очистного агента (рис. 3.22, *а*). Причем зона наибольших показателей соответствует плоскости соответствующей сечению III схемы аналитического исследования (рис. 3.20). При этом повышение частоты вращения с 200 до 300 мин⁻¹ привело к повышению давления более чем в два раза (рис. 3.22, *а, б*).

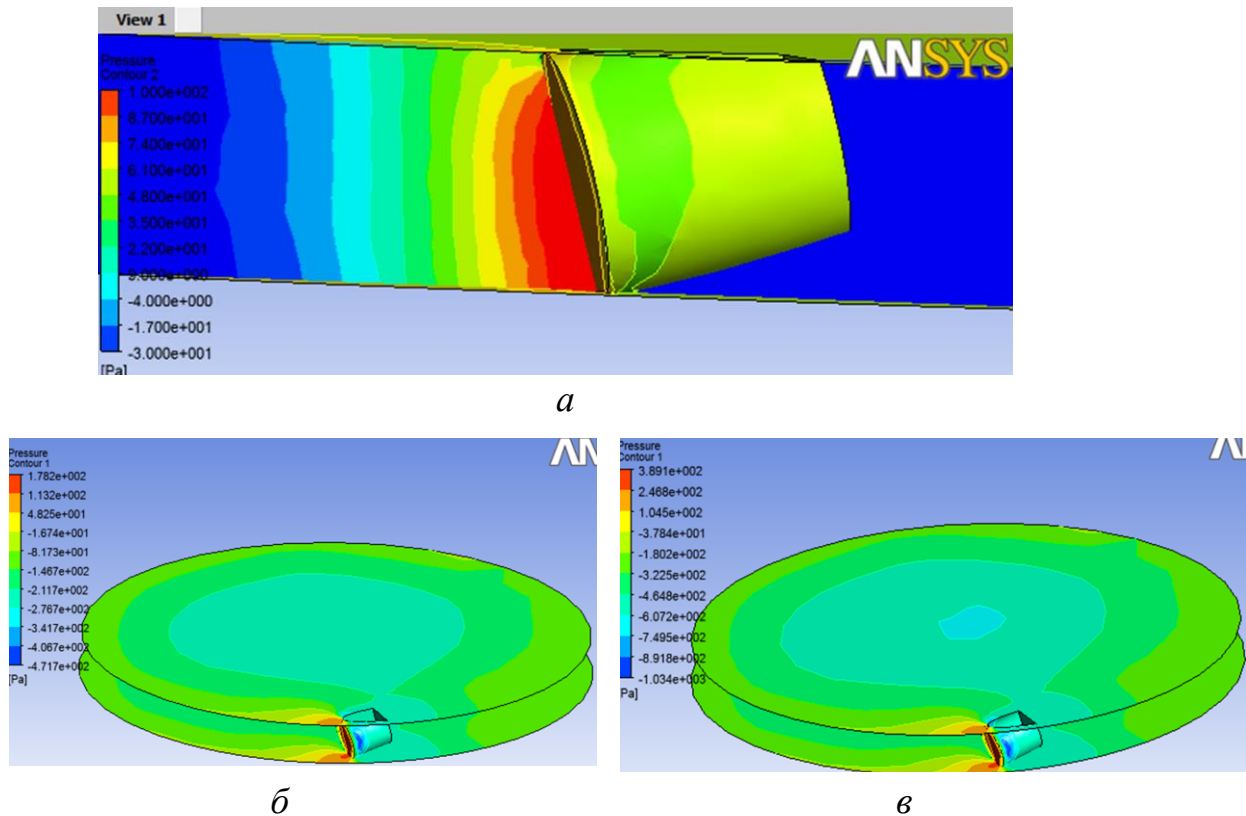


Рисунок 3.22 – Результаты моделирования перемещения резца *PDC* в водной среде: *а* – распределение гидростатического давления перед резцом; *б* – гидростатическое давление в призабойной зоне при частоте вращения 200 мин⁻¹; *в* – гидростатическое давление в призабойной зоне при частоте вращения 300 мин⁻¹

Таким образом, компьютерное моделирование подтвердило выводы аналитического исследования: максимальное давление жидкости будет сосредотачиваться в пределах зоны сечения III, а повышение скорости перемещения резца будет способствовать повышению давления под резцом. Такая картина распределения давления жидкой среды в зоне разрушения способствует, с одной стороны, созданию гидравлического подпора внедрению резца в забой, с другой – возможности активного воздействия промывочной жидкости на зону предразрушения горной породы.

При этом, чем больше передний угол установки резца, тем зона максимального давления имеет более распространенный по рабочей поверхности резца характер и повышенные значения при аналогичных параметрах бурения (рис. 3.23).

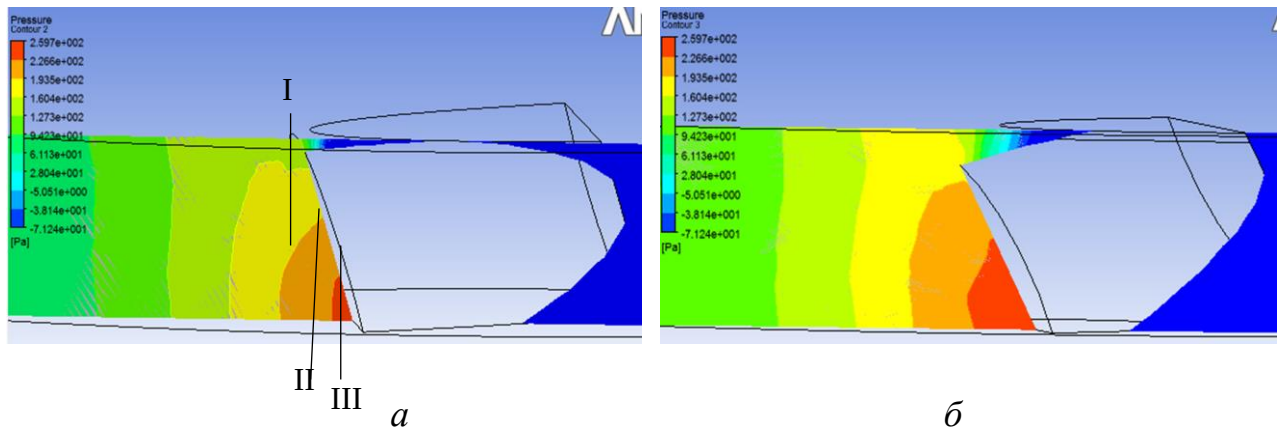


Рисунок 3.23 – Результаты компьютерного моделирования гидробарических процессов в системе ANSYS, давление в пределах резца PDC: а – передний угол установки резца $\gamma_n = -15^\circ$; б – $\gamma_n = -25^\circ$

Как показывает компьютерное моделирование в комплексе ANSYS (рис. 3.23), при $\gamma_n = -15^\circ$ зона максимального давления смещается ближе к контакту резца с горной породой и имеет точечный характер. При этом резец по общей площади рабочей части испытывает меньшее сопротивление среды в связи с меньшим показателем гидравлического давления. При этом, если угол $\gamma_n = -25^\circ$, зона максимального давления имеет более распространенный по рабочей поверхности резца характер и повышенные значения при аналогичных параметрах бурения.

Увеличение значения отрицательного переднего угла способствует концентрации давления среды в плоскости контакта резца с породой. Чем больше значение переднего угла установки резца, тем большее влияние оказывает плотность среды на глубину его резания. При изменении угла на 10° , степень влияния увеличивается в 1,5 раза.

Отсюда следует, что изменяя лишь передний угол установки (γ_n) резца *PDC*, можно изменить картину распределения создавшегося давления жидкой среды на всем забое скважины.

Полученный результат указывает на совокупное влияние повышенного давления, вызванного изменением значения переднего угла установки резца, и плотности жидкой среды.

Таким образом, гидродинамика процесса резания-скалывания породы резцами *PDC* из-за размеров резцов и их наклонного расположения в буровом требует повышенного внимания при проектировании алмазного бурового инструмента.

Зачастую при аналитическом исследовании процессов разрушения горной породы практикуется проекция результатов работы одного резца на модель работы группы таких резцов, что приводит к упрощению полученной математической модели. К тому же в случае исследования гидродинамических процессов подобная интерполяция недопустима.

Так, при моделировании гидравлических процессов, возникающих при бурении долотом типа *PDC*, на торце которого расположено семь групп резцов, показывает, что при одних и тех же условиях картина распределения давления в пределах одного резца немного иная (рис. 3.24). Представленная на рисунке 3.23 картина распределения давления соответствует резцам, расположенным по внешнему радиусу долота. При этом чем больше фронтальный угол установки резца, тем выше давление на его рабочей поверхности. Чем ближе резец расположен к центру долота, тем давление по этой же поверхности резца ниже.

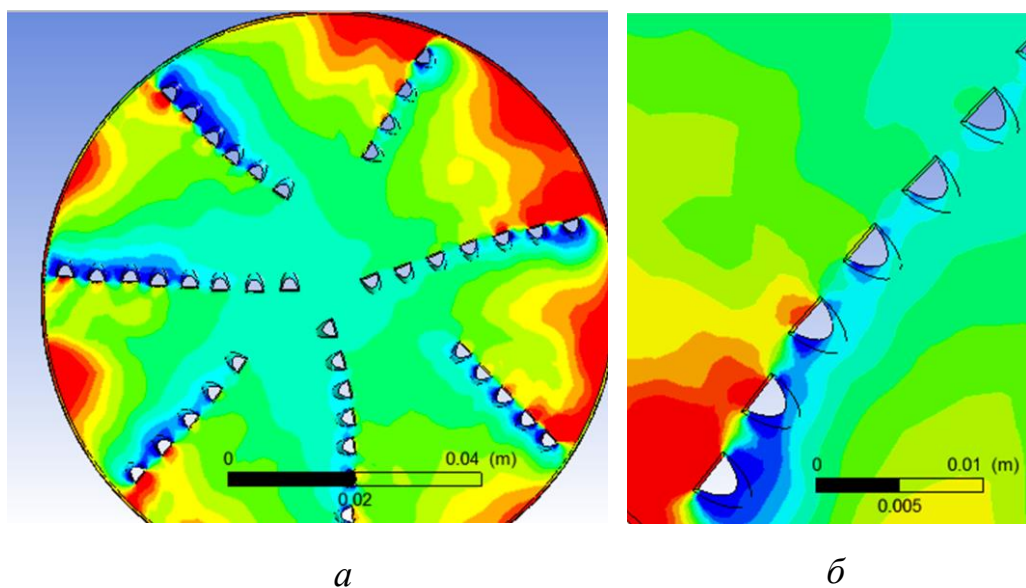


Рисунок 3.24 – Результаты компьютерного моделирования гидродинамических процессов на забое скважины: *а* – на торце долота; *б* – в пределах группы резцов

Используя полученные результаты и регулируя геометрические параметры установки резцов на рабочей поверхности долота, можно добиться такого распределения давления жидкой среды, которое будет способствовать повышению эффективности разрушения породы на забое, а не препятствовать, как в случае неверно подобранной геометрии.

3.2.2 Исследование гидродинамических процессов, протекающих при разрушении горной породы инструментом, армированным алмазным кристаллом

Форма резца в виде алмазного кристалла и особенности расположения его в матрице бурового инструмента формирует несколько иную, отличную от сформировавшейся при бурении инструментом *PDC*, картину гидродинамического состояния призабойной среды.

Исходя из вышеописанных результатов, одним из способов борьбы с сопротивлением среды может выступать улучшенная очистка режущей

поверхности алмазного кристалла от выбуренного шлама. Повышению очистки может способствовать применение определенного вида очистного агента, повышение величины подачи промывочной жидкости и многие другие технологические факторы, варьирование которых может повлиять на общие результаты бурения. Поэтому технологический способ, направленный на борьбу со шламом, не всегда является приемлемым. Одним из вариантов улучшения очистки забоя является разработка конструкции промывочной системы бурового инструмента, способствующей проникновению промывочной жидкости в рабочую зону, т.е. на контакт резцов с породой.

Для сравнительного анализа влияния геометрии промывочной системы инструмента на очистку забоя проведено компьютерное моделирование гидродинамических процессов, протекающих на забое скважины при бурении коронками, армированными алмазными синтетическими кристаллами и обладающими различной конструкцией промывочной системы.

С целью увеличения охлаждающей и очищающей от шлама функции промывочной системы предлагается изменить конструкцию торца коронки так, чтобы направить траекторию движения жидкости под режущую часть коронки, т.е. между сектором и забоем.

В качестве типовой модели выбрана конструкция алмазной однослойной буровой коронки, содержащей корпус с матрицей, разделенной промывочными каналами на секторы, содержащие алмазные резцы, установленные с заданным выпуском.

Промывочная система коронки состоит из торцевых окон и боковых наружных и внутренних промывочных каналов. Боковые промывочные каналы соединяют внутреннюю часть коронки с наружной. За основу проектирования принят принцип изменения глубины лунки боковых промывочных каналов, их количества и уменьшение длины сектора коронки с сохранением общего количества алмазных резцов или площади рабочей поверхности, согласно результатам ранее проведенным исследований [130].

Изменение конструкции промывочной системы заключается в перекрытии с одной стороны боковых каналов в чередующемся порядке различными способами (рис. 2.25, 2.26, 2.27), тем самым изменяя траекторию движения промывочной жидкости.

В результате получены конструкции алмазных коронок, трехмерные модели которых представлены на рисунках 2.25, 2.26, 2.27.

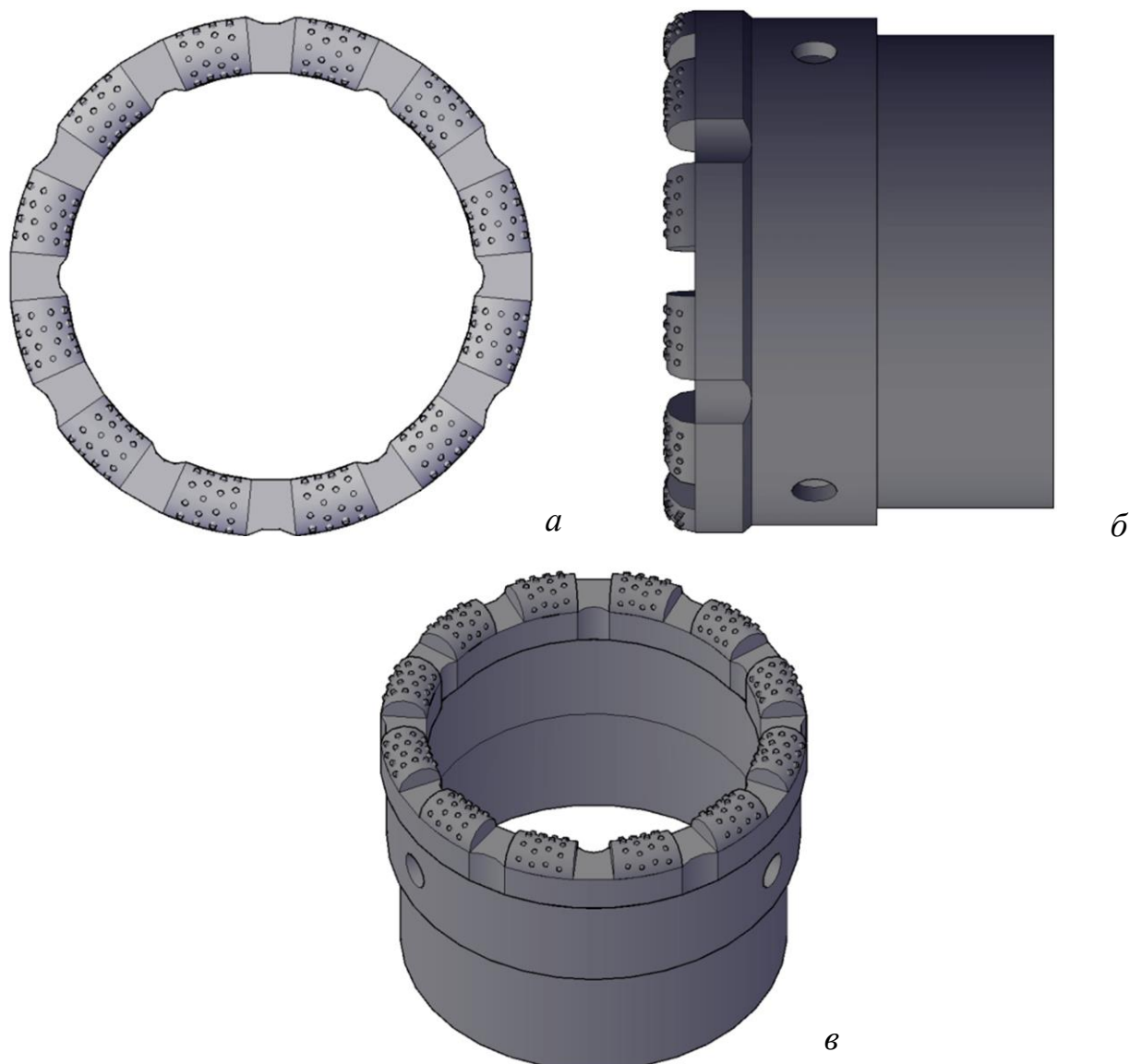


Рисунок 3. 25 – Трехмерная модель №1 (внутренние и наружные боковые каналы находятся в шахматном порядке): *а* – вид сверху; *б* – вид сбоку; *в* – вид в изометрии «под углом»

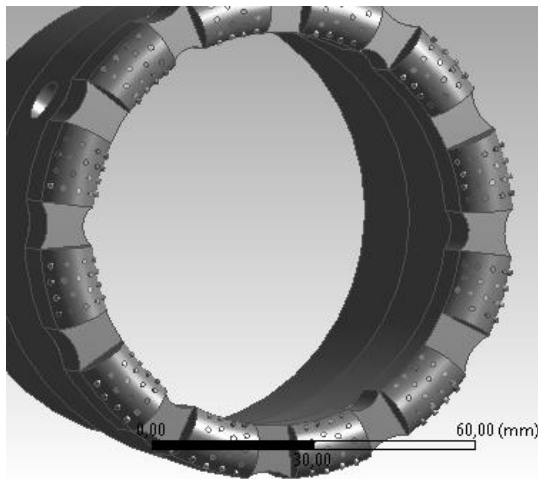
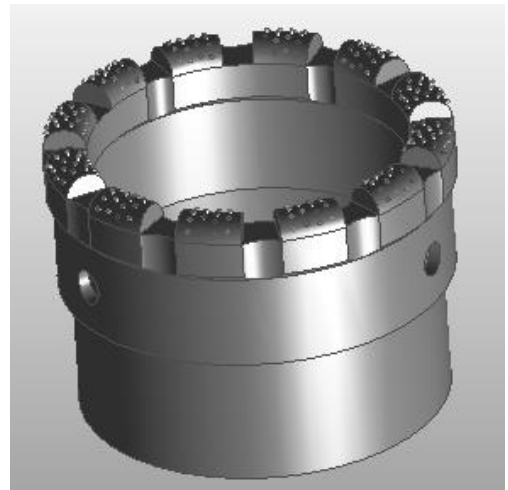
*a**б*

Рисунок 3.26 – Трехмерная модель №2 (все наружные боковые каналы открыты, внутренние закрыты через одно): *a* – вид сверху; *б* – вид в изометрии «под углом»

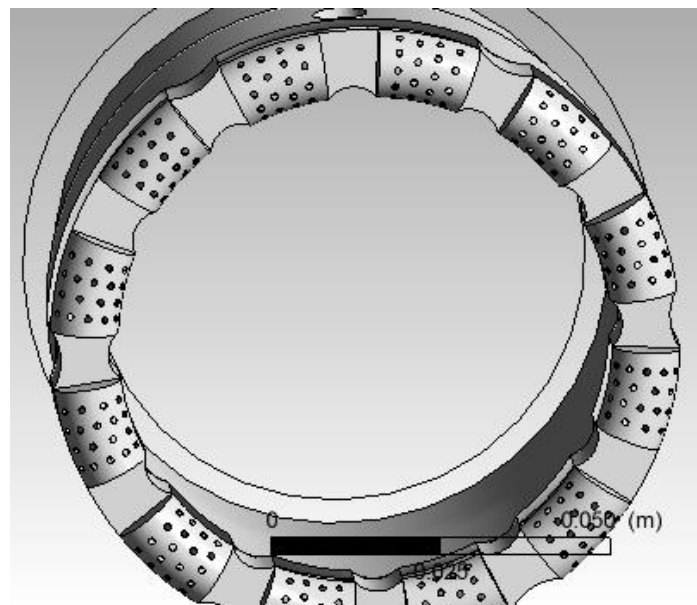


Рисунок 3.27 – Трехмерная модель №3 (все внутренние боковые каналы открыты, наружные закрыты через одно)

Для исследования течения жидкости в процессе бурения коронками представленных конструкций, аналогично моделированию гидродинамики

призбойной зоны в пределах резца *PDC*, проведено компьютерное моделирование в системе *ANSYS*.

Имитационные модели состоят из нескольких доменов: резца, породы и промывочной жидкости. В данном случае модель включает в себя домены тел различного агрегатного состояния.

За основу параметрической принята та часть модели, которая достоверно учитывает симметрию процессов происходящих в коронке. Границы модели задаются плоскостями симметрии и находятся в пределах области сектора коронки, проходя через центр промывочного окна.

Каждая модель была разбита на элементы. Для детального исследования промывочная система коронок имеет более густую сетку, особенно в местах прохождения промывочной жидкости (рис. 3.28).

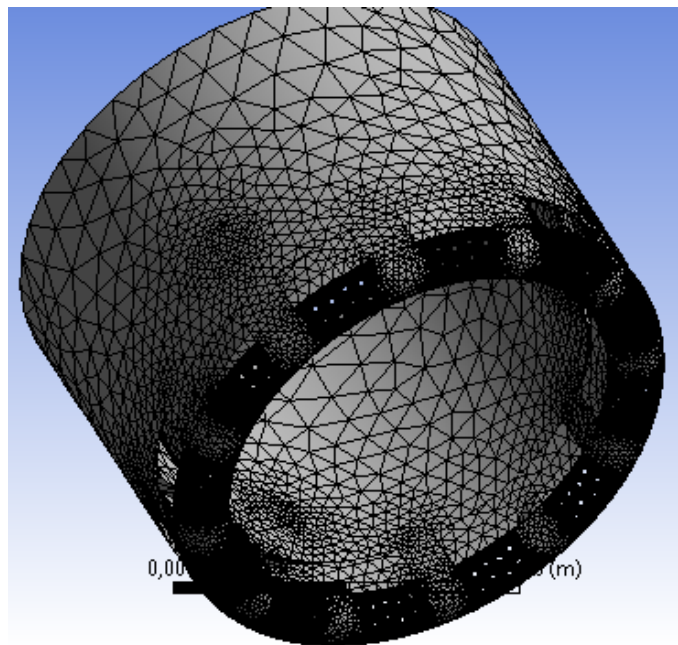


Рисунок 3.28 – Сетка трехмерных моделей

Моделирование проводилось с учетом всевозможных условий бурения алмазным инструментом, значения частоты вращения и подачи промывочной жидкости задавались в различных вариациях.

Пример результатов моделирования гидродинамических процессов, протекающих на забое при условии подачи промывочной жидкости 40 л /мин и частоты вращения 800 об/мин коронками, отличающимися только конструкцией промывочной системы приведены на рис. 3.29, 3.30.

Анализ итогов моделирования показал, что в случае применения традиционной промывочной системы, где каждое торцевое окно имеет один наружный и один внутренний промывочный боковой канал, основной поток жидкости попадая по внутренним боковым каналам практически сразу же в том же объеме выходит через наружные. Таким образом вымывая только зону торцевого промывочного канала. Лишь малая доля жидкости попадает в этот момент под рабочий торец (рис. 3.29, *а*). Улучшению очистки способствует повышение подачи промывочной жидкости, за счет давления и частоты вращения, за счет быстрой смены местоположения рабочего торца коронки.

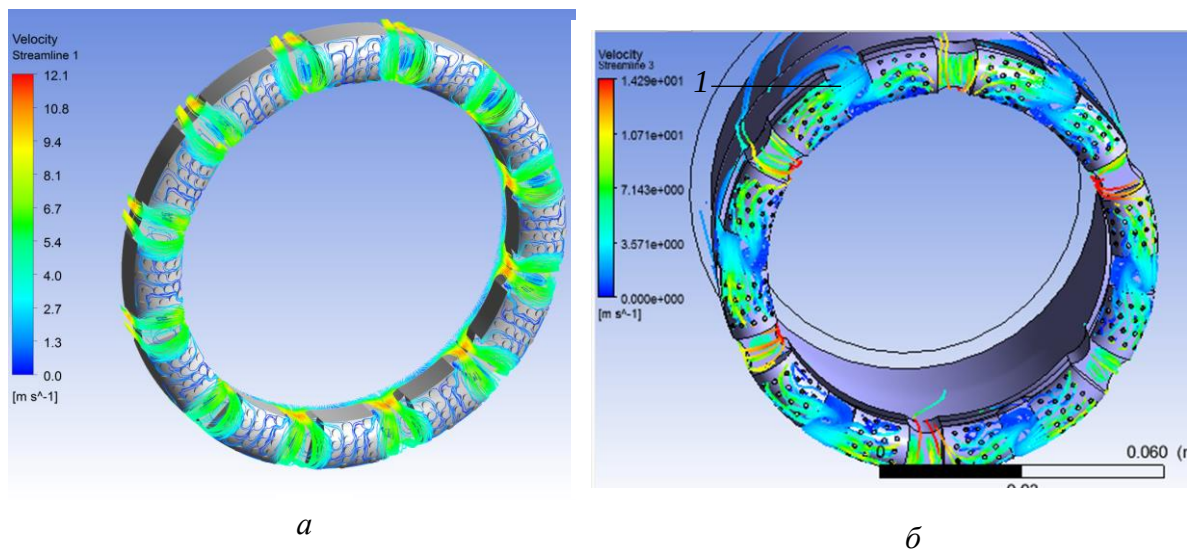


Рисунок 3.29 – Некоторые результаты моделирования гидродинамических процессов, протекающих под торцом алмазной однослойной коронки: *а* – с традиционной промывочной системой; *б* – с промывочной системой, где все внутренние боковые каналы открыты, наружные закрыты через одно: 1 – торцевое промывочное окно, турбулентное течение жидкости

В случае применения конструкции с сектором, содержащем более 4 радиальных рядов алмазов, алмазные резцы сбегающей его части практически не испытывают контакта с пребывающей промывочной жидкостью. Результаты лабораторных испытаний алмазной коронки, в секторе которой располагалось 11 радиальных рядов алмазов [130], зафиксировали аномальный износ резцов в этой части бурового инструмента, что можно связать с повышенным нагревом и дополнительным трением резцов о накопленный шлам (рис. 3.30).



Рисунок 3.30 – Торец рабочей части алмазной однослойной коронки армированной алмазами марки АС: *а* – фото торца коронки после бурения; *б* – фото набегающей части сектора; *в* – фото сбегающей части того же сектора [130]

Применение конструкции предложенных моделей №2 и №3 при значениях подачи промывочной жидкости в рекомендуемых для алмазного бурового инструмента пределах, позволяет увлекать часть жидкости под торец коронки.

При этом в случае использования конструкции №2, в промывочных окнах 1, закрытых с внутренней стороны коронки (со стороны керна), создается большая турбулентность, позволяющая лучше очищать данный участок забоя от шлама (рис. 3.29, б).

Наиболее эффективной оказалась конструкция промывочной системы модели №3. Для реализации предлагаемой системы промывки торцевой части коронки необходимо, чтобы количество наружных боковых каналов 4 промывочной системы коронки было в два раз меньше чем внутренних 3 (рис. 3.31). Что не вызывает затруднений при изготовлении инструмента, даже сокращает время на проточку боковых промывочных каналов.

Таким образом, конструкция коронки с улучшенной промывочной системой должна состоять из торцевых промывочных окон 5, одни из которых имеют связь с двумя боковыми каналами: одним наружным 4 и одним внутренним 3 (тип А, рис. 3.31), а другие имеют связь только с одним внутренним 3 боковым каналом (тип В, рис. 3.31). В торцевом окне 5 типа В, имеющем связь только с внутренним боковым каналом 3, жидкость под давлением, не имея прямого выхода, распределяется под смежными секторами 2, а оттуда устремляется в ближайшее торцевое окно 5 типа А, который имеет связь с наружным боковыми каналом 4 (рис. 3.32).

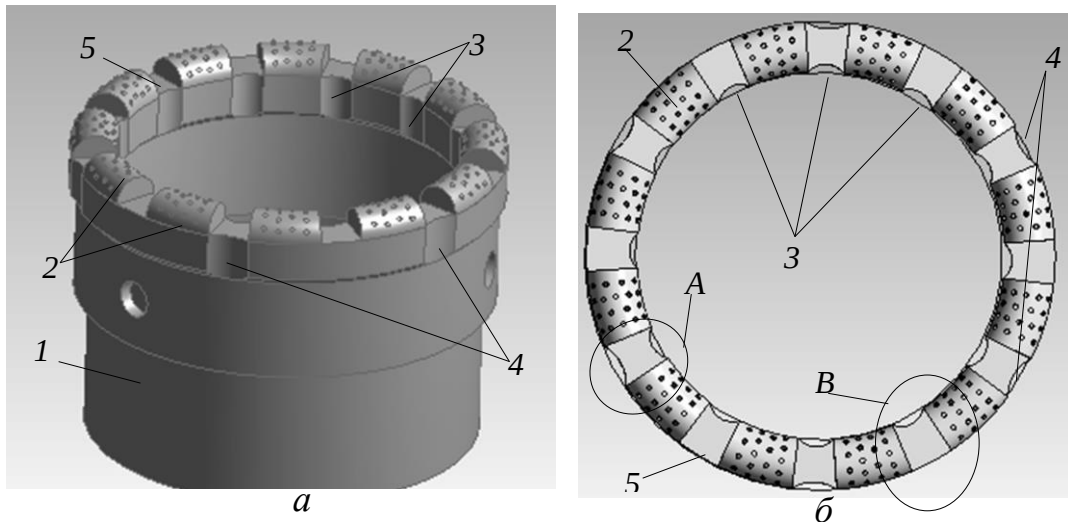


Рисунок 3.31 – Модель алмазной однослойная коронки с улучшенной промывочной системой: *а* – общий вид; *б* – торцевая часть; 1 – корпус; 2 – сектора, содержащие алмазные резцы; 3 – внутренние боковые промывочные каналы; 4 – наружные боковые промывочные каналы; 5 – торцевые промывочные окна

В промывочном окне типа *A* жидкость, выходящая из-под сектора 2, смешивается со скоростным потоком, поступившим из внутреннего бокового канала 3, и выносится, захваченная этим потоком, в наружный боковой канал 4 (см. рис. 3.32). Под сектором 2 зазор меньше чем в пределах промывочного торцевого окна 5, при выходе жидкости из-под сектора 3 в промывочное окно типа *A* происходит разряжение давления жидкости. К тому же скоростной напор, образовавшийся в торцевом промывочном окне типа *A*, за счет наличия прямой связи с двумя боковыми каналами, увлекает его за собой.

В результате увеличивается объем и скорость потока жидкости, проходящей под наиболее нагретой и загрязненной алмазосодержащей частью секторов 2 коронки, что увеличивает ресурс инструмента за счет улучшенной очистки и охлаждения алмазосодержащих секторов.

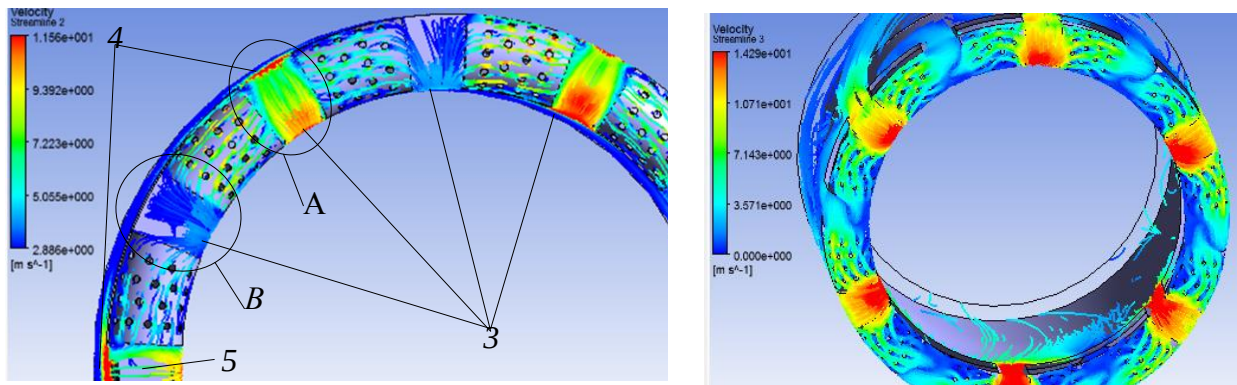


Рисунок 3.32 – Результаты компьютерного моделирования течения жидкости в пределах торца коронки

На представленную конструкцию алмазной однослойной коронки с улучшенной промывочной системой получен патент РФ на изобретение №2745546 [118]. Предлагаемая конструкция промывочной системы может быть реализована в алмазных однослойных коронках, в импрегнированных коронках с W-образным профилем торца сектора и другом породоразрушающем инструменте, имеющем связь между смежными промывочными каналами по сектору.

Представленная разработка направлена на повышение ресурса алмазного бурового инструмента, путем улучшения системы охлаждения и очистки рабочей алмазосодержащей части.

Как показали результаты компьютерного моделирования гидродинамических процессов, протекающих на забое при бурении инструментом, армированным алмазным кристаллом, на скорость и направление течения промывочной жидкости, помимо величины ее подачи, влияет частота вращения инструмента. При этом в процессе вращения между торцом бурового инструмента и призабойной жидкостью возникают вязкие напряжения, которые изменяют направление и скорость течения жидкости под сектором коронки [130].

Результаты детального исследования гидравлического режима работы алмазной коронки, основанного на результатах моделирования, показали, что

чем больше частота вращения, тем больше сила, увлекающая жидкость под торец сектора. При этом, геометрия промывочной системы бурового инструмента может способствовать или препятствовать циркуляции жидкости в определенных участках рабочей зоны коронки.

Чем больше частота вращения коронки, тем больший объем жидкой среды попадает под торец сектора, а не уходит в боковой промывочный канал (рисунок 3.33).

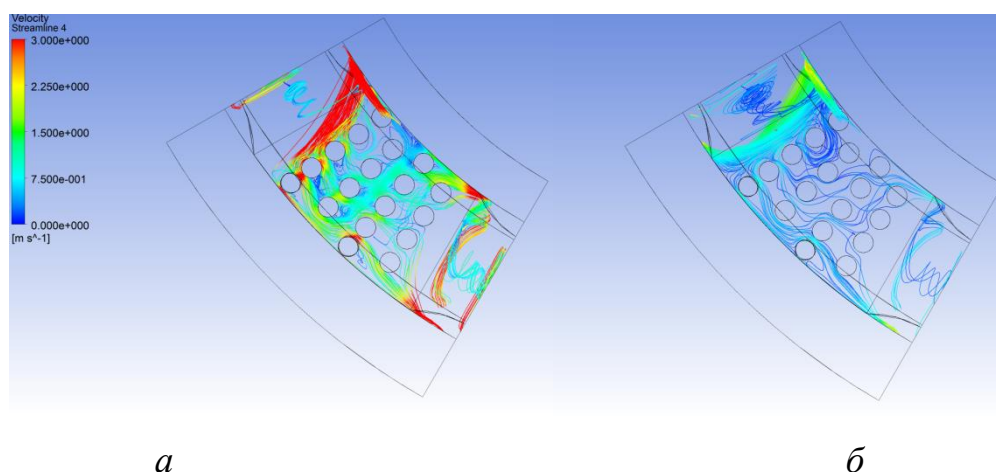


Рисунок 3.33 – Линии тока жидкости на забое в пределах одного сектора коронки: *а* – частота вращения 800 мин^{-1} ; *б* – частота вращения 200 мин^{-1} [130]

Результаты исследования течения жидкости на забое при бурении алмазной коронкой (таблица 3.1, рисунок 3.34), показали, что при частоте вращения менее 380 мин^{-1} жидкость под торец коронки из боковых промывочных каналов не поступает. При частоте вращения 600 мин^{-1} течение жидкости под торцом сектора коронки не значительно, и лишь при частоте вращения более 800 мин^{-1} движение жидкости под сектором коронки способствует эффекту очистки и охлаждения.

Таблица 3.1 – Результаты моделирования течения жидкости под торцом коронки диаметром 93 мм ($P = 20$ кН, $Q = 40$ л/мин)

Частота вращения, мин^{-1}	200	400	600	800	1000
Средний расход жидкости под сектором, кг/с	- 0,00139*	0,000122	0,00134	0,00234	0,00320

* минус обозначает, что направление жидкости обратно направлению вращения коронки.

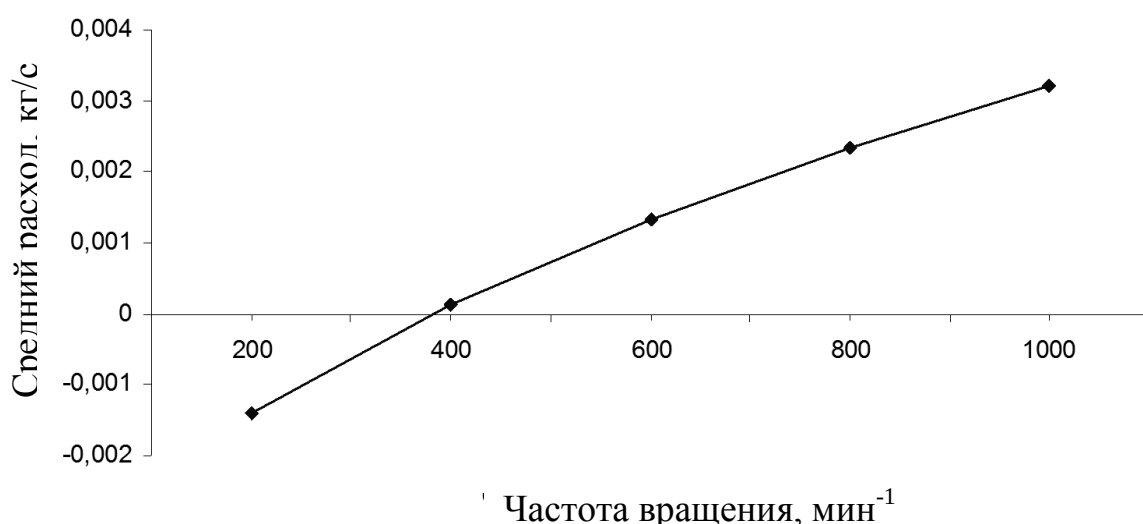


Рисунок 3.34 – График зависимости изменения среднего расхода жидкости под торцом сектора коронки от частоты вращения коронки (коронка диаметром 93 мм с традиционной конструкцией промывочной системы, но с укороченным сектором, осевая нагрузка 20 кН, подача промывочной жидкости 40 л/мин)

В то же время, при одной и той же подаче промывочной жидкости путем изменения конструкции промывочной системы, можно добиться изменения скорости и объема промывочной жидкости, поступающей под торец рабочей части породоразрушающего инструмента. Тем самым влияя на степень его охлаждения и очистки.

Таким образом, можно сделать вывод, что решение проблем эффективности бурения и повышения ресурса бурового инструмента возможно путем изменения геометрических параметров промывочной системы бурового инструмента.

3.3 Исследование работы группы алмазных резцов

Для оценки влияния местоположения алмазного резца и взаимного влияния рядом располагающихся резцов, посредством доступного современному пользователю ПК языка программирования *Delphi*, разработана компьютерная программа *koronka2_v.2.7*, позволяющая осуществлять моделирование вращения бурового инструмента и определять резцы, испытывающие наибольшее сопротивление среды.

В основу программы *koronka2_v.2.7* заложена расчётная модель, позволяющая определять углубление бурового инструмента при его движении по забою, а также силы сопротивления среды, действующие на каждый алмаз, в зависимости от раскладки алмазов [130].

Математическая основа модели, заложенной в программу, состоит в следующем. Считаем, что на коронку действует осевая нагрузка P_{oc} , которая распределяется равномерно на каждый алмаз ($P = P_{oc}/n_k$, где n_k – количество алмазов в коронке). Положение каждого алмаза во время работы коронки определяется углом её поворота (φ) и углублением на некоторую величину (z). Каждая линия резания бурового инструмента дополнительно характеризуется координатами поверхности забоя ($y(\varphi)$) в каждой своей точке (рис. 3.35).

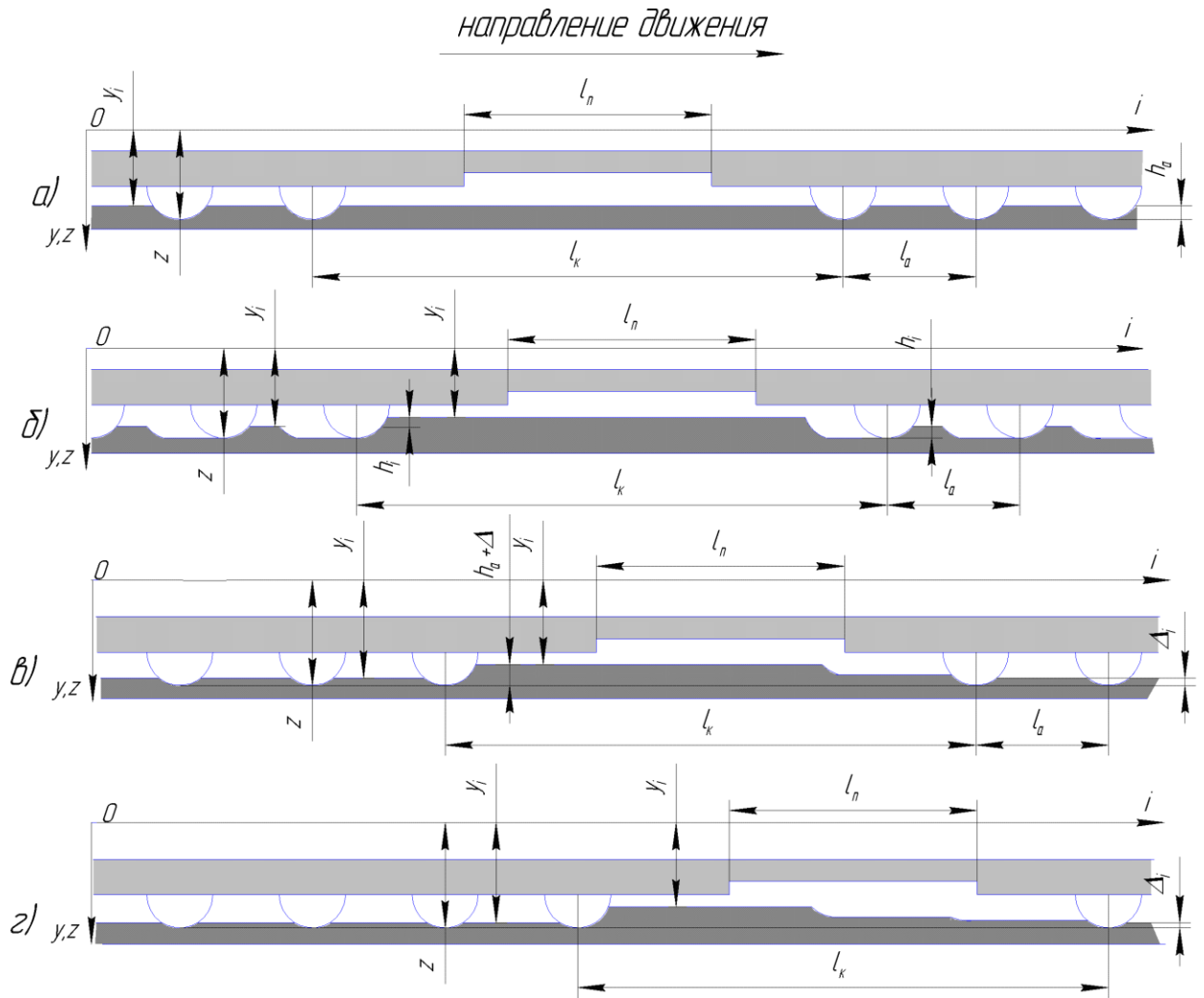


Рисунок 3.35 – Схема взаимодействия алмазов коронки одной линии резания с забоем скважины (на основе разработанной схемы ВИТР). Углубление алмазов в породе: *а* – первоначальная; *б* – при прохождении меньшего расстояния, чем расстояние между алмазами на одной линии резания (l_a); *в* – после прохождения расстояния l_a ; *г* – после прохождения расстояния $2l_a$

Глубина резания породы алмазом в конкретной точке забоя при определенном положении коронки, будет равна (рисунок 3.35, б):

$$h_i = z - y_i, \quad (3.10)$$

где y_i – координата поверхности забоя перед конкретным алмазом.

С другой стороны, при постоянной осевой нагрузке, имеем соотношение:

$$\sum_{i=1}^{n_a} h_i = n_{\kappa} h_a, \quad (3.11)$$

где значение h рассчитывается по формуле (2.31).

При вращении коронки происходит её периодическая углубление на величину Δ . В момент каждого акта разрушения породы будет выполняться следующее соотношение:

$$\sum_{i=1}^{n_a} (z - y_i + \Delta) = n_{\kappa} h_a, \quad (3.12)$$

где Δ – приращение углубления бурового инструмента на каждом акте внедрения в породу.

Из уравнения (3.12) можно найти значение Δ , соответствующее определенному положению коронки на забое.

$$\Delta = \frac{n_{\kappa} h_a - \sum_{i=1}^{n_{\kappa}} (z - y_i)}{n_{\kappa}} = h_a - \frac{1}{n_{\kappa}} \sum_{i=1}^{n_{\kappa}} (z - y_i). \quad (3.13)$$

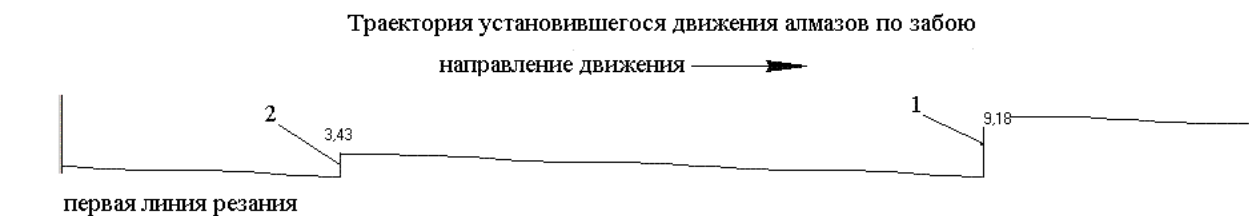
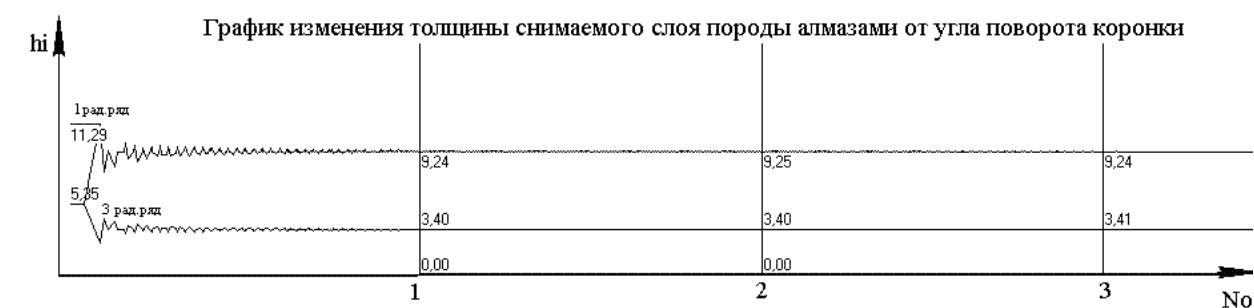
Моделируя движение бурового инструмента на забое, для каждого момента времени можно получить значение приращения его углубления Δ , координату нижнего торца коронки z и координаты поверхности забоя $y(\varphi)$ в любой точке [130].

Разработанная программа позволяет определять значение глубины резания различными алмазами в конкретной точке забоя (h_i) и отображать графически траекторию движения алмазов по забою (рис. 3.36).

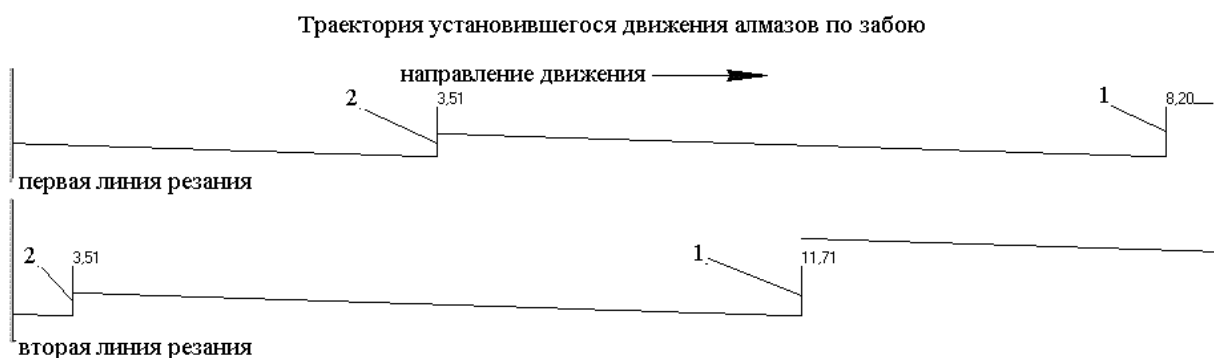
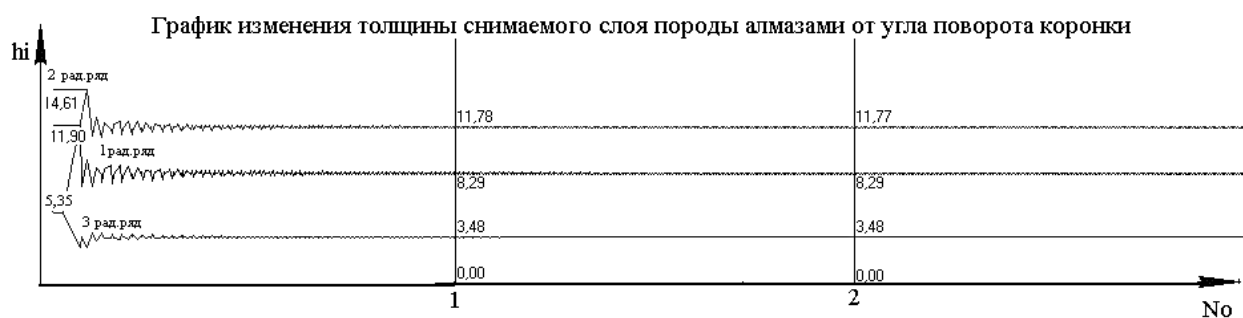
Работа с программой организована путем последовательного выполнения следующих шагов:

- задание исходных данных;

- задание параметров моделирования;
- запуск моделирования;
- обработка полученных результатов.



а



б

Рисунок 3.36 – Пример результатов моделирования движения алмазов по забою скважины: а – коронки $\varnothing 59$ мм; б – коронки $\varnothing 76$ мм 1 – первый алмаз линии резания сектора; 2 – второй алмаз линии резания сектора; N_o – номер оборота

Поскольку данная программа предоставляет возможность при моделировании учитывать характер раскладки алмазов по торцу и конструктивные параметры коронки, то это позволяет проводить сравнительную оценку влияния раскладки алмазов как на процесс движения торца коронки, так и на величину нагрузки каждого из алмазов в процессе бурения.

Исходными данными для моделирования являются координаты расположения каждого алмаза в торце коронки, а также величина первоначального углубления алмазов коронки при приложении осевой нагрузки без вращения коронки. Дополнительным необходимым параметром является общее количество точек моделирования, на которое разбивается линия резания. Величина общего количества точек моделирования задается в соответствующем поле ввода в верхней правой части главного окна. Следует отметить, что чем больше задано точек в линии резания, тем точнее результаты моделирования.

Проведено моделирование разнообразных конструкций однослойных алмазных коронок. Габариты исследуемых коронок были приняты согласно геологоразведочному сортаменту. Изменению подвергались лишь количество секторов и радиальных рядов в одном секторе, при этом приоритетным являлось сохранение неизменной общей площади рабочей поверхности.

В результате сравнительного анализа итогов компьютерного моделирования определено, что крайние по набегающей части алмазные резцы будут испытывать большее сопротивление чем остальные алмазы коронки (рис. 3.37), в связи с чем ядро сжатия под такими алмазами будет смещено вверх.

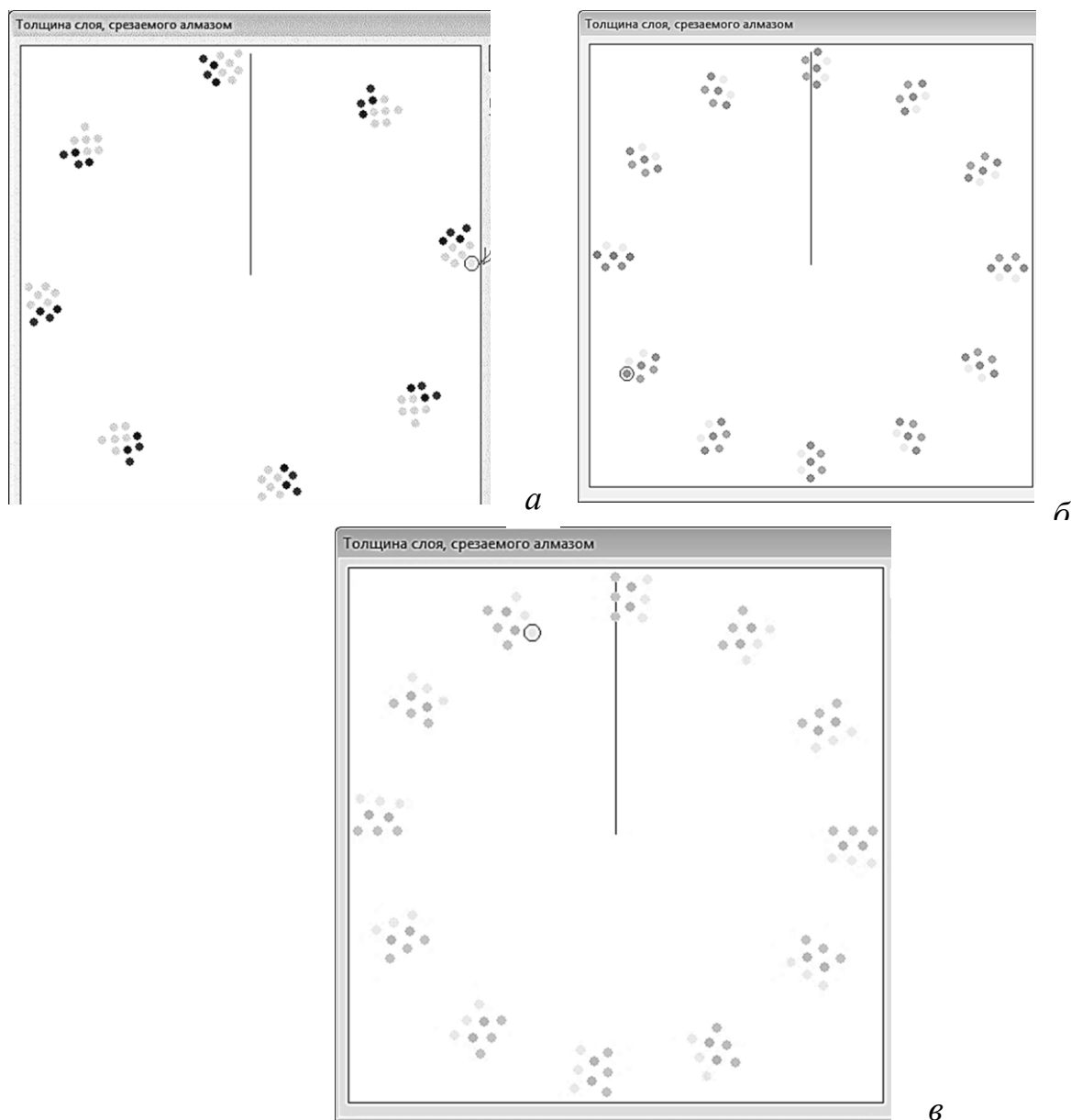


Рисунок 3.37 – Некоторые результаты моделирования в программе *koronka2_v.2.7* работы однослойной алмазной коронки: *а* – 10 алмазных резцов в секторе; *б* – 7 алмазных резцов в секторе; *в* – 8 алмазных резцов в секторе; ● – резец, испытывающий наибольшее сопротивление; ○ – резец испытывающий наименьшее сопротивление.

При чрезмерном увеличении осевой нагрузки, тангенциальное усилие, действующее на крайние алмазные резцы будут значительно больше, чем, действующие на остальные резцы бурового инструмента. Такое повышение сопротивления может привести к чрезмерному смещению ядра сжатия вверх

и как следствие снижению глубины борозды разрушения крайними алмазами.

Результаты моделирования в программе *koronka2_v.2.7* подтверждают, что увеличение количества торцевых промывочных окон приводит к снижению степени сопротивления среды алмазным резцам. Поэтому одним из принципов конструирования высокоресурсного алмазного бурового инструмента должно быть создание развитой промывочной системы с сохранением общей площади рабочей поверхности инструмента. К тому же, помимо разнообразных факторов, влияющих на ресурс алмазного инструмента, большое значение имеет температурный режим его работы [130]. Основная рабочая нагрузка приходится на алмазосодержащую часть инструмента и именно из-за ее износа коронка преждевременно выходит из строя. Перегрев алмазного сырья осуществляется из-за повышенного трения о породу, особенно при большом крутящем моменте, и из-за скопления шлама под торцом. Попросту говоря, хорошая очистка и достаточное охлаждение алмазосодержащей рабочей части значительно повысит продолжительность эксплуатации бурового инструмента, с чем безусловно справляется развитая промывочная система.

ВЫВОДЫ

На основании исследований процесса разрушения горной породы алмазным буровым инструментом методом компьютерного моделирования получены следующие основные результаты и сделаны выводы:

1. достижение оптимальных показателей углубления за оборот при бурении скважин алмазным буровым инструментом возможно путем регулирования отношения значений осевого и тангенциального усилий, что облегчается с применением компьютерного аппарата;

2. при прочих равных условиях, в случае роста значения весовой плотности жидкой призабойной среды, глубина резания породы единичным резцом *PDC* уменьшается в зависимости от размера, скорости и переднего угла его установки. Причем чем больше диаметр *PDC* тем больше степень сопротивления среды резанию породы;

3. при прочих равных условиях, в случае роста значения весовой плотности жидкой среды глубина резания-скалывания породы алмазным кристаллом уменьшается в зависимости от его размера, выпуска и скорости перемещения. При этом наибольшее влияние оказывает скорость перемещения резца v_p .

4. увеличение скорости резания-скалывания горной породы повышает сопротивление призабойной среды, тем самым снижая динамическую глубину внедрения резца в горную породу;

5. по мере уменьшения размера алмазного резца степень влияния среды снижается;

6. гидродинамические процессы, сопровождающие резание-скалывание породы алмазными резцами требуют повышенного внимания при проектировании алмазного бурового инструмента;

7. решение проблем эффективности бурения и повышения ресурса бурового инструмента возможно путем изменения геометрических параметров промывочной системы бурового инструмента;

8. регулируя углы установки резцов *PDC*, можно добиться такого состояния гидродинамики жидкой среды, которое будет способствовать повышению эффективности разрушения породы;

9. на скорость и направление течения жидкой среды, помимо величины подачи промывочной жидкости, влияет частота вращения инструмента;

10. решение проблем эффективности бурения и повышения ресурса бурового инструмента возможно путем изменения геометрических параметров промывочной системы бурового инструмента;

11. конструкция коронки с укороченным сектором способствует снижению сопротивления среды внедрению резца в горную породу;

12. метод компьютерного моделирования – перспективный, надежный метод разработки алмазного бурового инструмента, позволяющий исследовать мелкогабаритную систему взаимодействия алмазного резца с породой с учетом динамических, гидродинамических, гидробарических процессов, возникающих на забое скважины.

Таким образом, геометрия конструкции алмазного бурового инструмента, отличающегося высоким ресурсом и производительностью, должна способствовать снижению весовой плотности среды. В данном случае перспективны направления: совершенствования промывочной системы, изменения углов ориентирования *PDC*, регулирования выпуска алмазного кристалла. При этом технология эксплуатации инструмента (режим бурения) должна базироваться на реализации необходимого механизма разрушения горной породы алмазным резцом с учетом переменных условий.

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕДЫ ПРИ БУРЕНИИ АЛМАЗНЫМ БУРОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Анализ полученных выражений 2.31 и 2.61, определяющих взаимозависимость геометрических параметров бурового инструмента, особенностей механизма разрушения и геолого-технологических факторов, а также результатов аналитических исследований, компьютерного моделирования показывают, что на глубину резания-скалывания породы алмазным резцом оказывает влияние его размер, характер расположения на рабочей поверхности бурового инструмента и скорость его перемещения. При этом основополагающим фактором является наличие призабойной среды, отличающейся плотностными параметрами. Как указывают результаты проведенных исследований, представленных в главах 2 и 3:

- чем больше диаметр резца, тем больше сопротивление среды и меньше глубина резания-скалывания породы;
- чем выше скорость перемещения резца, тем больше сопротивление среды и меньше глубина резания-скалывания породы;
- чем выше величина весовой плотности среды, тем больше степень сопротивления среды и меньше глубина резания-скалывания породы.

При этом совокупное влияние перечисленных факторов увеличивает степень влияния среды на результаты разрушения породы алмазным инструментом.

С целью подтверждения полученных выводов проведены исследования результатов производственного бурения алмазным инструментом.

4.1 Производственные исследования сопротивления среды инструменту типа *PDC*

В производственных условиях бурение инструментом типа *PDC* осуществляют на небольших частотах вращения, однако, учитывая размер и форму резца, т.е. площадь контакта призабойной среды с резцом, исследование сопротивления среды внедрению *PDC* в породу имеет существенное значение.

Одним из факторов, оказывающих влияние на износ резцов *PDC*, является характер нагрузки, которую испытывает резец в процессе бурения. Отсутствие сопротивления среды значительно снижает нагрузку на резец. В тоже время наличие сопротивления среды требует возложения на резец дополнительных усилий с целью достижения эффекта разрушения горной породы.

Согласно результатам изучения износа долот типа *PDC*, а также аналогичных исследований путем моделирования в системе *IDEAS* компанией *Smith Bits*, чаще всего максимальный износ резцов *PDC* наблюдается в зоне, близкой к внешнему диаметру долота. Причем максимальному износу подвержены не только резцы, имеющие одновременный контакт со стенками скважины и забоем, но и те, что разрушают только забой.

Для изучения характера износа бурового инструмента и как следствие выявления наиболее нагруженных резцов, необходимо провести производственную отработку инструмента в однородных условиях и визуально оценить его конструкцию до и после эксплуатации.

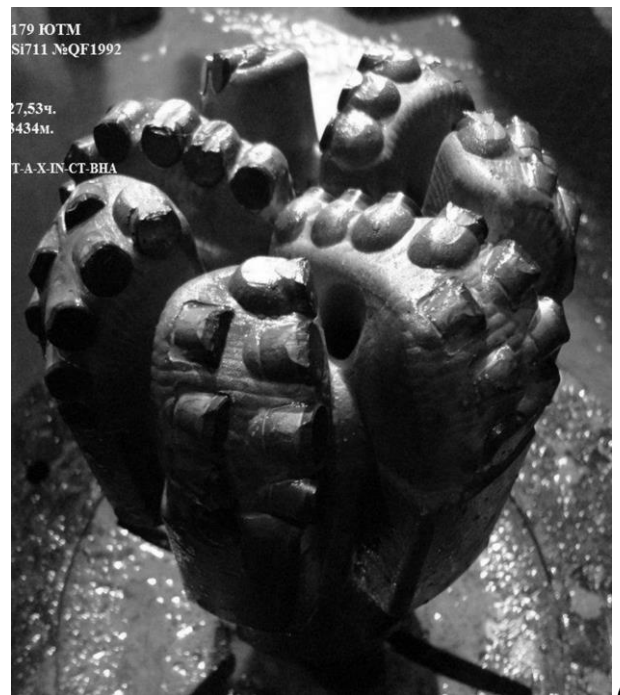
На рисунке 4.1 показаны фотографии отработанных на производстве долот, наглядно демонстрирующие износ инструмента. На рисунке 4.1, а представлено долото, снятое с работы после полной отработки в пределах Юрубчено-Тахомского нефтегазового месторождения, где бурение

производилось в горных породах средней твердости при высоких показателях механической скорости бурения.

На рисунке 4.1, б представлено долото диаметром 215,9 мм, которое было использовано при бурении скважин в Восточной Сибири. Долото матричного типа с резцами *PDC* серии *Tornado* производства компании *DDI* (США). Бурение осуществлялось на одном из нефтегазовых месторождений ротором и винтовым гидродвигателем с набором кривизны. Проходка на долото составила 1150 м при средней механической скорости бурения 20 м/ч. Максимальная механическая скорость достигала 40 м/ч [87; 94].



а



б

Рисунок 4.1 – Фотографии отработанных долот: а – на Юрубчено-Тихомского нефтегазовом месторождении; б – на севере Восточной Сибири в Эвенкии

Визуальный осмотр поверхности долот (рис. 4.1) показал, что наиболее изношенными являются резцы *PDC*, расположенные на периферии торца бурового инструмента.

Как известно, чем дальше от центра бурового инструмента находится резец, тем линейная скорость его перемещения больше [15-17; 90; 94]. Скорость конкретного резца *PDC* можно определить по формуле:

$$v_p = 2\pi\omega r_p, \quad (4.1)$$

где r_p – расстояние от центра бурового инструмента до местоположения резца.

Если линейная скорость в центральной точке торца долота равна нулю, то, например, для долота диаметром 190,5 мм (0,1905 м) при частоте вращения составляющем 300 мин⁻¹ линейная скорость резца, размещенного на внешнем радиусе торца долота, будет равна 3 м/с.

Согласно полученным результатам аналитического исследования и компьютерного моделирования процесса разрушения горной породы, повышение скорости перемещения резца ведет к повышению сопротивления среды, образовавшейся на забое скважины. Как видно по внешнему виду отработанного долота (рис. 4.1), резцы, находящиеся у центра и имеющие наименьшую скорость перемещения практически не изношены. Таким образом, анализ геометрии поверхности отработанных долот позволяет сделать вывод о том, что наиболее подверженные изнашиванию резцы, расположенные в точках, приближенных к внешнему радиусу инструмента, испытывают наибольшее сопротивление среды, вызванное высокими линейными скоростями резания, что объясняет высокую нагрузку на данные резцы. Таким образом, имеющиеся производственные данные подтверждают факт влияния скорости резания-скалывания на сопротивление среды и адекватность полученного аналитического выражения 2.61.

Согласно аналитическим исследованиям и результатам компьютерного моделирования, чем больше диаметр *PDC* тем сопротивление среды больше. С целью проверки полученного утверждения проведено исследование

результатов бурения долотами, армированными различными по диаметру резцами *PDC*.

Исследования проводились на участке буровых работ ТОО «Геобайт-Инфо». В качестве испытуемых, учитывая запроектированный специалистами ТОО «Геобайт-Инфо» диаметр бурения, приняты долота диаметром 215, 9 мм. Одна партия долот была армирована *PDC* диаметром 8 мм, а другая – 13 мм. Бурение проводилось в породах V-VII категории по буримости. Основные породы, слагающие разрез, являлись аргиллиты, диориты, алевролиты.

При проведении экспериментов изучалось влияние диаметра пластин *PDC* на механическую скорость бурения в одинаковых условиях. В процессе бурения фиксировалась механическая скорость бурения.

При бурении долотом, армированным пластинами *PDC* с диаметром 8 мм, средние значения показателя механической скорости бурения составили 16 м/час.

При бурении долотом, армированного пластинами *PDC* с диаметром 13 мм средние значения показателя механической скорости бурения составили 14,75 м/час.

Согласно заключению организации, при работе долота вели себя стабильно, уводок в сторону замечено не было. Во время испытаний долота, армированного пластинами *PDC* с диаметром 13 мм, при неизменной подаче промывочной жидкости приходилось корректировать осевую нагрузку в сторону увеличения за счет образующихся в процессе бурения призабойных сопротивлений, вызванных скоплением шлама.

Технический акт проведения исследований представлен в приложении Б.

Таким образом, подтверждается влияние размера резца *PDC* на результат буровых работ.

4.2 Лабораторные исследования сопротивления среды инструменту, армированного алмазным кристаллом

Для оценки работоспособности буровых коронок армированных крупными синтетическими термостойкими монокристаллами зернистостью 1600/1250 мкм (30 шт/кар) были изготовлены опытные образцы коронок диаметром 59 мм (рис. 4.2, б). Производство коронок осуществлялось с использованием уже имеющегося пуансона (рис. 4.2, а) для ранее разработанных коронок, состоящих из четырех секторов, в каждом из которых содержалось 22 радиальных ряда синтетических алмазных кристаллов [130].



а



б



в



г

Рисунок 4.2 – Испытуемая коронка: а – пуансон; б – опытные образцы; в – фото перед сборкой; г – раскладка алмазов в секторе

Исследования проводились в лабораторных условиях (Донецкого национального технического университета [130]) на буровом станке СКБ-4, промывка обеспечивалась насосом НБЗ-120/40. Перед выполнением работ проведено тарирование системы передачи и регистрации осевого усилия гидросистемой станка динамометром типа ДОСМ-3-3 с классом точности I. Предел измерения динамометра – 3 000 даН. Заданные по дрилometру и полученные значения осевой нагрузки (на динамометре) сравнивались и определялись расхождения этих показателей, что позволило оценить и скорректировать значения осевого усилия.

Механическая скорость бурения определялась косвенным измерением. Частота вращения, подача промывочной жидкости, износ алмаза по высоте определялись прямым измерением методом непосредственной оценки. Время, затраченное на бурение, замерялось вручную механическим секундомером. Углубление определялось по замеру в виде метки.

В связи с ограниченными возможностями экспериментальных работ в лабораторных условиях, бурение осуществлялось в керне большего диаметра, жестко закрепленного в столе станда. В качестве разрушаемой породы выступал песчаник.

Экспериментальное бурение проводилось с учетом рекомендуемых режимов для алмазных однослойных коронок. Цель эксперимента заключалась в исследовании показателя механической скорости бурения коронки при изменении величины осевой нагрузки и частоты вращения в разных соотношениях. Для установления шага изменения в процессе стандового бурения выделенных параметров режима бурения составлен план эксперимента, представленный в таблице 4.1.

Учитывая, что для чистоты проведения эксперимента возникает необходимость изменения всех параметров режима бурения: частоты вращения, подачи промывочной жидкости и осевой нагрузки, эксперимент следует считать трехфакторным.

Таблица 4.1 – План эксперимента

Интервал варьирования и уровень факторов	Факторы		
	Осевая нагрузка P , кН	Число оборотов станка n , мин ⁻¹	Расход промывочной жидкости Q , л/мин
Нулевой уровень $x_i=0$	13	850	40
Интервал варьирования $J_i=0$	7	650	20
Нижний уровень $x_i=-1$	6	200	20
Верхний уровень $x_i=+1$	20	1500	60
Кодовое обозначение	x_1	x_2	x_3

Для проведения трехфакторного двухуровневого эксперимента необходимо количество опытов равное:

$$N=q^k=2^3=8$$

Матрица планирования будет иметь вид представленный в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Матрица планирования [1]

Опыт	x_1	x_2	x_3
1	+	+	+
2	-	+	+
3	+	-	+
4	-	-	+
5	+	+	-
6	-	+	-
7	+	-	-
8	-	-	-

На первых этапах экспериментального бурения подача промывочной жидкости оставалась неизменной, производилось постепенное увеличение осевой нагрузки, потом частоты вращения. На каждом этапе эксперимента фиксировалось значение механической скорости бурения и соответствующее ей значение углубления коронки за оборот.

На начальной стадии проходки величина углубления соответствовало норме, принятой для бурения алмазного однослойного инструмента, и адекватно соответствовало режимам, но со временем, отмечалось падение величины механической скорости бурения. С увеличением проходки степень падения механической скорости бурения увеличивалась. В такой ситуации бурение становилось невозможным в лабораторных условиях и эксперимент приходилось прекращать.

При подъеме колонкового снаряда, в призабойной зоне обнаружено большое количество шлама (рис. 4.3). На сбегаящей части сектора коронки в пространстве между алмазными кристаллами наблюдалось массовое скопление невымытого промывочной жидкостью шлама. При этом, в случаях приложения высоких нагрузок, при визуальном осмотре, внешний вид алмазов сбегаящей части носил изношенный характер в то время как алмазы лидирующих линий резания были не изношены.

Это явление обосновывается постепенным накоплением шлама на сбегаящей, плохо омываемой, части секторов алмазной коронки. Как доказано аналитическим исследованием повышение количества шлама способствует повышению весовой плотности среды и, тем самым спровоцировало снижение показателя механической скорости бурения за счет повышения сопротивления внедрению резцов в породу.



Рисунок 4.3 – Фото результатов экспериментального бурения однослойной алмазной коронкой, армированной крупным монокристаллом (факт наличия шлама)

Полученные результаты экспериментальных исследований косвенно, однако, указывают на наличие выталкивающей силы, образовавшейся на забое среды, степень влияние которой зависит не только от геометрических показателей бурового инструмента, но и от гидродинамических процессов. В совокупности с полученными результатами аналитических расчетов и компьютерного моделирования данные экспериментальные исследования подтверждают влияние сопротивления среды на глубину резания-скалывания горной породы, что отражается на величине механической скорости бурения.

ВЫВОДЫ

На основании проведенных экспериментальных исследований получены следующие выводы:

1. сопротивление среды повышает нагрузку, испытываемую резцов в процессе бурения;
2. наличие среды способствует преждевременному износу алмазного резца;
3. регулирование значений параметров режима бурения и проектирование технологии проведения буровых работ должно учитывать условия формирования жидкой среды, образовавшейся на забое скважины и направлено на снижение степени ее сопротивления.

Таким образом, проведение буровых работ требует аппарата управления режимом бурения, реагирующего на изменения механизма разрушения горной породы и учитывающего факторы, участвующие в формировании силовой системы, воздействующей на резец инструмента. Основываясь на том, что механизм разрушения имеет свойство меняться в каждый период бурения и может быть неоднороден на протяжении всей проходки скважины, аппарат управления должен быть автоматизирован для регулирования параметров бурения в режиме реального времени.

ГЛАВА 5 МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ АЛМАЗНОГО БУРЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА КРИТЕРИЕВ

Разработка бурового инструмента, армированного алмазным материалом, требует изучения множественных факторов, влияющих на эффективность его работы на забое. К таким факторам можно отнести составляющие механизма разрушения горной породы с учётом индивидуальной характеристики вооружения и состояния бурового инструмента. При этом, многочисленные выводы проведенного исследования разрушения горной породы алмазным резцом указывают на то, что не менее важным является режим эксплуатации инструмента с учетом выделенных геологических условий.

Для получения высоких эксплуатационных показателей работы бурового инструмента необходимо осуществлять непрерывный контроль параметров процесса бурения с целью их корректировки и достижения оптимальных условий его использования. Наилучших результатов можно добиться лишь в том случае, если полностью реализован ресурс инструмента при высокой скорости бурения и низких затрат мощности на ее реализацию.

В производственных условиях регулирование работы бурового инструмента возможно путем изменения режимов бурения [30; 33; 46; 50; 66; 86; 115; 126; 138; 141; 143]. Правильный и своевременный выбор соотношения величин частоты вращения, осевой нагрузки и подачи промывочной жидкости, учитывающий состояние забоя, способствует улучшению условий разрушения горной породы и эксплуатационных показателей породоразрушающего инструмента [6; 8; 9; 156; 158]. К тому же, согласно анализу механизма разрушения, следует учитывать то, что различные по твердости горные породы должны подвергаться соответствующему воздействию со стороны инструмента. Так характер разрушения горной породы выступает основополагающим фактором в повышении эффективности бурения.

5.1 Метод комплексного анализа критериев экспериментальных данных алмазного бурения

Одним из методов, позволяющих изучать процесс разрушения горных пород буровым инструментом, является метод полного факторного эксперимента, хорошо зарекомендовавший себя в научных исследованиях различных направлений [1; 94; 95].

В соответствии с технологией, изложенной в работах [1; 94; 95], на основе предложенного метода осуществляется возможность обработки результатов бурения, полученных экспериментальным путем, в результате которой выводятся математические модели и графические интерпретации зависимостей исследуемых параметров.

Обработка экспериментальных данных алмазного бурения в рамках данной методики может осуществляться с использованием двух (осевая нагрузка P и частота вращения ω) или трех (осевая нагрузка, частота вращения и подача промывочной жидкости Q) факторов, влияющих на результирующие показатели. При этом необходимое количество экспериментов определяется по формуле:

$$N_9 = 2^k, \quad (5.1)$$

где k – число влияющих факторов [1; 95].

Метод полного факторного эксперимента позволяет осуществлять оптимизированный анализ данных и получать эмпирические модели процессов с статистически значимыми коэффициентами вида [1; 95]:

$$\begin{aligned} v_6 &= A + B \cdot P + C \cdot \omega + D \cdot Q + E \cdot P \cdot \omega \cdot Q; \\ h_o &= F + H \cdot P + K \cdot \omega + L \cdot Q + M \cdot P \cdot \omega \cdot Q; \\ W &= N/v_6 = S + T \cdot P + X \cdot \omega + Y \cdot Q + Z \cdot P \cdot \omega \cdot Q, \end{aligned} \quad (5.2)$$

где v_6 – механическая скорость бурения; ω – частота вращения породоразрушающего инструмента; P – осевая нагрузка; h_o – углубление за один оборот; $W=N/v_6$ – энергоёмкость процесса разрушения горной породы; N – мощность, потребляемая на разрушение горной породы на забое скважины; $A, B, C, D, E, F, H, K, L, M, S, T, X, Y, Z$ – коэффициенты, полученные по методике полного факторного эксперимента, указывающие на степень взаимного влияния параметров модели.

Совокупный анализ моделей (5.2) позволяет решать задачи поиска наиболее приемлемых значений параметров ориентированных на высокие темпы проходки и высокий ресурс бурового инструмента. Например, имея заданное значение углубления за оборот, выбрав величину осевой нагрузки и частоты вращения, величину подачи промывочной жидкости можно определить как:

$$Q = \frac{h_o - A - B \cdot P_{oc} - C \cdot \omega}{D \cdot P_{oc} \cdot \omega + F}. \quad (5.3)$$

Предложенный метод позволяет осуществлять анализ результатов ряда разнообразных экспериментов, проводить сравнительную характеристику полученных результатов, определять и выделять критерии оптимальности в зависимости от изучаемой системы и условий проведения исследования.

Проведем анализ результатов экспериментального бурения по габбро алмазной однослойной коронкой типа 01А3-59, выполненного на буровом стенде [95; 97] при различных режимах бурения (частоте вращения и осевой нагрузке) с целью определения оптимальных режимов эксплуатации коронки.

Эксперимент реализуется по плану, разработанному согласно представленному методу (план приведен в табл. 5. 1).

В качестве откликов выбраны параметры, значения которых в полной мере характеризуют процесс разрушения горной породы при бурении алмазным инструментом:

- механическая скорость бурения v_6 , м/ч, как показатель буримости и темпа проходки скважины;
 - углубление за один оборот h_6 , мм/об, как показатель эффективности разрушения горной породы;
 - мощность на бурение N , кВт, с целью определения энергоёмкости как $W=N/v_6$, кВт ч/м, в качестве показателя возможного ресурса инструмента.
- При этом забойная мощность N определяется по известной зависимости как:

$$N = M_{кр}\omega, \quad (5.4)$$

где $M_{кр}$ – крутящий момент на буровом инструменте.

В качестве факторов оказывающих непосредственное влияние на процесс бурения приняты осевая нагрузка P и частота вращения ω .

Граничными условиями стали:

- осевая нагрузка $P_{max}=1500$ даН; $P_{min}=600$ даН;
- частота вращения $\omega_{max}=1480$ мин⁻¹; $\omega_{min}=625$ мин⁻¹.

Бурение производилось с промывкой забоя водой при постоянной подаче.

В соответствии с методикой полного факторного эксперимента число достаточных опытов N_9 в пределах каждого отдельного эксперимента определялся как [1]:

$$N_9 = 2^2 = 4.$$

Таблица 5.1 – План эксперимента

№ опыта	Факторы				Отклики			
	B	P	ω	$P\omega$	v_6	N ,	h_0	N/v_6
1	1	-1	-1	1	-	-	-	-
2	1	1	-1	-1	-	-	-	-
3	1	-1	1	-1	-	-	-	-
4	1	1	1	1	-	-	-	-

Полученные результаты эксперимента приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Критерии оптимизации, рассчитанные по данным бурения габбро коронкой 01А3-59 [95]

Частота вращения, ω , мин ⁻¹	Осевая нагрузка, $P_{ос}$, даН	Механическая скорость бурения, v_6 , м/ч	Затраты мощности на бурение, N , кВт	Энергоёмкость разрушения породы, N/v_6 , кВт·ч/м
625	600	3,2	2,8	0,88
	900	5,1	3,8	0,75
	1200	6,2	4,7	0,76
	1500	6,6	6,8	1,03
1 052	600	4,5	3,7	0,82
	900	6,1	5,7	0,93
	1200	6,8	9,5	1,4
	1500	6,1	11,5	1,88
1 480	600	5,8	5,0	0,86
	900	6,9	8,0	1,16
	1200	8,6	12,2	1,42
	1500	8,2	16,1	1,96

В результате обработки данных в соответствии с планом полного факторного эксперимента получены модели, отражающие процесс бурения габбро коронкой 01А3-59:

$$v_6 = 4,78 + 2,63 P + 0,675 \omega + 0,125 P \omega ; \quad (5.4)$$

$$h_0 = 0,085 + 0,049P - 0,024 \omega - 0,0185 P \omega ; \quad (5.5)$$

$$\frac{N}{v_6} = 1,21 + 0,29 P + 0,25 \omega + 0,21 P \omega. \quad (5.6)$$

На основе полученных аналитических моделей (5.4) – (5.6) построим графики (рис. 5.1). Графическая интерпретация моделей (5.4) – (5.6) наглядно представляет зависимости изменения механической скорости бурения v_6 , углубление за один оборот h_0 и энергоёмкости N/v_6 от значений частоты вращения и осевой нагрузки на буровой инструмент.

С целью определения оптимальных параметров эксплуатации коронки 01А3-59 при бурении по габбро, проведем анализ представленных графиков. Целью анализа является выявление рационального значения углубления за один оборот, соответствующее как высокому уровню механической скорости бурения, так и умеренной энергоёмкости разрушения горной породы, а также определение характера взаимного влияния всех основных параметров бурения, действующих на процесс разрушения горных пород.

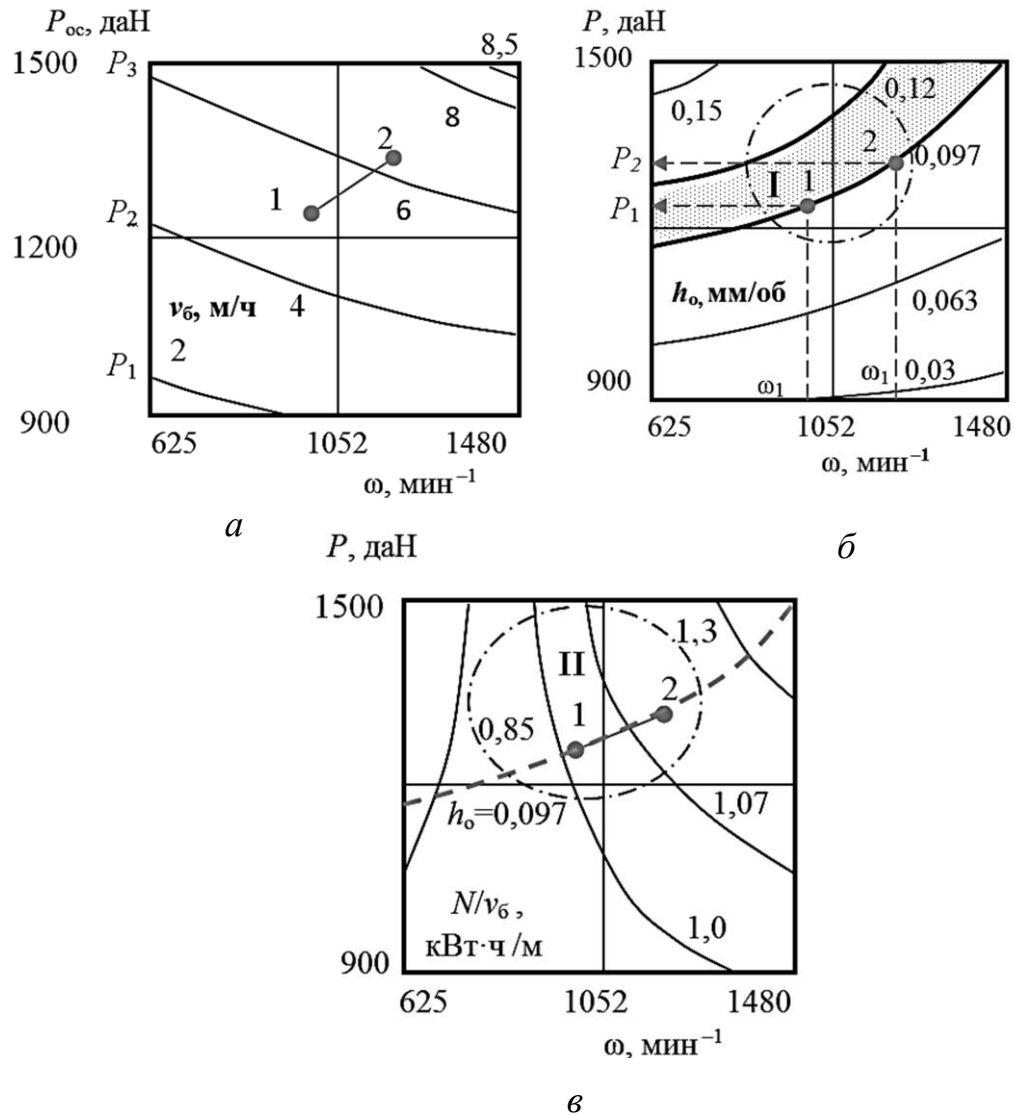


Рисунок 5.1 – Графическая интерпретация зависимости от режимов бурения габбро однослойной алмазной коронки 01А3-59: *а* – механической скорости бурения; *б* – углубления за оборот; *в* – энергоемкости

Для проведенного эксперимента бурения коронкой 01А3-59, в качестве параметра управления процессом бурения зададим такую величину углубления за один оборот, при котором происходит объёмное разрушение породы, но не наблюдается повышенный износ резцов, а энергоёмкость разрушения имеет умеренные значения или тенденцию к снижению.

К примеру, при величине углубления за оборот h_o равного 0,097 мм/об, согласно анализа графика на рисунке 5.1, *б*, при частоте вращения $\omega_1 = 1200$ мин⁻¹ будет необходимо поддерживать осевую нагрузку

$P_1=1270$ даН, а при увеличении частоты вращения, например, для повышения механической скорости бурения, до величины $\omega_1=900$ мин⁻¹ осевая нагрузка должна будет возрасти до $P_2=1350$ даН. В то же время, согласно графику на рисунке 5.1, в, изменение режимов бурения (рост частоты вращения и осевой нагрузки (точки 1 и 2)), приведет к повышению энергоёмкости бурения с 1,02 до 1,1 кВт ч/м, что снизит ресурс инструмента примерно на 7%. Однако, при этом, согласно графику на рисунке 5.1., а, скорость бурения может возрасти с 5 до 6,3 м/ч, т. е. на 20%.

Параметр энергоёмкости разрушения горной породы при бурении (график на рис. 5.1, в) позволяет выбрать интервал варьирования параметрами режима бурения с учётом прогнозируемого ресурса бурового инструмента, поскольку этот параметр находится в строгой зависимости с ресурсными возможностями бурового инструмента. С учётом умеренной энергоёмкости для коронки 01А3-59 определены рациональные значения углубления за один оборот 0,097 и 0,12 мм/оборот и области значений частоты вращения и осевой нагрузки в зоне II (рис. 5.1, в). Значения выбраны как наиболее подходящие для обеспечения значительного ресурса бурового инструмента.

Реализуя представленный способ, осуществляется поиск наиболее рациональных для эффективного разрушения породы параметров режима бурения. А при возможности сбора данных в режиме реального времени, предложенная методика позволяет добиваться быстрого принятия решения с учетом соответствующих условиям взаимодействия режущих элементов бурового инструмента с горной породой. При этом на основе комплексного анализа метод полного факторного эксперимента позволяет определять наиболее оптимальное сочетание параметров критериев оптимизации процесса бурения.

5.2 Оценка процесса разрушения горной породы на основе комплексного анализа критериев

Согласно механизму разрушения горной породы алмазным кристаллом, разнообразное возложения нагрузок на резец влечет за собой изменение характера разрушения породы.

Проведем анализ влияния параметров режима бурения и соответственно величины углубления за оборот на характер разрушения горной породы.

Для определения величины углубления при различных значениях частоты вращения можно использовать известную зависимость:

$$h_o = \frac{v_6}{\omega} \quad (5.7)$$

где v_6 – механическая скорость бурения; ω – частота вращения бурового инструмента.

Используя график, представленный на рисунке 5.1, *а*, пересечением линий механической скорости с вертикальными линиями, которые определяют значения частоты вращения, определим соответствующие данному режиму значения углубления за оборот. Например, для минимальной величины частоты вращения в 625 мин^{-1} (рис. 5.1, *а*) имеем три пересечения с линиями скоростей 2, 4 и 6 м/ч, отсюда можно получить три значения углубления за один оборот равные:

$$h_{o1} = \frac{v_M}{\omega} = \frac{2}{625 \cdot 60} = 0,05 \frac{\text{мм}}{\text{оборот}} ;$$

$$h_{o2} = \frac{v_M}{\omega} = \frac{4}{625 \cdot 60} = 0,1 \frac{\text{мм}}{\text{оборот}} ;$$

$$h_{o3} = \frac{v_M}{\omega} = \frac{6}{625 \cdot 60} = 0,15 \frac{\text{мм}}{\text{оборот}} .$$

Согласно графику, представленного на рисунке 5.1, *a*, полученные значения h_{01} , h_{02} , h_{03} будут реализованы, при осевой нагрузке P соответственно: $P_1 = 950$ даН, $P_2 = 1210$ даН и $P_3 = 1480$ даН.

Аналогично произведем расчет подобной зависимости по данным, полученным из графика на рис. 5.1., *a* при частоте вращения 1052 мин^{-1} (пересечения с осью графика линий со значениями механической скорости бурения 4 и 6 м/ч) и частоты вращения 1480 мин^{-1} (пересечения с линиями механических скоростей 4, 6 и 8 м/ч).

По полученным данным построим графическую зависимость углубления за один оборот коронки на забое от осевой нагрузки при различных значениях частоты вращения коронки (рис. 5.2).

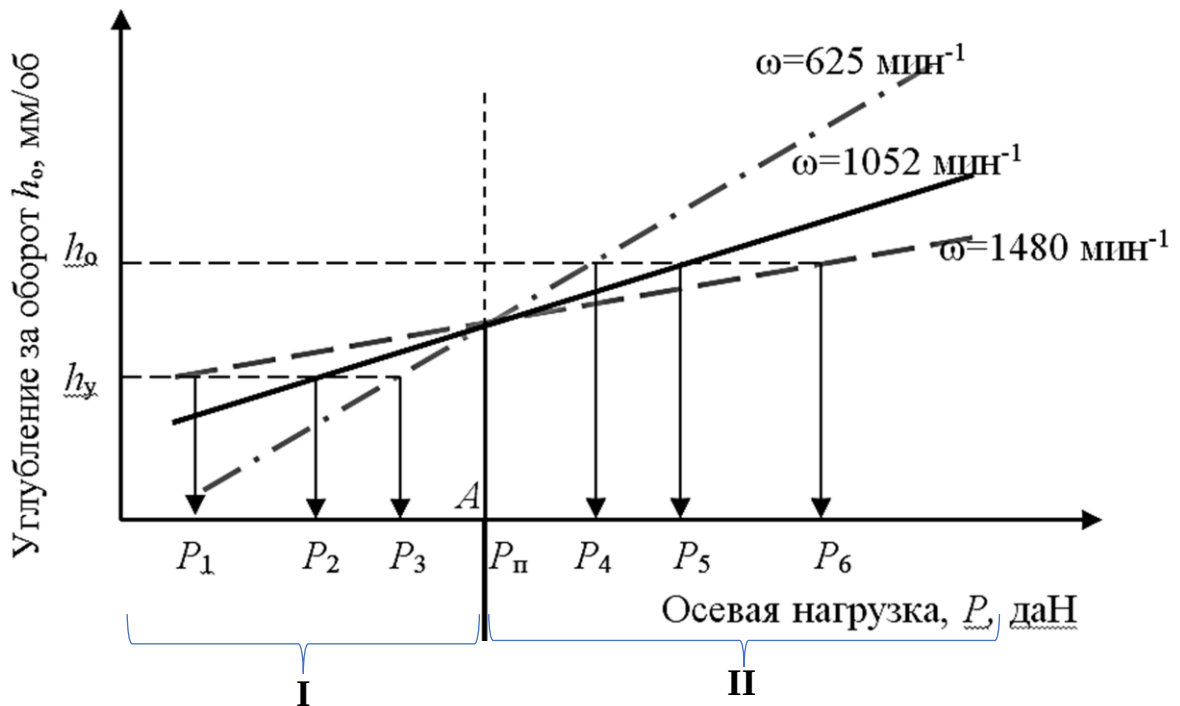


Рисунок 5.2 – График зависимости углубления за оборот от осевой нагрузки

Согласно полученному графику, величина углубления за один оборот возрастает при повышении осевого усилия независимо от частоты вращения коронки.

Графики зависимости углубления за один оборот от осевой нагрузки при различных частотах вращения пересекаются в одной точке, соответствующей значению осевого усилия P_n , рис. 5.2. Поэтому представленную графическую интерпретацию можно разделить на две части и выделить участок I и II (рис. 5.2).

На участке I наибольшие значения углубления за один оборот h_y достигаются на более высоких частотах вращения бурового инструмента, а по мере снижения частоты вращения, для достижения тех же значений h_y необходимы более высокие осевые нагрузки (это показатели P_1, P_2, P_3 – рис. 5.2). Такая зависимость параметров бурения объясняется реализацией усталостно-поверхностного разрушения, когда осевая нагрузка недостаточна для объемного разрушения породы. В этом случае процесс снижения прочности и твердости породы происходит вследствие циклически повторяющихся нагружений породы резцами, а также образования и развития многочисленных трещин в породе. Поэтому этот режим разрушения будет более интенсивным в случае более высокой частоты вращения коронки.

При достижении величины осевой нагрузки определенного значения (P_n , рис. 5.2) режим разрушения становится объемным, поскольку нарастающая осевая нагрузка уже оказывается достаточной для внедрения резца в породу. На участке II графика, представленного на рисунке 5.2, наибольшее углубление за один оборот достигается уже при меньшей частоте вращения. Следует отметить, что здесь по мере роста частоты вращения углубление за один оборот снижается. Это можно объяснить следующим образом. При образовании борозды разрушения порода скалывается перед резцом по некоторой поверхности в направлении забоя. Как известно, оптимальными будут условия разрушения породы, при

которых скорость перемещения резца равна скорости образования трещины отрыва породы в направлении от ядра сжатия к поверхности забоя [90; 94]. По мере повышения частоты вращения скорость образования трещины отрыва породы перед резцом начинает отставать от скорости перемещения резца. Сопротивление не успевшей разрушиться породы перед резцом растет. Резец, испытывая повышенную сопротивляемость перемещению, начинает менять траекторию движения в направлении поверхности забоя и глубина его внедрения в породу снижается. Изменение траектории в направлении поверхности забоя резца происходит до тех пор, пока напряжения в ядре сжатия породы не будут достаточны для эффективного скалывания породы передней гранью резца под действием касательных и растягивающих напряжений.

В изучаемом случае для породы габбро оптимальным является объемное разрушение породы. Поэтому, именно такие условия, соответствующие участку II могут соответствовать максимально эффективному процессу разрушения габбро коронкой 01A3-59, при котором достигается минимальная энергоёмкость разрушения породы при бурении, а значит и высокий ресурс бурового инструмента.

Таким образом, механизм разрушения горной породы при бурении одной и той же коронкой может протекать не одинаково. А по виду влияния частоты вращения на углубление за оборот можно судить о характере разрушения горной породы на забое скважины при бурении и осуществлять выбор наиболее приемлемых для данных геологических условий режимов работы алмазного бурового инструмента.

Рассмотрим подробнее аналитическую интерпретацию усталостно-поверхностного и объемного разрушения.

На рисунках 5.3. и 5.4. представлены графики зависимости углубления за оборот бурового инструмента от осевого усилия и от частоты вращения, соответствующие картине усталостно-поверхностного (рис. 5.3.) и объемного (рис. 5.4.) разрушения.

Анализ приведенных графиков показывает, что линии, отражающие изменение углубления за оборот могут располагаться совершенно по-разному. Отмечается противоположность направления наклона линий графиков, представленных на рис. 5.3. и 5.4., что, согласно ранее проведенному аналитическому исследованию данных, представленных на рис. 5.2, и указывает на различный механизм разрушения горной породы.

При этом угол наклона линий графика углубления за один оборот бурового инструмента от частоты вращения (β , рис. 5.3, б и 5.4, б) соответствует степени сопротивления горной породы и среды внедрению алмазного резца в забой.

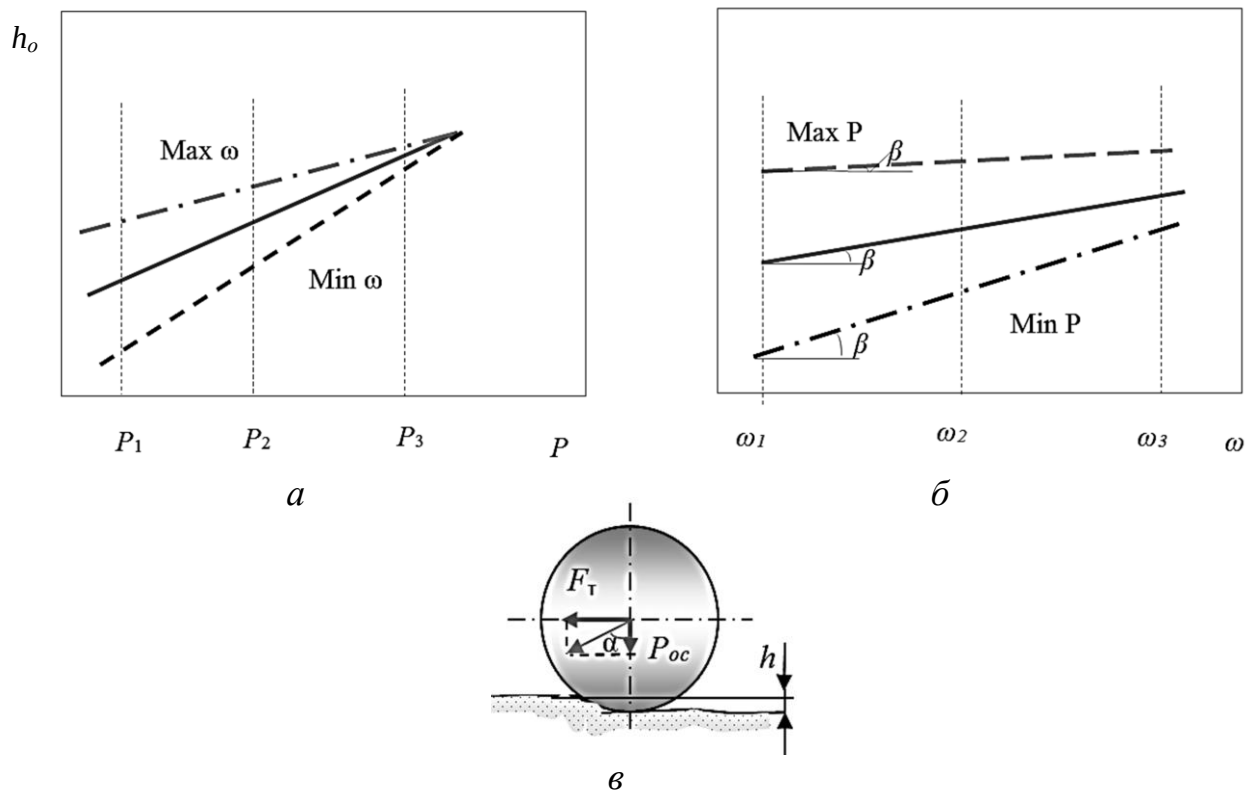


Рисунок 5. 3 – Интерпретация реализации усталостно-поверхностного разрушения: *а* – зависимость углубления за оборот бурового инструмента от осевого усилия; *б* – зависимость углубления за один оборот бурового инструмента от частоты вращения; *в* – схема механизма разрушения

Сравнительный анализ сил сопротивления, приведенный в главе 2, и графиков, представленных на рис. 5.1, указывает на связь значений углов β и

α , где α – угол между вертикалью и результирующей осевой (P) и тангенциальной (F) усилий на алмазный резец, возникающих в процессе бурения согласно схеме механизма разрушения породы алмазным резцом (рис. 5.3, в и 5.4, в).

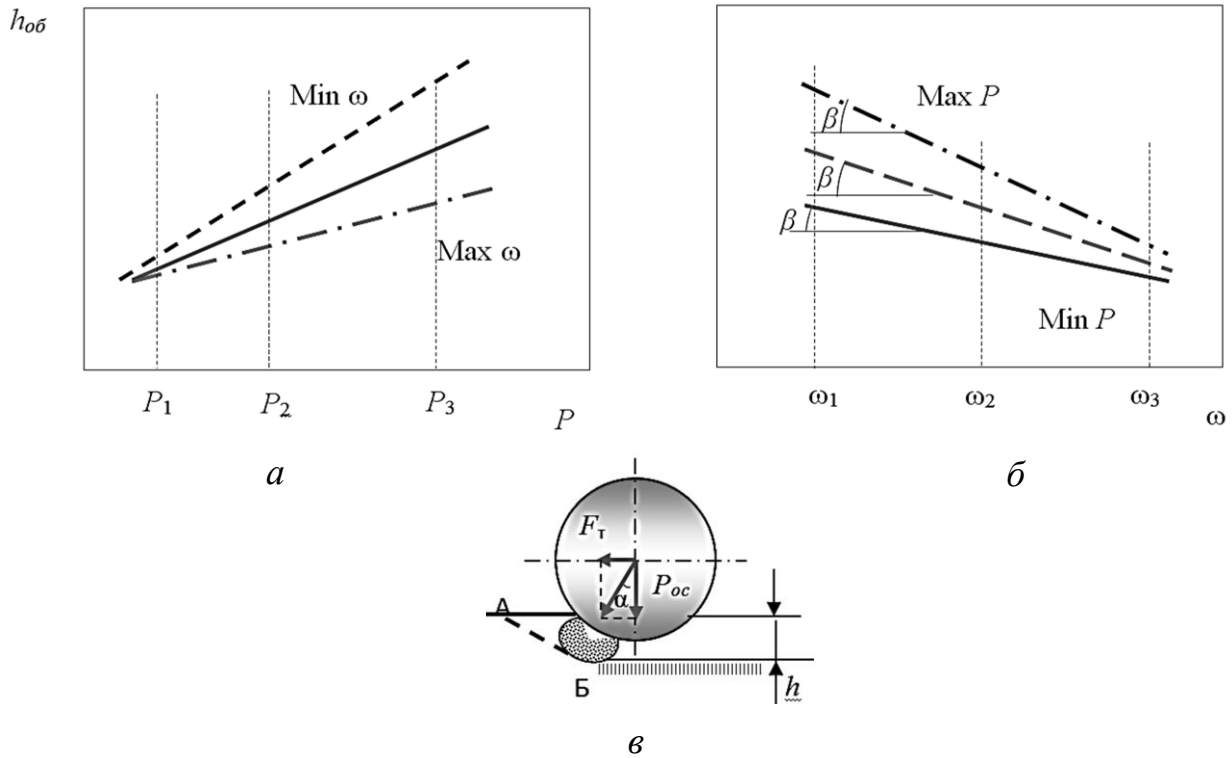


Рисунок 5.4 – Интерпретация реализации объемного разрушения: *а* – график зависимости углубления за оборот от осевой нагрузки; *б* – график зависимости углубления за оборот от частоты вращения бурового инструмента; *в* – схема механизма разрушения

Согласно проведенному анализу схемы механизма разрушения, при повышении сопротивления резанию-скалыванию происходит рост усилия F и угол α увеличивается. Это произойдет в случае повышения частоты вращения бурового инструмента. В то же время, согласно представленному анализу зависимости углубления за оборот от частоты вращения бурового инструмента (рис. 5.3, б и 5.4, б), при повышении частоты вращения возрастет и угол β . А вот при повышении осевой нагрузки эти углы уменьшаются, хотя при этом увеличивается значение величины глубины

внедрения алмазного резца в породу. Таким образом, углы β и α имеют одну и ту же природу, а значит, измеренный на графиках рис. 5.3, б и 5.4, б угол β может оцениваться как угол, тангенс которого эквивалентен коэффициенту сопротивления резания-скалывания-раздавливания горной породы резцом.

Таким образом, согласно выражению (2.78), в данном случае $\operatorname{tg} \beta$ выступает величиной, отражающей коэффициент сопротивления (μ_k), который характеризует комплексный показатель сопротивления при разрушении горной породы тем или иным буровым инструментом.

Согласно ряду проведенных экспериментов, в случае изменения условий бурения (износился инструмент, изменились свойства горной породы и т.д.), на практике график зависимости углубления за оборот от частоты вращения имеет вид кривой (рис. 5.5).

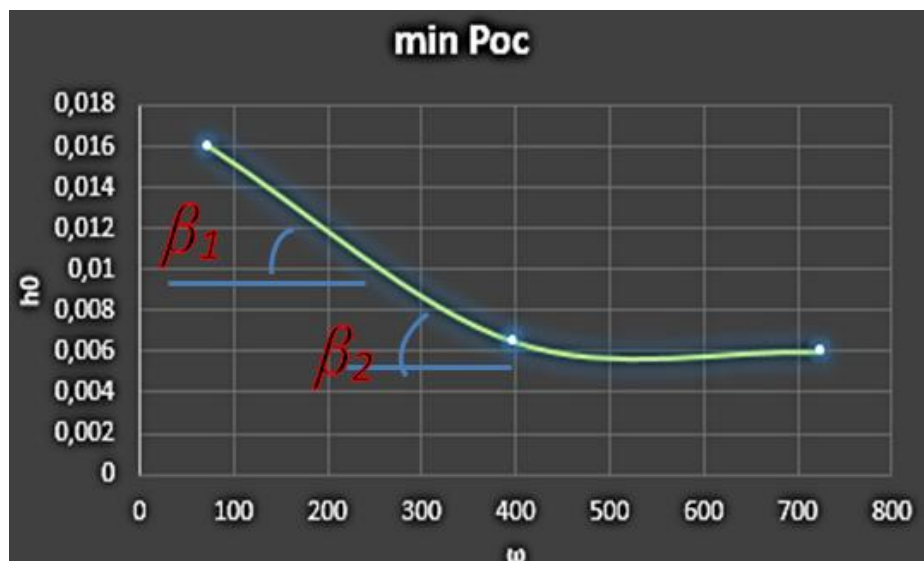


Рисунок 5.5 – Графическая интерпретация зависимости углубления за оборот от частоты вращения при минимальной осевой нагрузке (результаты обработки данных экспериментального бурения однослойной коронкой): h_0 – углубление за оборот; ω – частота вращения; $P_{ос}$ – осевая нагрузка на буровой инструмент

Анализ графика в виде кривой показывает, что угол β на разных участках графика имеет различную величину. При этом очевидно, что уменьшение угла β свидетельствует о падении углубления за оборот, что, происходит при повышении частоты вращения. В то же время, при максимальных значениях частоты вращения (от 400 мин⁻¹ и выше, рис. 5.5) угол неизменен и равен нулю, что указывает на отсутствие углубления. Из чего можно сделать вывод о рациональности представленного бурения на пониженных частотах вращения.

Полученные модели (5.2) и графики (рис. 5.1, 5.2 и 5.5) позволяют осуществлять рациональное управление параметрами режима бурения. Таким образом, рассмотренный метод обработки и анализа результатов бурения, выстроенный как алгоритм поиска оптимальных условий по трем основным критериям бурения, позволяет определить по косвенным признакам режим разрушения горной породы на забое скважины и выбрать оптимальные значения параметров режима бурения, которые соответствуют наиболее выгодным условиям разрушения горной породы.

5.3 Разработка алгоритма управления алмазным бурением

Учитывая возможности представленной методики обработки данных, появляется перспектива повышения ресурса бурового инструмента путем оптимизации режима его эксплуатации. Наиболее рациональным считается режим эксплуатации инструмента, при котором достигаются максимально возможные скорости бурения при минимально допустимых значениях износа инструмента и затратах мощности.

Критерием для определения оптимальной механической скорости бурения при рациональной эксплуатации инструмента выступает показатель *RPI*, предоставляемый производителем алмазного породоразрушающего

инструмента, или значение углубления скважины за один оборот (h_o), являющееся величиной обратной RPI :

$$RPI = \frac{1}{h_o}. \quad (5.8)$$

Как правило, показатель RPI фиксируется для конкретного типа бурового инструмента в виде рекомендуемого интервала значений, поэтому и оптимальное значение величины углубления за оборот может колебаться в определенных пределах (от h_{max} до h_{min}).

Рассмотрим особенности технологии бурения алмазным породоразрушающим инструментом (графически отображена на рисунке 5.6). После приработки алмазной коронки на пониженных показателях частоты вращения и осевой нагрузки ($P \downarrow \omega \downarrow$), устанавливается режим постоянной механической скорости бурения (v_m) (линия 1–2, рис. 5.6).

Учитывая, что механическая скорость бурения является произведением углубления ($h_{об}$) на частоту вращения (ω):

$$v_m = h_{об} \cdot \omega, \quad (5.9)$$

имея интервал оптимальных значений $h_{об} = h_{max} \dots h_{min}$, для достижения наилучшего результата, величина постоянной механической скорости бурения (v_m) определяется по наибольшему из предложенных значений углубления за оборот – h_{max} . Для достижения заданных технологических условий подбираются такие показатели режимов бурения (P, ω), при которых обеспечена реализация принятой величины h_{max} .

Осевая нагрузка должна быть достаточной для внедрения резца в породу, но не превышать предел прочности бурового инструмента. В случае чрезмерного увеличения частоты вращения (ω) при неизменной осевой нагрузке (P), сопротивление породы внедрению инструмента начнет расти, в следствии чего глубина внедрения резца в породу снизится, что отразится на значениях углубления за оборот и механической скорости бурения. Если увеличить осевую нагрузку ($P \uparrow$) не изменяя значения частоты вращения,

значительно повысится мощность, затрачиваемая на разрушение горной породы ($N \uparrow$), при этом, учитывая особенности механизма разрушения горной породы алмазным резцом, механическая скорость бурения не возрастет. Показатель мощности ограничен техническими возможностями оборудования и отражается на себестоимости буровых работ, любое повышение данного параметра нежелательно и влечет за собой ухудшение технико-экономических результатов. Поэтому, в данной ситуации следует повысить осевую нагрузку ($P \uparrow$) и снизить частоту вращения ($\omega \downarrow$), что обеспечит более высокий уровень механической скорости бурения ($v_m \uparrow$) при незначительных изменениях мощности. По данной схеме, на протяжении всего процесса бурения, в зависимости от изменения условий, осуществляется регулирование режимов бурения с целью непрерывного поддержания величины углубления за оборот в пределах выбранного значения h_{max} , т.е. $P\omega(f(h_{max}))$ (линия 1–2, рис. 5.6).

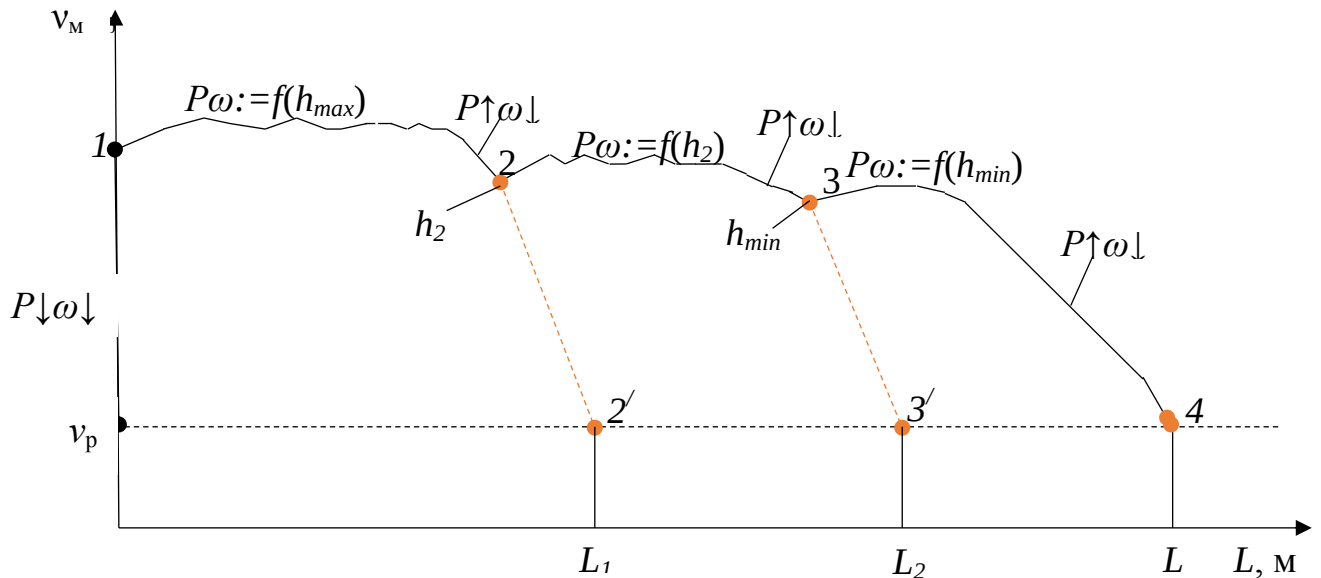


Рисунок 5.6 – Графическая интерпретация технологии процесса алмазного бурения

Однако, такой механизм управления рационален при неизношенном состоянии породоразрушающего инструмента. Со временем инструмент изнашивается и предложенный способ регулирования режимов бурения не приносит требуемых результатов, механическая скорость начинает неизменно падать ($v_m \downarrow$) (линия 2–2', рис. 5.6). При достижении механической скорости бурения значения равного рейсовой скорости (v_p) алмазную коронку необходимо изымать, ресурс ее считается исчерпанным [95]. В этом случае размер проходки коронки составит L_1 (рис. 5.6). Ситуацию можно изменить, уменьшив величину критерия оптимизации – углубления за оборот, так, чтобы ее значение не выходило за пределы рекомендуемого производителем инструмента интервала – $h_{об} = h_2$, если $h_{max} < h_2 < h_{min}$. Таким образом, задав значение углубления за оборот, равное h_2 (в точке 2, рис. 5.6), можно остановить снижение скорости бурения, подобрав, соответствующие заданным условиям, режимы бурения (ω , P). Далее (по линии 2–3, рис. 4.6), придерживаясь вышеописанного механизма управления процессом, бурение осуществляется до тех пор, пока способность реализации заданного углубления не будет исчерпана, что произойдет с повышением уровня износа инструмента (точка 3, рис. 5.6). Механическая скорость снова приобретет тенденцию к снижению (линия 3–3', рис. 5.6). Предотвратить в данном случае падение скорости бурения будет возможно уменьшением в очередной раз величины критерия углубления, к примеру, до h_{min} . Таким образом, по мере износа инструмента, снижая значение критерия оптимизации ($h_{об}$), осуществимо увеличение его ресурса (проходка увеличится до L_3 , рис. 5.6).

Итак, для качественного управления системой алмазного бурения необходимо выделить критерий оптимизации, который должен быть задан в виде интервала оптимальных значений и иметь возможность изменяться в процессе бурения. Принимая в качестве такого параметра величину углубления за оборот, осуществимо управление механической скоростью бурения с учетом ресурса породоразрушающего инструмента.

Помимо этого, для обеспечения рациональности проведения работ, необходимой процедурой также является регистрация и манипулирование величиной мощности, затрачиваемой на разрушение горных пород. В таком случае реализуется управление алмазным бурением на основе комплексной оценки оптимальности протекающих процессов.

Оптимальным считается бурение, энергоемкость (W) которого стремится к минимуму. Учитывая, что данная величина определяется как отношение мощности к механической скорости бурения ($W = \frac{N}{v_m}$), следовательно, для понижения энергоемкости процесса необходимо обеспечение максимальной скорости бурения при минимальных затратах мощности.

Реализация предложенной методики целесообразно путем применения технологий компьютерного программирования, в алгоритм которого должны быть заложены описанные циклы управления.

Схематично регулирование алмазным бурением можно представить в виде рисунка 5.7. Вводными являются параметры, фиксируемые датчиками, расположенными на забое скважины. Показатели частоты вращения (ω) и осевой нагрузки (P) в виде импульса передаются на поверхность, где воспринимаются персональным компьютером (ПК) и преобразуются в соответствующие числовые значения. Для описания условий, ограничивающих ресурс инструмента, вводится интервал изменения оптимальных значений углубления за оборот ($h_{об}$), выбранных по показателю RPI используемого инструмента, и фиксированное значение рейсовой скорости (v_p). Непрерывно получая информацию о характере режима бурения на забое, программа проводит анализ возможных изменений механической скорости бурения (v_m) и мощности (N), затрачиваемой на разрушение забоя. Имея конкретные значения частоты вращения и осевой нагрузки путем математических вычислений в каждый момент времени определяется

значение механической скорости (по формуле (5.9)) и мощности (по формуле:

$$N = P \cdot \omega \cdot R \cdot \mu / 97,5 , \quad (5.9)$$

где R – радиус торца бурового инструмента и μ – коэффициент сопротивления породы вращению бурового инструмента, заранее заданы как константы процесса).

Полученные результаты сравниваются с аналогично определенными в предыдущий период времени. Если показатель механической скорости бурения в данный момент времени (v_i) больше, чем в предыдущий период (v_{i-1}), следовательно, механическая скорость растет ($v_i > v_{i-1} \rightarrow v_m \uparrow$). Если значение мощности в данный момент времени (N_i) меньше чем в предыдущий (N_{i-1}), делается вывод о том, что затраты мощности снижаются ($N_i < N_{i-1} \rightarrow N \downarrow$) и так далее.

В момент, когда оказывается, что механическая скорость падает ($v_m \downarrow$), а мощность растет ($N \uparrow$), отдается команда о снижении частоты вращения ($\omega \downarrow$) и повышении осевой нагрузки ($P \uparrow$). В период роста и механической скорости бурения ($v_m \uparrow$) и мощности ($N \uparrow$) отдается команда о снижении осевой нагрузки ($P \downarrow$) и повышении частоты вращения ($\omega \uparrow$). Если механическая скорость растет ($v_m \uparrow$), а мощность падает ($N \downarrow$) – о снижении осевой нагрузки ($P \downarrow$) и повышении частоты вращения ($\omega \uparrow$). В случае если многочисленные преобразования не привели к должному результату, программой отдается команда о снижении критерия оптимизации – значения углубления за оборот ($h_{об} \downarrow$) и цикл повторяется (рис. 5.7).

Основой управления по предложенному алгоритму является достижение комплексного результата: максимально высокого ресурса инструмента при высоких, но не предельных, значениях механической скорости проходки.

Режим управления процессом бурения должен выстраиваться с использованием имеющихся возможностей вследствие широкого применения компьютерных технологий и современных высокотехнологичных забойных телеметрических систем, позволяющих вести процесс бурения, регулируя ключевые параметры управления, в режиме реального времени, фиксируя и обрабатывая поступающие выходные данные:

- осевую нагрузку на забой, частоту вращения бурового инструмента, крутящий момент и забойную мощность;
- параметры вибрации бурового инструмента;
- механическую скорость бурения v_6 ;
- углубление инструмента за один оборот вращения на забое h_0 ;
- энергоёмкость процесса разрушения горной породы.

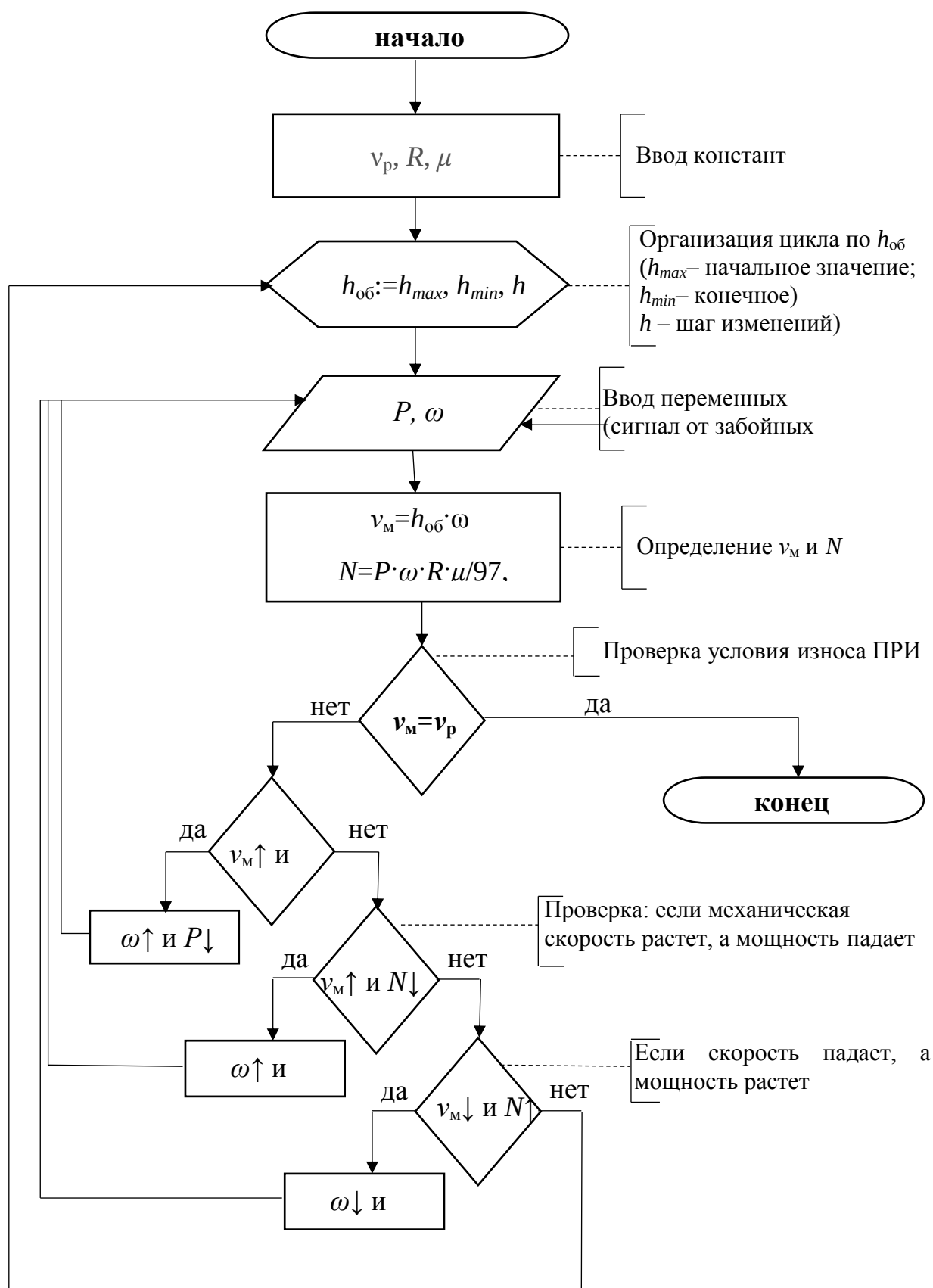


Рисунок 5.7 – Схема алгоритма управления алмазным бурением

Автоматизация предложенного алгоритма управления возможна путем использования различных языков программирования, обладающих поддержкой различных устройств, совместимых с другими программами и компатибельны с датчиками всевозможных типов, что важно при решении поставленной задачи.

ВЫВОДЫ

На основании проведенного исследования получены следующие основные результаты и сделаны выводы:

1. по характеру влияния частоты вращения на углубление за оборот можно судить об особенностях механизма разрушения горной породы;
2. объективный анализ процесса разрушения горных пород при бурении и выбор оптимальных параметров управления процессом бурения возможен на основе комплексного анализа таких критериев как механическая скорость бурения, углубление за один оборот вращения бурового инструмента на забое скважины и энергоёмкость разрушения горной породы при бурении;
3. технические возможности современного бурения позволяют определять в процессе проходки необходимые для анализа параметры в режиме текущего времени (*on line*) при использовании современных забойных телеметрических систем, а также возможности компьютерных техники и технологий, с помощью которых анализ полученных с забоя параметров может в действующем режиме текущего времени преобразовывать и анализироваться с целью получения алгоритма управления процессом бурения;
4. в качестве метода аналитического исследования параметров и анализа процесса бурения может использоваться метод полного факторного эксперимента, который с высокой точностью позволяет получить аналитические модели и провести их геометрическую интерпретацию,

определяя по косвенным признакам как механизм разрушения горной породы, так и области наиболее эффективных значений параметров бурения с целью выявления, при определённых заданных параметрах, рациональные соотношения значений частоты вращения инструмента, осевой нагрузки и количества подаваемой в скважину буровой жидкости;

5. графический анализ результатов метода полного факторного эксперимента позволяет производить наблюдения изменений показателя сопротивления;

6. на объёмный характер разрушения породы указывает рост сил сопротивления при повышении линейных скоростей резания-скалывания;

7. снижение коэффициента сопротивления при росте значения механической скорости бурения указывает на усталостно-поверхностный характер разрушения породы;

8. в качестве основного параметра управления процессом бурения может применяться заданное значение углубления скважины за один оборот вращения бурового инструмента на забое при установленных значениях энергоёмкости разрушения горной породы при бурении в определённой, на основании проанализированных данных, области объёмного разрушения горной породы.

Таким образом, основой получения высоких показателей ресурса и производительности алмазного бурового инструмента выступает автоматизированное управление его эксплуатацией, учитывающее динамические явления при разрушении горных пород, а также комплексную оценку процесса по таким параметрам как механическая скорость бурения, энергоёмкость разрушения горной породы при бурении и величина углубления бурового инструмента за один оборот.

ГЛАВА 6 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ ВЫСОКОРЕСУРСНОГО АЛМАЗНОГО БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА

Особенности расположения алмазного резца в инструменте, характер его взаимодействия с горной породой; особенности возникающей в процессе бурения системы разнонаправленных сил, действующей на резец; переменные динамические нагрузки – все это в совокупности приводит к неравномерному износу режущей поверхности резца, что в свою очередь влечет изменение механизма разрушения горной породы и снижение ресурса бурового инструмента.

Таким образом повышения ресурса бурового инструмента можно достичь путем равномерного распределения нагрузки на всю режущую поверхность резца, гашения посторонних динамических колебаний и снижения степени влияния среды.

6.1 Разработка конструкций однослойного алмазного инструмента

На основании выводов, сделанных по результатам проведенных аналитических исследований (глава 2) и компьютерного моделирования (глава 3), с целью снижения сопротивления среды за счет улучшенной очистки и уменьшения скопления шлама на режущей поверхности инструмента, разработана серия чертежей конструкций алмазных однослойных коронок с укороченным сектором. Разработка осуществлялась на базе геометрии существующих конструкций серийно выпускаемых однослойных коронок. Конструкция корпуса сохранялась неизменной, модернизации подверглась матрица коронки. При проектировании за основу был принят принцип уменьшения количества радиальных рядов алмазных резцов в секторе коронки с сохранением общей площади рабочей поверхности, равной аналогичному параметру известных однослойных

алмазных коронок, прошедших производственное внедрение с положительными результатами, например АКВ, БС23, БС01.

Добиться выполнения выше изложенных рекомендации получилось за счет увеличения количества промывочных окон и уменьшения при этом длины секторов коронки. Некоторые чертежи торцевой части разработанных конструкций представлены на рисунке 6.1.

По полученным чертежам созданы модели коронок и проведено всестороннее моделирование их работы (примеры представлены в главе 3). Результаты моделирования показали, что коронки с четырьмя-двумя радиальными рядами в секторе лучше омываются (охлаждаются, очищаются) промывочной жидкостью, имеют равномерное распределение нагрузки на алмазы коронки и таким образом обладают запасом прочности.

Основываясь на проведенном анализе результатов моделирования, учитывая максимально возможную площадь рабочей поверхности коронки при наибольшем количестве промывочных окон, в качестве оптимальной принята конструкция однослойной алмазной коронки, армированная крупными синтетическими алмазами (диаметром 1,5-2 мм [61-65; 130; 133]) и обладающая укороченным сектором, состоящим не более чем из 4 радиальных рядов резцов.

Исходя из технических возможностей производственного цеха, в Институте сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля был изготовлен опытный образец однослойной алмазной коронки диаметром 93 мм, армированной синтетическими алмазными монокристаллами зернистостью 1,6/1,25 мм. Сборочный чертеж конструкции приведен на рисунке 6.2. Фото образца приведено на рисунке 6.3.

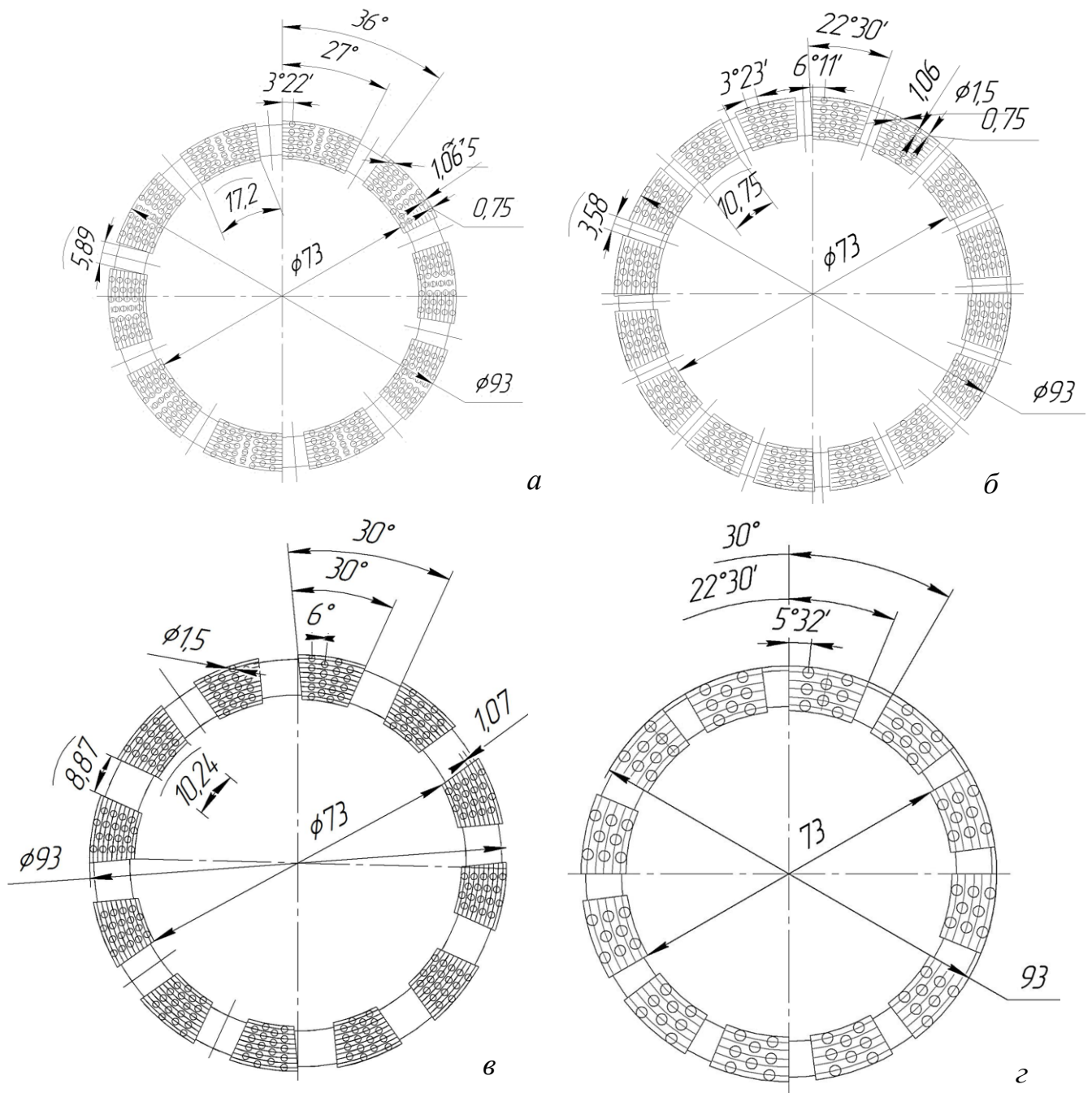


Рисунок 6.1 – Конструкции алмазной однослойной коронки с укороченным сектором: *а* – с 7 радиальными рядами в секторе; *б* – с 4 радиальными рядами в секторе (16 секторов); *в* – с 4 радиальными рядами в секторе (12 секторов); *г* – с 3 радиальными рядами в секторе.

Рисунок 6.2 – Сборочный чертеж коронки БСО-1



Рисунок 6.3 – Фото опытного образца коронки БСО-1

Длина сектора выбиралась исходя из прочностных показателей материала секторов коронки и возможности расположения алмазных резцов по правилам радиальной раскладки [133]. Сплав матрицы коронки (ВК6+медь) и корпус приняты как для серийно выпускаемых коронок, хорошо зарекомендовавших себя при возложении высоких значений параметров режима бурения.

Коронка присвоено название БСО-1. Рабочая часть ее состоит из двенадцати секторов, разделенных прямыми промывочными окнами длиной 8 мм, с четырьмя радиальными рядами алмазов в каждом, что технологически облегчает ее изготовление (рис. 6.3).

Выпуск алмазов составлял 30% от диаметра алмазов. Раскладка осуществлялась по схеме, разработанной на основании результатов ранее проведенных исследований [133]: алмазы первого и последнего радиальных рядов сектора находятся на разных линиях резания.

6.1.1 Производственные испытания опытного образца однослойной алмазной коронки с укороченным сектором

С целью определения работоспособности опытные образцы разработанной коронки БСО-1 диаметром 93 мм испытывались на объектах государственного геологоразведочного предприятия (ГГП) «Донецкгеология» (г. Артемовск, Донецкая обл., Украина). Испытания проводились при бурении скважин установкой УКБ-4С (техническая характеристика приведена в таблице 6.1). В комплект установки входили: буровой станок СКБ-4, буровой насос НБЗ-120/40, трубооборот РТ-1200 и транспортная база «Урал-4320». Фото с места испытания приведена на рисунке 6.4.

Бурение геологоразведочных скважин проводилось с целью отбора керновых проб угля, осуществлялось в породах от VII до IX категории по буримости (основные слагающие разрез породы – песчаники и известняки) с

использованием одинарного колонкового снаряда.



Рисунок 6.4 – Производственные испытания опытного образца коронки БСО-1

Согласно геолого-техническому проекту, разработанного специалистами горно-геологического предприятия «Донецкгеология», бурение коронкой БСО-1 осуществлялось на следующих режимах: частота вращения 435 мин^{-1} ; осевая нагрузка 12 кН; подача промывочной жидкости 60 л/мин. Всего на объекте было пробурено 12 скважин, 6 из которых – серийно выпускаемой алмазной однослойной коронкой 01А3 и 6 – опытным образцом БСО-1. Коронка 01А3 (ТУ 2-037-79-88Е) диаметром 93 мм производства ООО Техно-Алмаз (Россия), предназначенная для бурения геологоразведочных скважин одинарными колонковыми трубами в малоабразивных, монолитных и трещиноватых породах VII-IX категории, в качестве сравнительной была выбрана как утвержденная по ГТП ГПП «Донецкгеология».

Акт производственного внедрения приведен в приложении В.

Результаты сравнительных испытаний коронок БСО-1 и 01А3 приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты испытаний коронок типа БСО-1 и 01А3

Тип коронки	Количество, шт.	Средние показатели бурения	
		Механическая скорость, м/ч	Проходка на коронку, м
БСО-1	5	2,5	15,4
01А3	5	1,5	9,4

Результаты испытаний показали, что при прочих равных условиях, по сравнению с серийно выпускаемой коронкой 01А3 коронка БСО-1 обеспечила повышение механической скорости бурения в 1,67 раза. Проходка на коронку также увеличилась в 1,64 раза. Что подтверждает результаты аналитических исследований и компьютерного моделирования.

Алмазная однослойная коронка такой конструкции в процессе производственных испытаний зарекомендовала себя положительно. Бурение по породам V-VIII с пропластками до IX категории по буримости коронкой БСО-1 одинарным колонковым снарядом обеспечило высокую механическую скорость бурения, проходку на коронку, при этом отмечено хорошее качество выхода керна.

6.2 Разработка бурового инструмента с вооружением повышенной динамизации рабочих элементов

Стандартный резец *PDC* обладает цилиндрической формой. Как правило, такой резец фиксируется в буровом инструменте так, что его режущая поверхность выступает из тела инструмента и взаимодействует с разрушаемой породой сегментарно. Режущая поверхность резца нагружена

неравномерно, поэтому в процессе бурения *PDC* изнашивается в основном только в области нижней режущей кромки, обращенной к забою, при этом остальная часть режущей поверхности может оставаться неизменной (рис. 6.5).

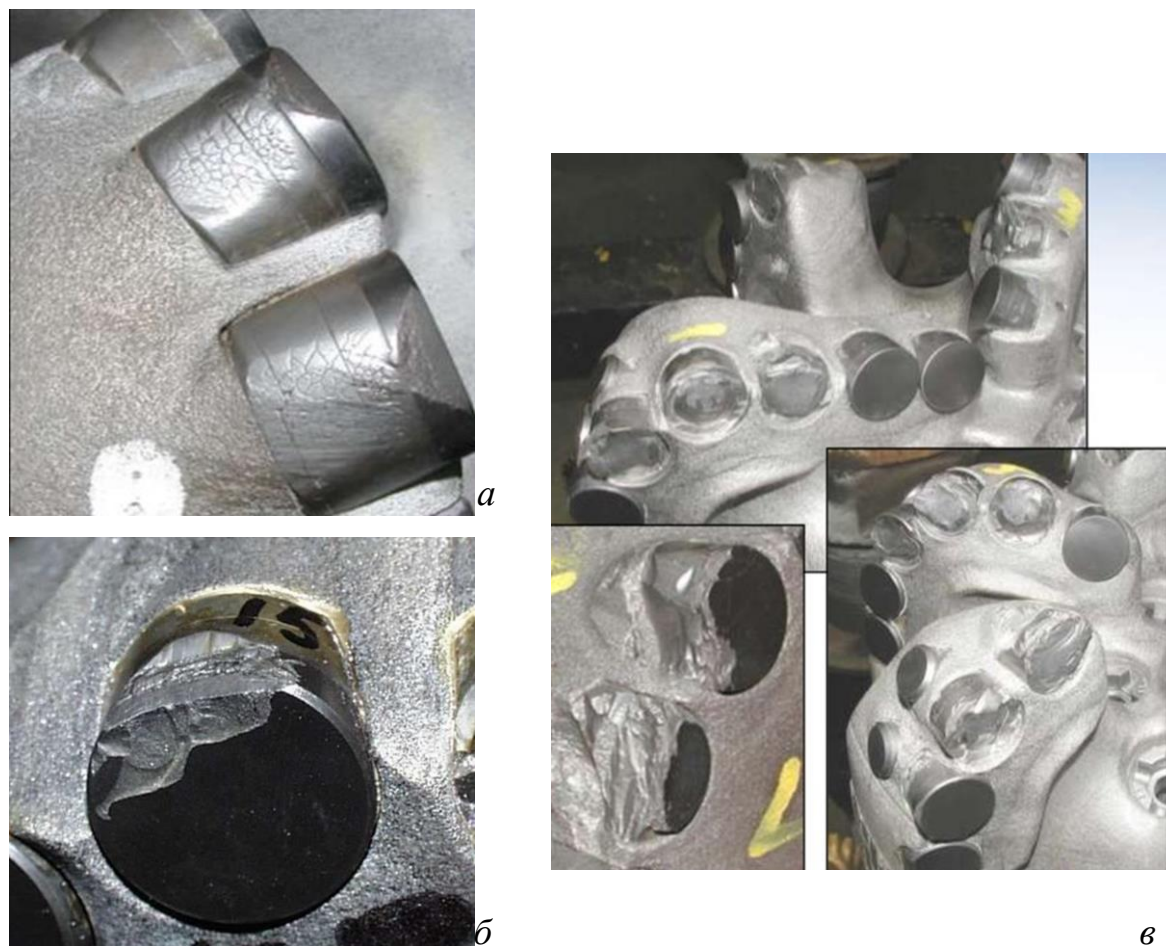


Рисунок 6.5 – Возможный износ резцов *PDC*: *а, б* – единичных резцов; *в* – по поверхности инструмента

По данным компании *Smith Bits*, более 60 % долот типа *PDC* выходят из строя именно из-за износа и сколов нижней кромки резцов. При этом на рабочей поверхности отработанных долот могут сохраняться абсолютно неизношенные резцы [136].

С целью повышения ресурса бурового инструмента компания *Smith Bits* предложила армировать буровой инструмент вращающимися вокруг своей оси резцами *PDC*. Такой конструкции способствует форма

используемого алмазного резца. Вращаясь вокруг своей оси, резцы оголяют неизношенную часть режущей поверхности и тем самым способствуют равномерному износу ее кромки, постепенно перемещая нагрузку по окружности режущей части *PDC*.

Сравнительные испытания резцов *ONYX* на износ (рис. 6.7) показали, что в сравнении с фиксированными резцами аналогичной формы и размеров они существенно повышают возможности эффективной работы по разрушению горной породы.

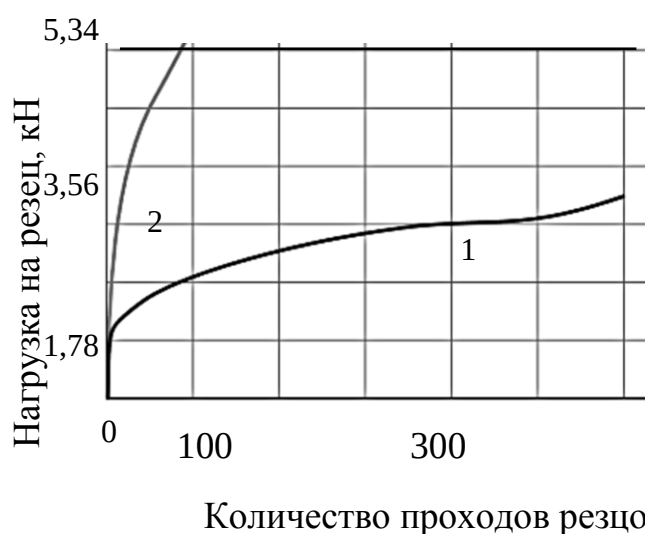


Рисунок 6.7 – Опытные данные: 1 – износостойкость резцов *ONYX*; 2 – износостойкость фиксированных резцов *PDC* [87]

Учитывая перспективность использования резцов *ONYX*, а также в результате исследований всесторонней возможности работы вращающихся резцов, компания *Smith Bits* разработала долота с резцами *ONYX 360* и *ONYX II*. В новых конструкциях долот резцы *ONYX* установлены в наиболее нагруженных частях торца долота, т.е. в пределах внешнего диаметра инструмента. Размещение предполагало возможность вращения резцов в процессе бурения на 360° (рис. 1.31).

По данным компании *Smith Bits*, проходка на долото *ONYX* в плотных сланцах составила 1124 м, при этом механическая скорость бурения

составляла не менее 13,1 м/ч, что оказалось выше на 19 % для долот аналогичного типа с фиксированными резцами. Стоимость метра бурения соответственно снизилась до 165 долларов, по сравнению с 210 долларами при использовании долот с фиксированными резцами [87; 94; 184].

Буровые работы, проведенные в Иркутской области долотами *ONYX*, продемонстрировали увеличение на 60 % механической скорости бурения и на 30 % проходки [94]. Сегодня такие долота довольно востребованы в Российской Федерации, их используют во многих регионах: в Урало-Поволжском регионе (Оренбургская, Самарская области); в Восточно-Сибирском регионе и т.д. [94].

Таким образом, многочисленный опыт применения долот *ONYX* подтвердил, что установка резцов *PDC* с возможностью вращения вокруг своей оси позволяет существенно повысить ресурс бурового инструмента. Вращаясь вокруг своей оси резец, проворачиваясь, оголяет неизношенную часть своей режущей грани, тем самым продлевая ресурс инструмента как минимум на длину окружности *PDC*. Однако, расположение резцов *ONYX* лишь незначительно увеличивают ресурс долота, это связано с тем, что в силу конструктивных особенностей не все резцы имеют возможность вращения в процессе бурения. Причиной этого является отсутствие доступности установки таких резцов по всей рабочей поверхности существующих долот. Установить вращающиеся резцы ближе к центру торца долота, где сконцентрированы высокие силы сопротивления со стороны забоя, невозможно. Это указывает на низкий уровень оптимизации формы торцевой части долота и конструкции резцов.

Рассмотрим механизм работы вращающегося вокруг своей оси резца *PDC*. По мере углубления скважины происходит продольное перемещение бурового инструмента вдоль стенки ствола, что приводит к взаимодействию боковых резцов с горной породой с усилием F при условии прижатия резца к стенке скважины (рис. 6.8). Именно такое продольное перемещение инструмента может привести к вращению резцов.

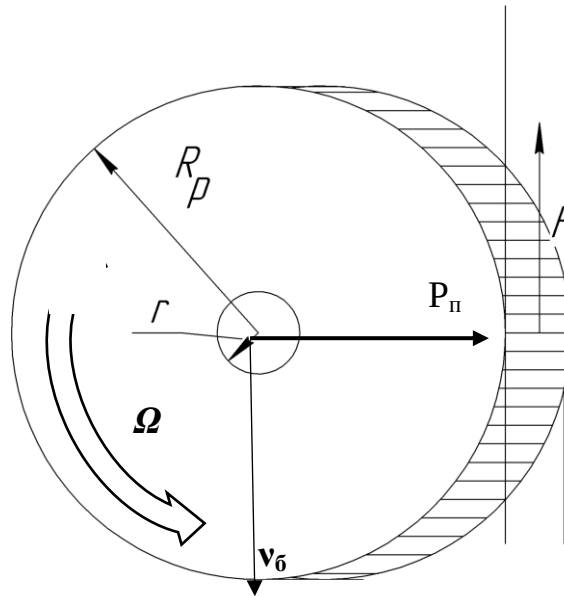


Рисунок 6.8 – Схема вращения резца *PDC*

Например, если механическая скорость бурения долотом типа *PDC* равна v_6 , то при условии, если не происходит проскальзывания резца без вращения, частота вращения резца будет равна

$$\Omega = \frac{v_6}{2\pi r}, \quad (6.1)$$

где v_6 – механическая скорость бурения; r – радиус резца *PDC*.

Учитывая очевидность высокой вероятности проскальзывания резца при таком сложном перемещении, частота вращения резца с учетом проскальзывания определяется по формуле:

$$\Omega = \frac{v_6}{2\pi r} K_n, \quad (6.2)$$

где K_n – коэффициент проскальзывания резца.

Отсюда следует, что частота вращения Ω может меняться от нуля до максимального значения, рассчитанного по формуле (6.2) при $K_n=1$.

Вращение резца происходит под действием крутящего момента, который определяется как

$$M_{кр} = R \cdot F, \quad (6.3)$$

где R – радиус резца; F – усилие, ориентированное вертикально вверх из точки контакта резца с боковой поверхностью ствола скважины (рис. 6.7).

Усилие F определяется усилием прижатия резца (P_n) к боковой поверхности ствола скважины (стенке или участка забоя скважины или к керну в случае колонкового бурения) и коэффициентом трения (зацепления) резца о породу боковой поверхностью. При этом усилие F можно определить по формуле:

$$F = P_{ос} / N_p \cdot \mu \cdot \cos \alpha, \quad (6.4)$$

где $P_{ос}$ – осевая нагрузка, кН; N_p – число резцов на торцевой части бурового инструмента, воспринимающие осевую нагрузку; μ – коэффициент трения резцов о породу; α – угол наклона боковой поверхности торца (в случае рассмотрения конструкции долота), град.

Из формулы (6.4) следует, что для повышения вероятности проворачивания резца вокруг собственной оси можно повысить фрикционные свойства боковой поверхности резца PDC , например, за счет выполнения насечек на ее поверхности или нанесения напыления с повышенными фрикционными свойствами.

Проворачиванию резца вокруг своей оси будет препятствовать момент сопротивления

$$M_c = r \cdot f \cdot F, \quad (6.5)$$

где r – радиус оси резца, м (рис. 5.8); f – коэффициент трения оси резца в корпусе резца.

Отсюда, коэффициент проскальзывания резца может определяться через соотношение

$$K_{\pi} = M_{\text{кр}}/M_{\text{с}}. \quad (6.6)$$

Из этого следует, что для снижения проскальзывания резца необходимо повышать соотношение следующих параметров:

$$R \cdot \mu / r \cdot f \rightarrow \max. \quad (6.7)$$

Выражение 6.7 можно считать основным условием динамизации конструкций алмазного бурового инструмента.

Для вращения резца вокруг собственной оси важнейшим является скорость углубления долота и сила прижатия резца к поверхности стенки скважины или наклонной части забоя скважины.

Усилие прижатия резца P_{π} может определяться только поперечными смещениями и прижатиями инструмента к стенке скважины (или керна).

В случае необходимости размещения резца на наклонной поверхности, что свойственно геометрии долота, необходимо учитывать угол наклона этой поверхности согласно схеме на рисунке 6.9.

При расположении резца на наклонной поверхности торца скорость v_{δ} и направление действия усилия взаимодействия резца с породой F_i определяются через $\sin \alpha$. А усилие прижатия резца к стенке скважины P_{π} определяется через $\cos \alpha$.

Исходя из проведенного анализа вращения резца *PDC* в процессе бурения, угол наклона поверхности долота α должен быть таким, чтобы одновременно обеспечивалось максимальное усилие прижатия P_{π} , и усилия F_i , что становится возможным если $\alpha = 45^{\circ}$. В этом случае значение $\cos \alpha = \sin \alpha = 0,707$. А это значит, что наиболее рациональным углом наклона поверхности для установки вращающегося резца $\alpha = 45^{\circ}$. Именно при таком

угле наклона поверхности долота будет обеспечена эффективный проворот резца вокруг своей оси.

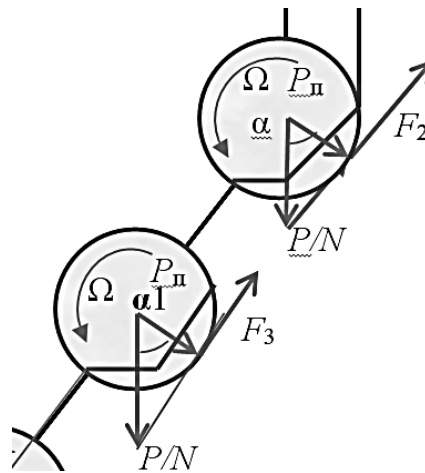


Рисунок 6.9 – Схема вращения резца при размещении на наклонной поверхности

На основании полученных выводов предложена конструкция долота с вращающимися резцами *PDC* на торцевой поверхности (рис. 6.10).

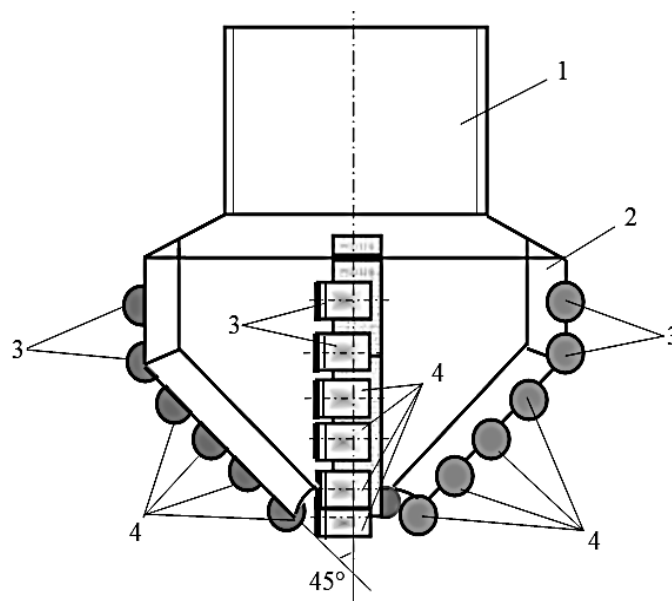


Рисунок 6.10 –Долото с вращающимися резцами на торцевой поверхности: 1 – корпус с резьбой; 2 – матрица; 3 и 4 – вращающиеся резцы

Предлагаемое долото состоит из корпуса с резьбой 1, матрицы 2 с резцами *PDC* 3 и 4. Резцы типа *PDC* 3 размещены на боковой, а резцы 4 на торцевой поверхности долота. Резцы 3 и 4 выполнены и установлены с

возможностью вращения вокруг своей продольной оси. Торцевая поверхность долота имеет наклон 45 градусов относительно оси долота, что способствует проворачиванию, находящихся на этой наклонной поверхности резцов 3.

Конструкция и состав вращающихся резцов *PDC* показано на рисунке 6.11. Вращающийся резец 1 с осью 2 размещается внутри корпуса 3, в котором он может стопориться с помощью упругих колец 4.

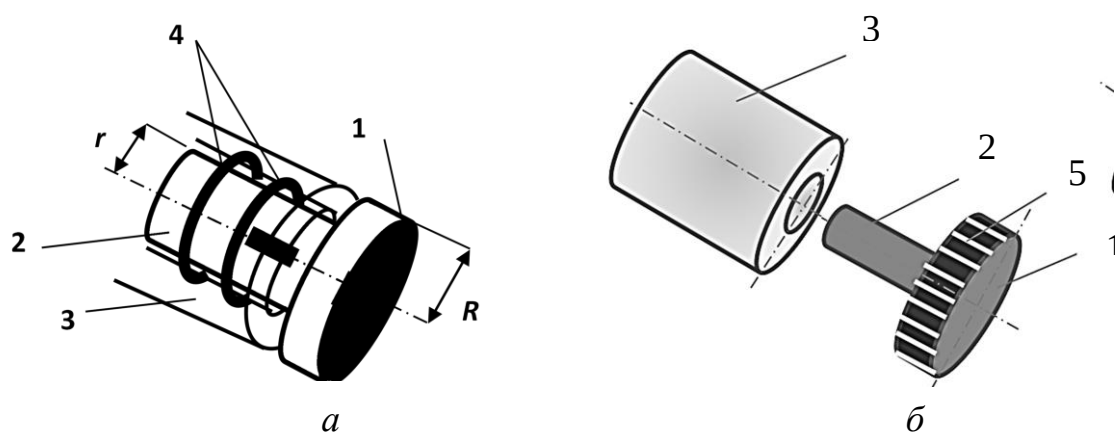


Рисунок 6.11 – Устройство вращающихся резцов *PDC*: *а* – в сборе; *б* – в разобранном состоянии; 1 – резец *PDC*; 2 – ось; 3 – корпус; 4 – стопорные упругие кольца; 5 – фрезерная поверхность

Для более эффективного вращения резца при бурении его боковая поверхность выполнена с повышенными фрикционными характеристиками за счет напыления твердого пористого металла, например, карбида вольфрама и оснащена ребристой насечкой, ориентированной вдоль продольной оси резца (5, рис. 6.11). По предложенной конструкции получен патент России № 2702787 [121].

Для колонкового бурения решением повышения ресурса за счет динамизации режущих элементов типа *PDC* является конструкция коронки, в матрице которой по наружной и внутренней периферии располагаются две,

соединенные между собой, оси вращения (4 и 5, рис. 6.12). На осях закреплены с возможностью вращения на 360° круглые резцы типа *PDC*.

На оси вращения 4 размещены скважинообразующие наружные резцы 1, на оси 5 – кернообразующие внутренние резцы 2. Наружные и внутренние резцы смещены относительно друг друга и центрированы втулками 6. Нижний слой коронки оснащен упруго-твердым материалом с целью защиты от истирания (рис. 6.13).

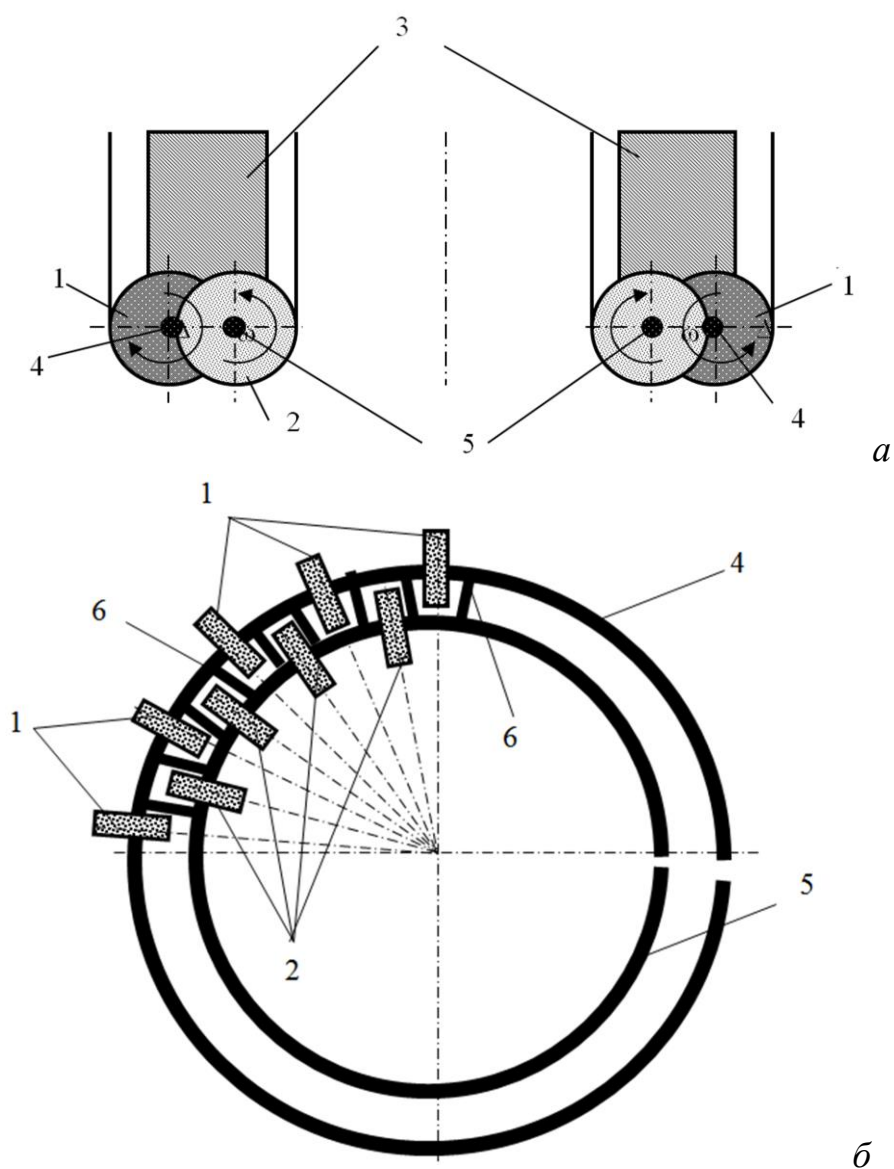


Рисунок 6.12 – Схема коронки с вращающимися резцами: 1 – наружный резец; 2 – внутренний резец; 3 – корпус коронки с матрицей; 4 – ось вращения наружных резцов; 5 – ось вращения внутренних резцов; 6 – центрирующие втулки

При создании коронки использована возможность взаимодействия вращающихся резцов со стенкой скважины (наружные резцы) и керном, поступающим при бурении внутрь коронки (внутренние резцы). В результате продольного перемещения коронки в процессе углубления забоя скважины за счет сил трения и прижатия резца к горной породе, под действием крутящего момента, происходит вращение резцов вокруг своей оси. Каждая группа резцов осуществляет вращение в противоположные друг относительно друга стороны.

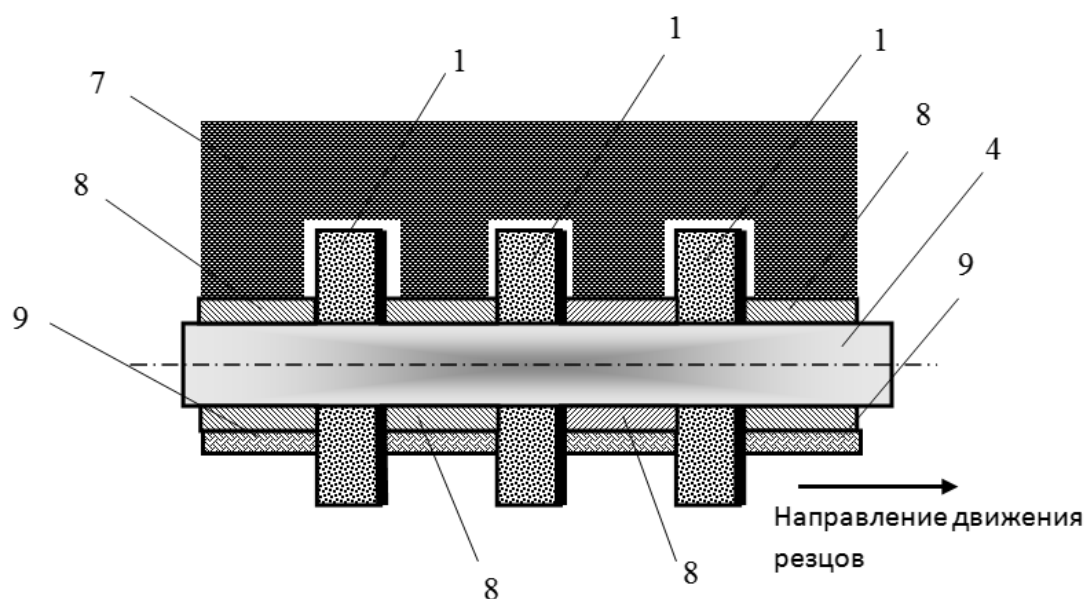


Рисунок 6.13 – Схема реализации крепления вращающихся круглых резцов типа PDC в матрице буровой коронки: 1 – наружный резец; 2 – внутренний резец; 3 – корпус коронки с матрицей; 4 – ось вращения наружных резцов; 5 – ось вращения внутренних резцов; 6 – элементы каркаса осей вращения резцов; 7 – матрица коронки; 8 – центрирующий резцы втулки; 9 – упруго-твердый материал (металлокерамика, резина)

При изготовлении коронки оси спекаются вместе с матрицей, что дает преимущество равномерного распределения воспринимаемой нагрузки от осей на матрицу. Размер осей определяется прочностными характеристиками работы коронки. Оси могут изготавливаться в форме кольца или

равностороннего многоугольника. В случае формы в виде равностороннего многоугольника оси изготавливают так, чтобы число сторон многоугольника было равно числу кернообразующих и скважинообразующих резцов (рис. 6.14).

Такая конструкция осей обладает повышенными прочностными характеристиками и позволяет располагать на них резцы *PDC* с соблюдением перпендикулярности, не зависимо от фронтального угла установки резца.

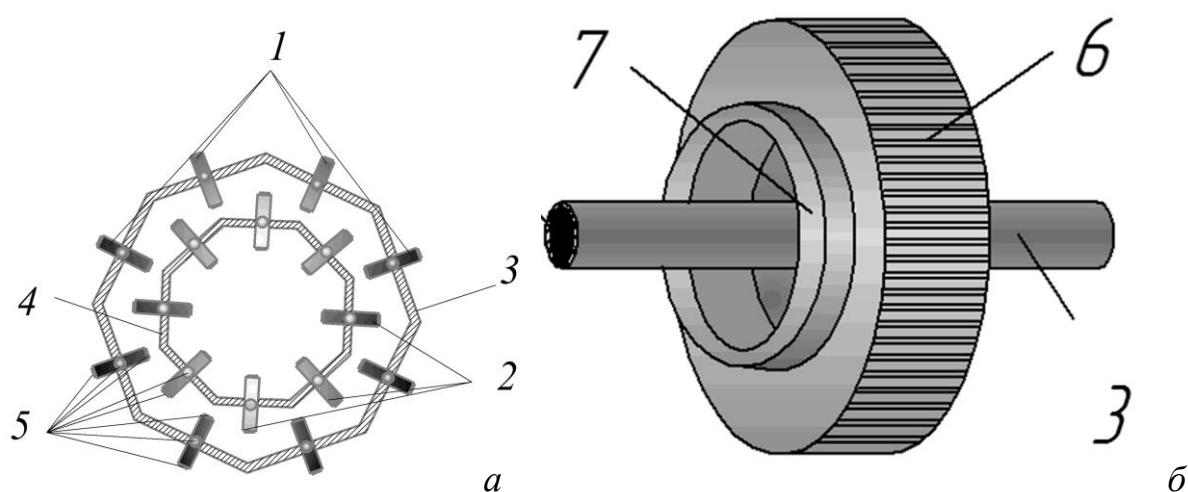


Рисунок 6.14 – Ось в виде равностороннего многоугольника: *а* – общий вид; *б* – размещение резца; 1 – скважинообразующие режущие элементы; 2 – кернообразующие режущие элементы; 3, 4 – оси вращения; 5 – армирование режущих элементов; 6 – продольные насечки; 7 – центрирующие буртики

Для реализации возможности размещения на торце комбинированного вооружения разработана конструкция буровой головки, в качестве режущих элементов в которой используются диски. Диски могут армироваться резцами, изготовленными из материала различной формы и качества, например, крупными или мелкими синтетическими алмазами, *PDC*, напылением поликристаллического алмазного порошка, резцами *Tripax* и т.д. или их комбинацией (рис. 6.15, *б*). В зависимости от геологических условий

применения буровой головки, размер резцов может изменяться. Такое комбинированное вооружение дает возможность расширить область применения бурового инструмента.

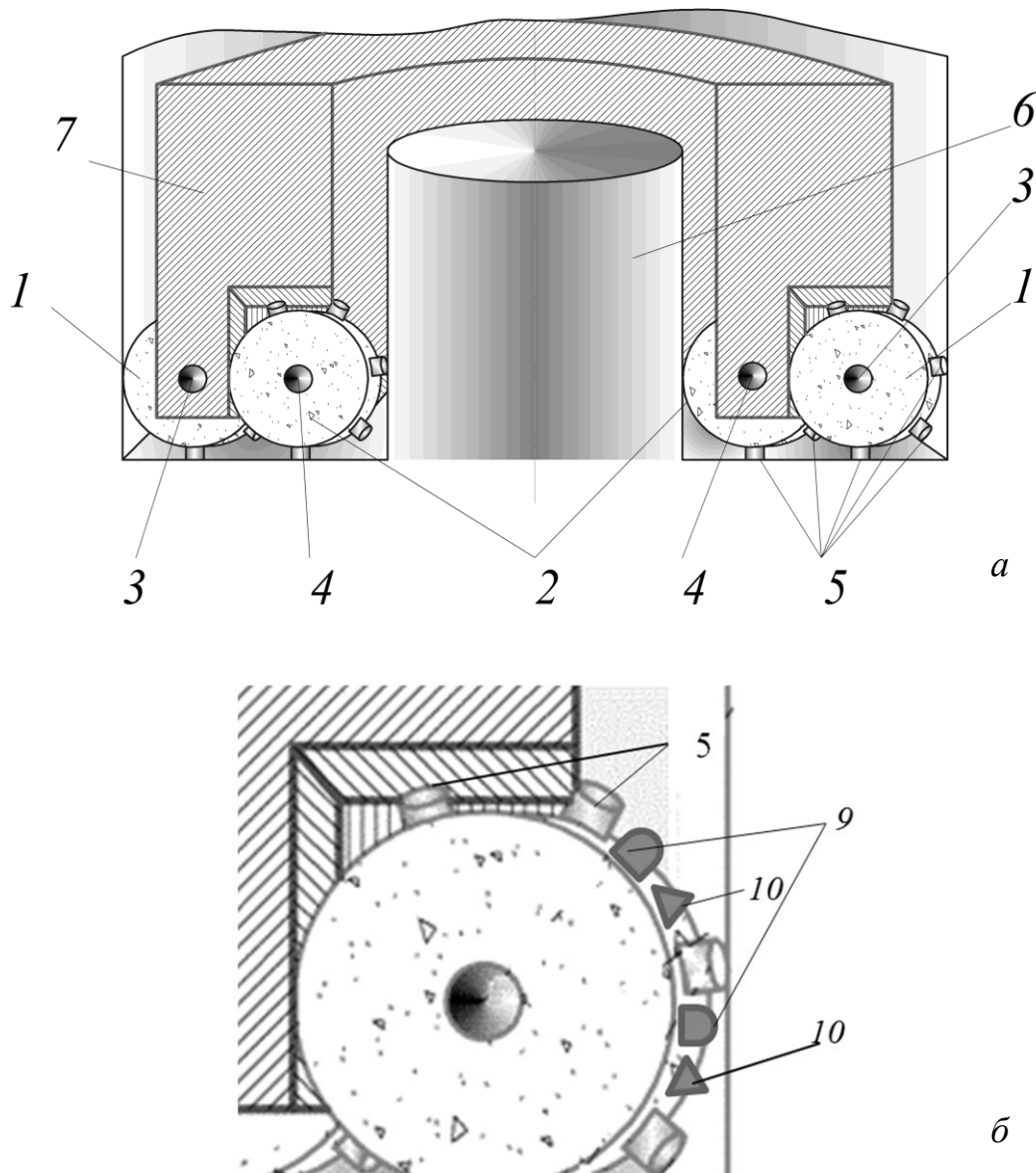


Рисунок 6.15 – Конструкция буровой головки с вращающимися дисками: *а* – общий вид в разрезе; *б* – пример конструкции кернообразующих и скважинообразующих дисков с комбинированным вооружением; *в* – ось в виде равностороннего многоугольника; 1 – скважинообразующие диски; 2 – кернообразующие диски; 3, 4 – оси вращения; 5 – резцы *PDC*; 6 – керн; 7 – матрица; 8 – окно; 9 – крупный синтетический алмаз; 10 – резец *Tripax*

Предлагаемая буровая головка для вращательного бурения включает корпус с матрицей 7 (рис. 6.15, а). В матрице 7 располагаются две оси вращения (3 и 4), которые имеют форму равностороннего многоугольника с числом сторон, равных числу кернообразующих 1 и скважинообразующих 2 дисков соответственно (рис. 6.14, а). Оси спекаются вместе с матрицей. На оси вращения 3 закреплены с возможностью вращения вокруг своей оси круглые скважинообразующие наружные диски 1, на оси 4 – кернообразующие внутренние диски 2. Наружные скважинообразующие 1 и внутренние кернообразующие 2 диски располагаться так, чтобы полностью перекрыть разрушаемую зону забоя и их число будет изменяться в зависимости от диаметра буровой головки. Диски по периферии армированы резцами *PDC* или любым другим необходимым вооружением, отвечающим геологическим условиям.

Применение в качестве режущих элементов дисков, армированных алмазными резцами, позволяет осуществлять бурение большого диаметра, а наличие в конструкции буровой головки кернообразующих дисков – отбор керна.

В процессе бурения диски, находящиеся на внутренней 4 и внешней 3 осях вращения, за счет крутящих нагрузок, прикладываемых к коронке, осуществляют вращение вокруг оси головки. Скважинообразующие диски 1 обеспечивают заданный диаметр скважины. Кернообразующие диски 2 обеспечивают получение керна б. С целью беспрепятственного вращения дисков, в местах их установки в матрице 7 проделаны окна (рис. 6.14).

Осуществляя вращение вокруг своей оси, диски имеют возможность контактировать с породой всей режущей кромкой, таким образом реализуется равномерное изнашивание всех резцов *PDC*, что повышает ресурс коронки при применении ее во вращательном бурении скважин. Использование в конструкции головки осей в форме многоугольника позволяет (за счет повышенной прочности) применять в качестве режущих элементов двух групп дисков, резцы которых равномерно перекроют всю

разрушаемую зону забоя, что позволяет осуществлять бурение скважин большого диаметра с отбором керна.

Решая проблему ограниченного ресурса породоразрушающего инструмента типа *PDC* путем динамизации резцов, появляется проблема износа и заклинивания резцов *PDC* в местах их контакта с осями. Трущиеся части вращающихся резцов *PDC* нуждаются в смазке. Единовременная смазка, при изготовлении, учитывая среду и нагрузки, возникающие при бурении, не долговечна.

С целью обеспечения непрерывности смазки контакта с резцом *PDC*, оси выполняются полыми с перфорацией (рис. 6.16). Ось 3 под давлением наполняется консистентной смазкой 4. При вращении резца *PDC* 6 на оси 3 возникает трение и повышается температура плоскости их контакта. За счет повышения температуры осуществляется плавление смазки, молекулярные связи разрушаются и смазка проникает через перфорационное отверстие 5 в плоскость контакта резца *PDC* 6 и оси 3. Таким образом, осуществляется непрерывная смазка контакта вращающихся деталей непосредственно в процессе бурения, что помимо повышения ресурса и работоспособности инструмента позволяет сократить время на спуско-подъемные операции с целью смены или обработки инструмента.

Матрица коронки может быть выполнена с абразивным уступом 8 (рис. 6.16, б), который позволяет при контакте с вращающимся резцом *PDC* 6 затачивать изношенную в процессе работы его режущую часть, тем самым увеличивая его ресурс и способствуя поддержанию эффекта разрушения в допустимых значениях.

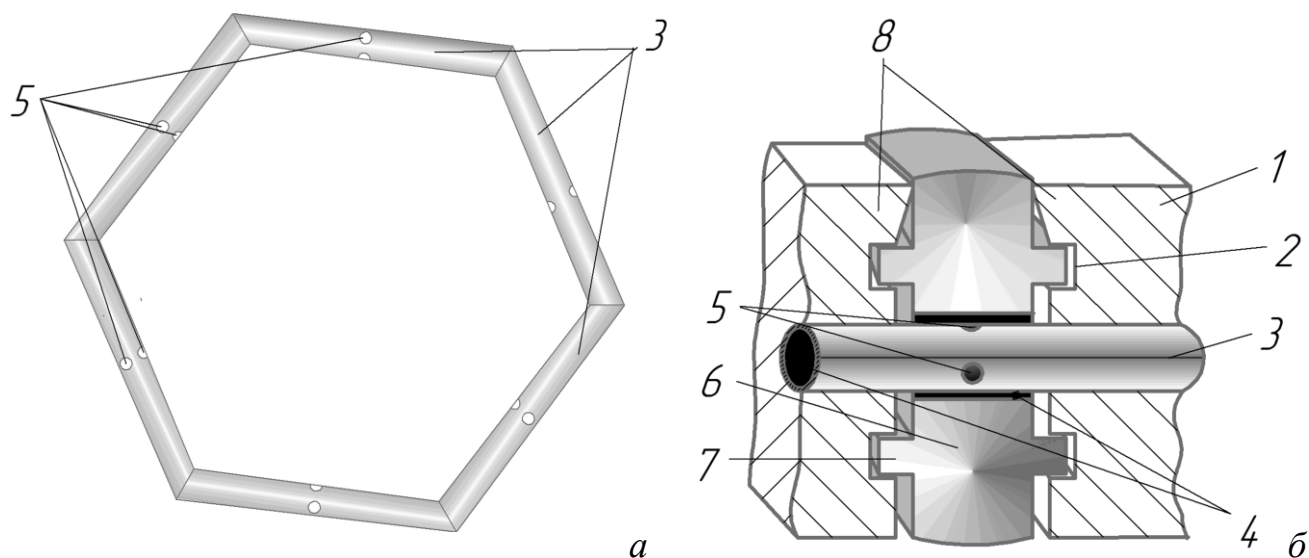


Рисунок 6.16 – Оси вращения полые с перфорацией: а – общий вид; б – в сборе с резцом и матрицей (поперечный разрез); 1 – матрица; 2 – кольцевые проточки; 3 – ось; 4 – консистентная смазка; 5 – перфорационное отверстие; 6 – резец/диск; 7 – стабилизирующий буртик; 8 – абразивный уступ

Таким образом, предложенная конструкция позволяет не только увеличить ресурс буровой коронки за счет дополнительной непрерывной смазки трущихся деталей, стабилизации вращения резца и заточки изношенной режущей части инструмента, но и сократить время на спуско-подъемные операции, осуществляя перечисленные функции непосредственно в процессе бурения.

По предложенным конструкциям получены патенты на изобретение № 2702787, № 190545; № 2715574; № 2764761 [120, 121, 122].

Опираясь на полученные результаты и конструктивные решения, разработаны чертежи коронки с вращающимися резцами *PDC* (рис. 6.17). За основу приняты размеры геологоразведочного сортамента.

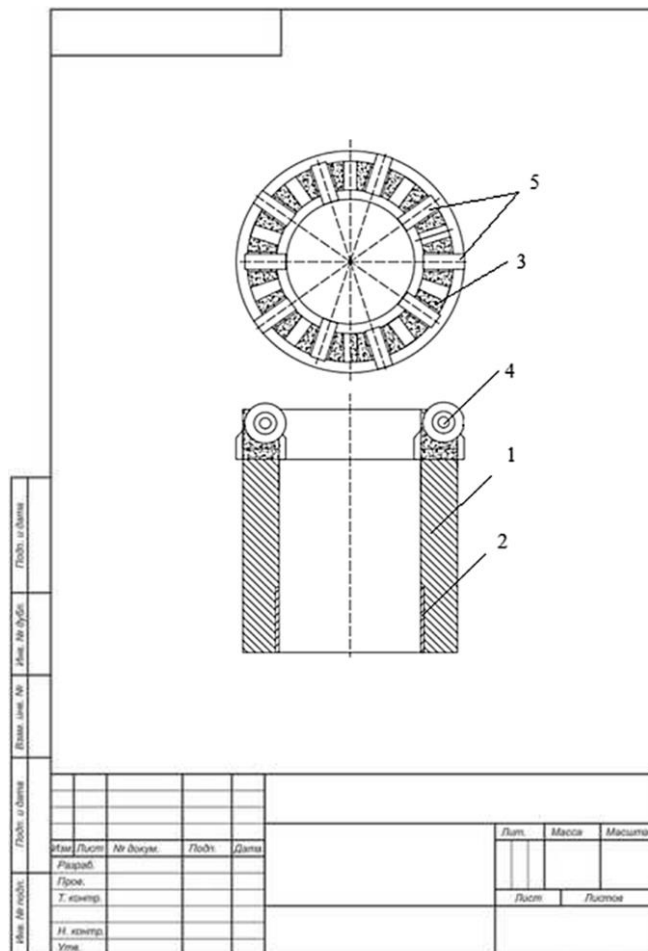


Рисунок 6.17 – Чертеж геологоразведочной коронки с вращающимися резцами *PDC*

На основании пролеченных чертежей создана трехмерная модель и образец коронки (рис. 6.18), позволяющие проводить исследования возможностей работы коронки, эффект проскальзывания резцов, их контактирующей с породой способности и продуктивность циркуляции промывочной системы как при помощи компьютерного моделирования (с использованием модели (рис. 6.18, а)) так и натурных экспериментов (с использованием образца (6.18, в)).

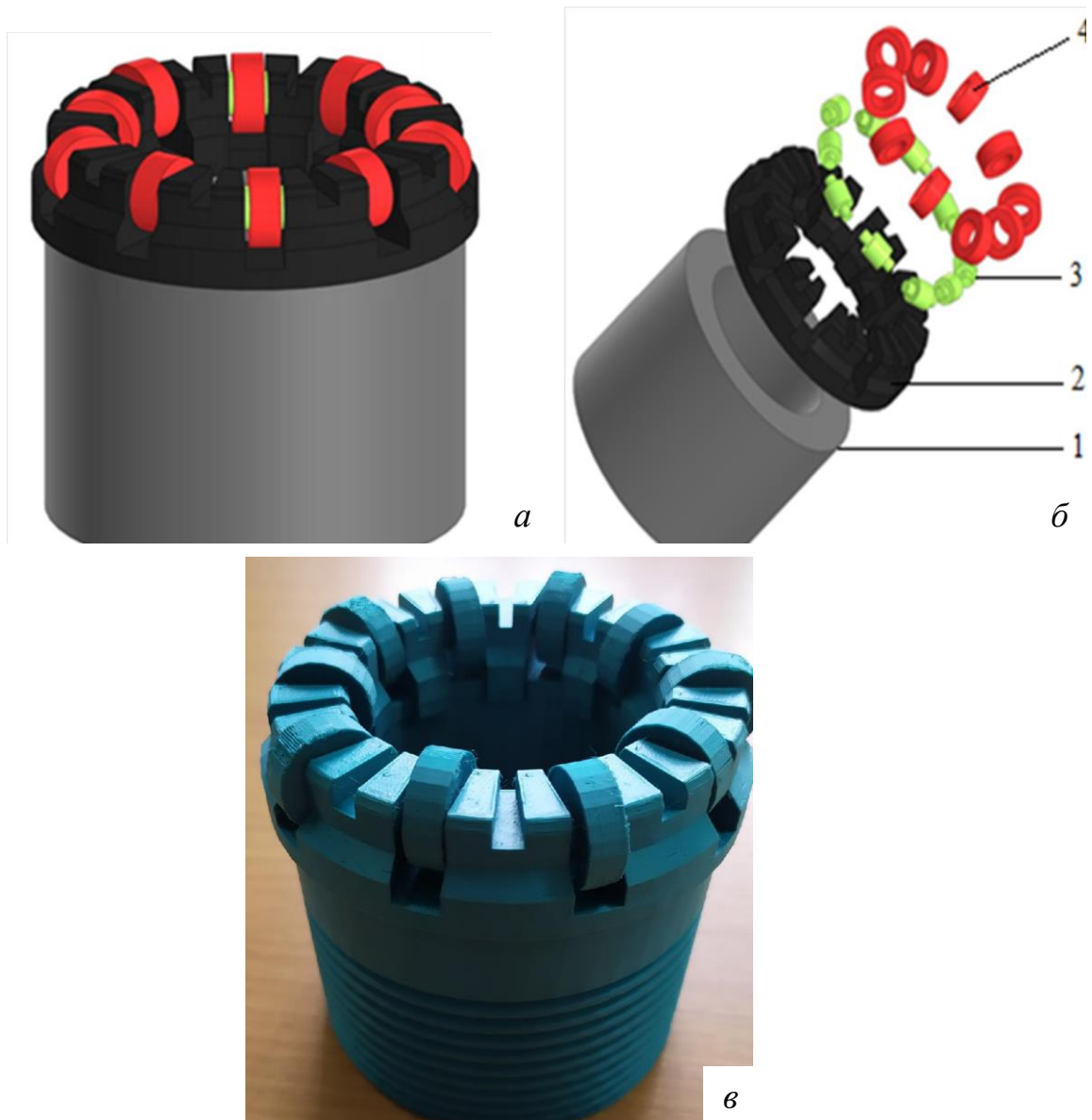


Рисунок 6.18 – Образец геологоразведочной коронки с вращающимися резцами: *а* – трехмерная компьютерная модель в сборе; *б* – элементы трехмерной модели; *в* – фото натурального образца; 1 – корпус; 2 – матрица; 3 – оси вращения; 4 – резцы

Исследования полученного образца на первом этапе испытаний подтвердили дееспособность такого типа бурового инструмента возможность его применения, в случае изготовления опытных образцов, при бурении скважин.

Таким образом, буровой инструмент с вращающимися рабочими элементами способен обеспечить повышение ресурса и снижение затрат времени на сопутствующие бурению работы.

6.3 Разработка бурового инструмента, армированного резцами PDC вогнутой формы

Механические колебания любой этиологии, возникающие в процессе бурения, являются причиной многочисленных проблем проходки скважин различного назначения. Устранение всевозможных, даже мельчайших источников возникновения вибраций, способствует повышению производительности и стабилизации направления бурения.

Контакт породоразрушающего инструмента с пластом породы, с учетом условий бурения (сложности системы силового воздействия на забой, неоднородности геологического разреза), является источником возникновения поперечных колебаний, что отражается на формировании радиальных вибраций всего снаряда. В случае анизотропности перебуриваемых горных пород или наклонно-направленного бурения такие колебания усиливаются. Вибрации подобного происхождения влияют на форму ствола скважины, уровень отклонения от заданного направления, осложняют эксплуатацию забойных телеметрических систем, повышают уровень динамических ударных нагрузок на вооружение, сказываются на износостойкости бурового става. Помимо ухудшения качества сооружения скважин и контроля процесса бурения, такие вибрации ведут к преждевременному износу инструмента, что ухудшает экономические показатели буровых работ.

Обычно гашение вибраций достигают путем регулирования режимов бурения. Однако, такой способ борьбы влечет за собой снижение скорости бурения или повышение энергоемкости, что противоречит современным

требованиям производства. Одним из хорошо зарекомендовавших себя методов борьбы и профилактики вибрации, возникающих в процессе бурения, является изменение конструктивных параметров применяемого бурового снаряда и его элементов [11, 13, 19, 39, 124]. При проектировании бурового инструмента типа *PDC* особое внимание уделяют схеме размещения и форме резцов. Хорошие показатели при борьбе с вибрациями имеет конструкция долота компании *Ulterro's New Counter Force Technology*. Производители, опираясь на опыт ориентирования резцов *PDC* с целью повышения эффективности бурения, предложили новую технологию проектирования долот такого типа. Резцы *PDC* на торце долота устанавливаются так, чтобы два соседних резца были повернуты навстречу друг другу (рис. 6.19) (Патент US 2020/0149350 A1 [172]). Такая раскладка позволяет снижать поперечные колебания долота. Изготовитель утверждает, что помимо стабилизации работы инструмента, конструкция долота способствует направлению вибрационной энергии в пласт для повышения эффективности разрушения породы. Продуктивность применения долот *Ulterro* не вызывает сомнений, т.к. доказано бурением более 15 млн. метров в год. Согласно данным, опубликованным в журнале Международной ассоциации подрядчиков «*Drilling contractor*», при бурении на месторождении *Eagle Ford* (Техас), применив долото *Ulterro*, удалось установить рекорд по показателям скорости бурения (прирост составил около 41 %). При этом экономия получилась в 15 часов времени и 50 000 долларов США.



Рисунок 6.19 – Размещение резцов *PDC* на одной лопасти долота *Ulterro*: φ_{p1} – фронтальный угол первого резца; φ_{p2} – фронтальный угол второго резца; φ_{p3} – фронтальный угол третьего резца

Угол разворота резцов долот *Ulterro* на встречу друг другу незначительный, однако применение данной технологии размещения не доступно для изготовления многих типов породоразрушающего инструмента, особенно колонкового. В отличие от конструкций с традиционной схемой раскладки резцов *PDC*, технология *Ulterro* подразумевает изменение знака фронтального угла установки каждого последующего торцевого резца. Если первый резец имеет положительный фронтальный угол, то следующий – отрицательный и так далее (см. рис. 6.19). Резец, имеющий фронтальный угол отличный от нуля прежде всего способствует очистке забоя. При разработке породоразрушающего инструмента подбирается такое значение угла, которое содействует механическому выходу шлама из-под резца. Причем в конструкции бескернового породоразрушающего инструмента (долота) отвод осуществляется только в направлении стенок скважины, а в конструкции коронки есть возможность направлять разрушенную породу в двух направлениях – в сторону стенок скважины и керна. Накопление

разрушенной породы перед резцом приводит к прижегу пластин *PDC* и нарушению качества бурения.

Исследования Института сверхтвердых материалов им. Бакуля [11] показали, что фронтальный угол установки резца *PDC* оказывает колоссальное влияние на повышение показателей процесса бурения. При оптимальном, в пределах от 5° до 10° , значении фронтального угла установки резца можно добиться наиболее высоких показателей механической скорости бурения при одновременном снижении затрат мощности [11].

Согласно результатам научных работ Борисова К.И. и Нескоромных В.В. [15, 90], скорость перемещения резца оказывает влияние на сопротивление его внедрению в породу. В зависимости от расположения резца, скорость его перемещения по забою увеличивается в направлении от оси к стенкам скважины. При этом глубина внедрения резца в породу напрямую зависит от значения фронтального угла его установки. Согласно выражению [90]:

$$h = \sqrt{\left[\frac{P_{oc} \sin \gamma_{ck}(1-f \cdot tg \gamma_{п})}{\pi \sigma_{ck} \cos \varphi_p tg \gamma_{п} \sqrt{d}(1-tg \varphi_{п})} \right]^3}, \quad (6.8)$$

повышение фронтального угла установки резца *PDC* (φ_p) ведет к увеличению глубины резания-скалывания породы.

Поэтому резец, расположенный на внешнем диаметре торца долота имеет наибольший фронтальный угол, а скважинообразующий резец коронки логично располагать в противоположном направлении кернаобразующего резца, что реализовано в конструкциях серийно-выпускаемых коронок, например производителя «Бирун-техно» (рис. 6.20), эффективность работы которых доказано промышленным внедрением.

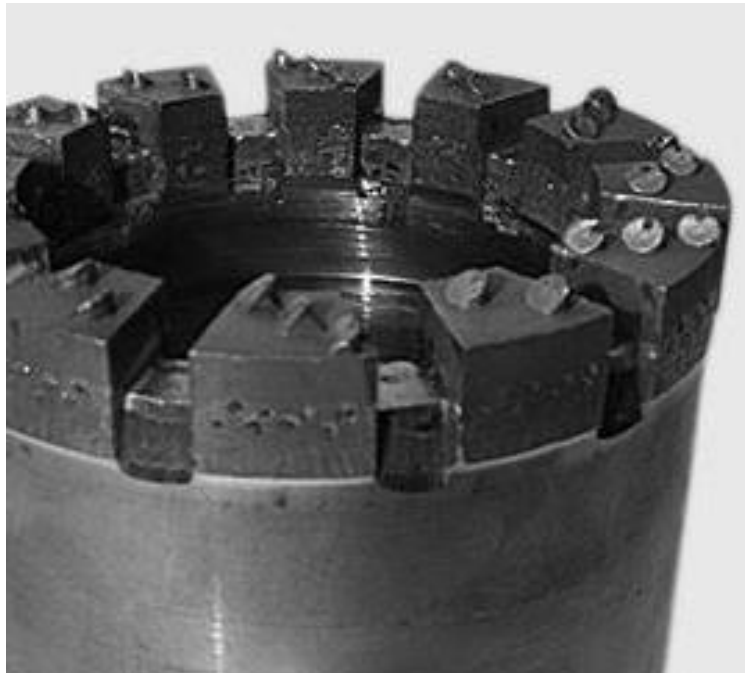
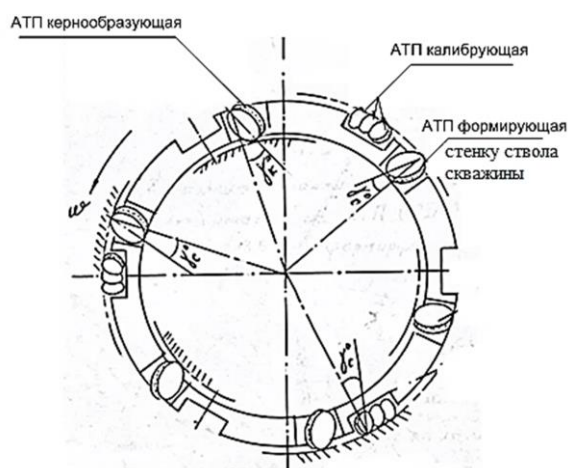
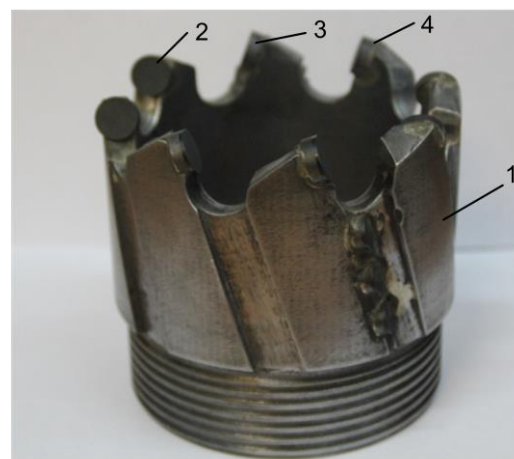


Рисунок 6.20 – Раскладка резцов типа *PDC* на торце коронки «Бинур-техно»

Подобная технология изготовления инструмента внедрена при проектировании конструкции стабилизирующей антивибрационной коронки, разработанной группой ученых под руководством проф. Третьяка А.А. (рис. 6.21) (Патент на изобретение RU № 2577351) [123]. В конструкции коронки скважинообразующие резцы АТП чередуются с кернообразующими и, согласно схеме на рис. 6.21, *а*, они фронтально развернуты в противоположные друг относительно друга стороны.



а



б

Рисунок 6.21 – Стабилизирующая антивибрационная буровая коронка:
а – схема торца; б – фото общего вида [123, 152]

Стабилизирующая способность коронки объясняется тем, что каждый из ее резцов представляет собой элемент отдельной винтовой линии и при этом установлен под отрицательным углом (в пределах от -5° до -15°) относительно поверхности резания.

Помимо всего перечисленного, учитывая, что количество резцов на торце инструмента зависит от его диаметра, размещение *PDC* по технологии *Ulterro* усложняется еще и необходимостью попарного их ориентирования.

Еще одним вариантом решения устранения поперечных колебаний при высоких показателях ресурса инструмента и эффективности бурения выступает вогнутая форма резца *PDC*. Известна форма резца, имеющая по рабочей поверхности вогнутые канавки, некоторые из которых имеют V-образную форму [170] (рис. 6.22).

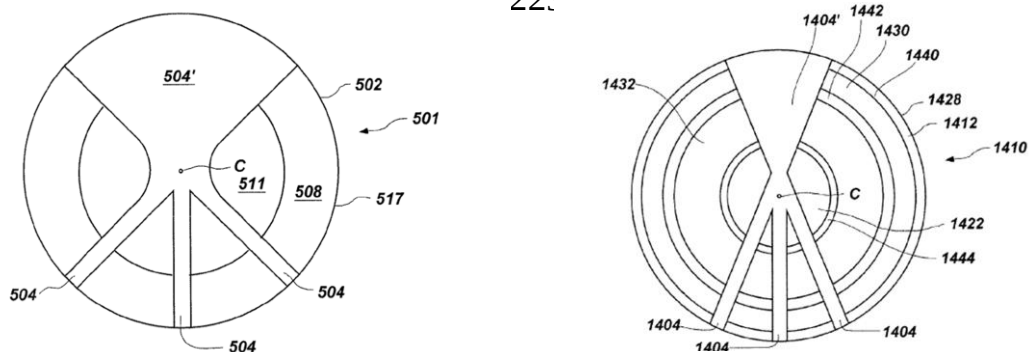


Рисунок 6.22 – Некоторые варианты геометрии торца резца PDC с вогнутыми канавками [170]

Разработчики такой формы резца ссылаются на то, что одной из главных причин возникновения вибраций является несбалансированность усилий резания всех резцов, а такая форма будет способствовать повышению сцепления и повышения трения резца о забой.

Стандартные резцы *PDC* состоят из абразивного слоя поликристаллических алмазов 1, твердосплавной подложки 2 и корпуса резца 3 (рис. 6.23). Стандартные буровые долота армируют резцами фиксировано, режущей поверхностью в направлении резания-скалывания породы. При такой расстановке и форме резцов уровень сил трения на их рабочей грани довольно низкий, что приводит к возможности возникновения поперечных колебаний бурового инструмента. При установившемся бурении (с постоянной глубиной внедрения резца в породу) равнодействующая усилия резания-скалывания породы (R), создаваемая резцом, концентрируется под прямым углом к центру его режущей грани 5 (рис. 6.23).

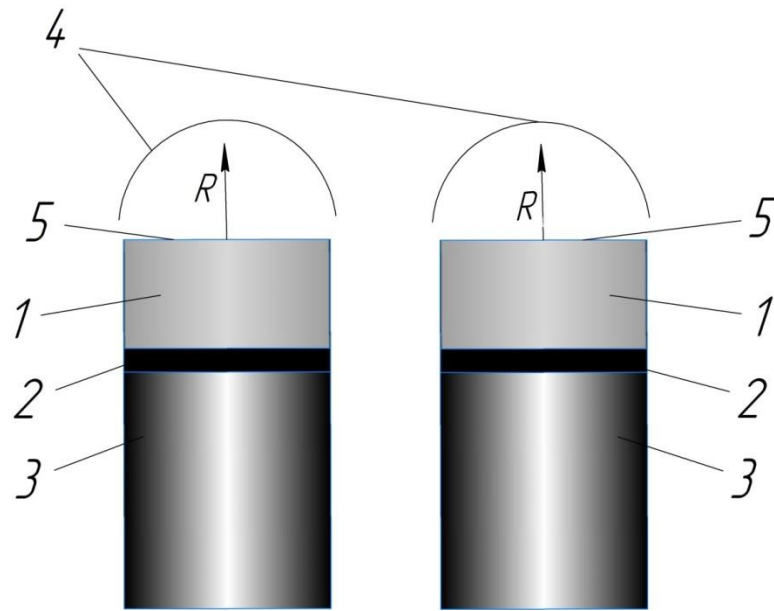


Рисунок 6.23 – Схема работы резцов *PDC* (вид сверху): 1 – слой поликристаллических алмазов; 2 – твердосплавная подложка; 3 – корпус; 4 – пределы области разрушения породы; R – вектор усилия резания-скалывания породы; 5 – режущая поверхность

Согласно схеме механизма разрушения горных пород резцом типа *PDC*, вектор усилия резания-скалывания (R) является результирующей силой, вызванной воздействием осевого (P) и тангенциального (F) усилий, действующих на резец. Отсюда следует, что вектор R всегда будет соответствовать направлению движения резца и изменение фронтального угла его установки мало повлияет на его направление (рис. 6.24).

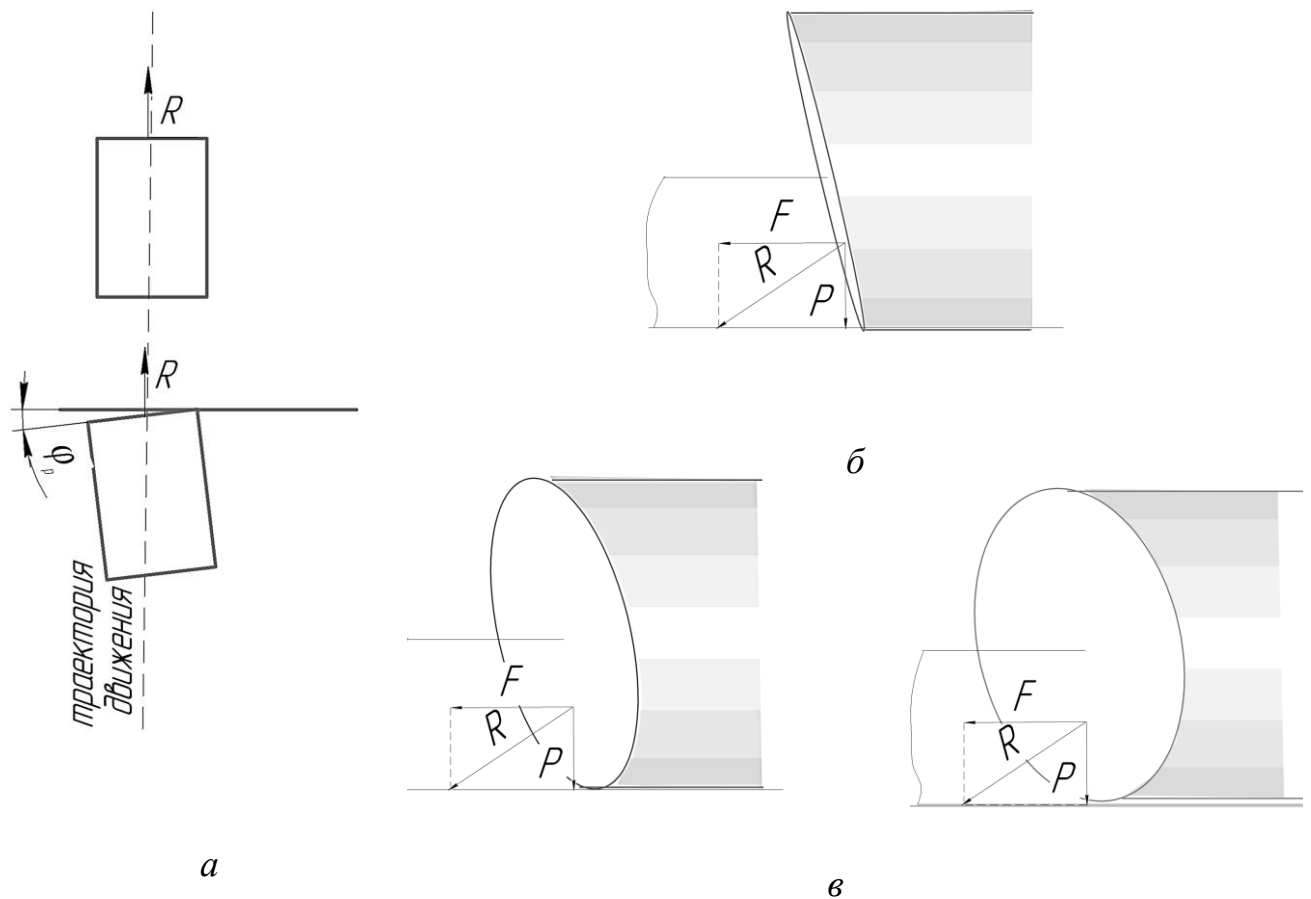


Рисунок 6.24 – Формирование направления усилий при различных значениях фронтального угла (φ_p) установки резца *PDC*, расположенных на одной линии резания: *а* – вид сверху; *б* – вид сбоку при $\varphi_p=0$; *в* – вид сбоку при $\varphi_p < > 0$

При развороте резцов на встречу друг к другу направление вектора усилия R не изменится. Любое возможное изменение направления будет связано прежде всего с перераспределением областей сопротивления со стороны забоя.

Для более точной концентрации разрушающей энергии в центре резца *PDC* и направлении ее в пласт с целью повышение эффективности разрушения, вдоль всей поверхности его рабочей части следует создавать продольное углубления в виде конуса или сферы (рис. 6.25).

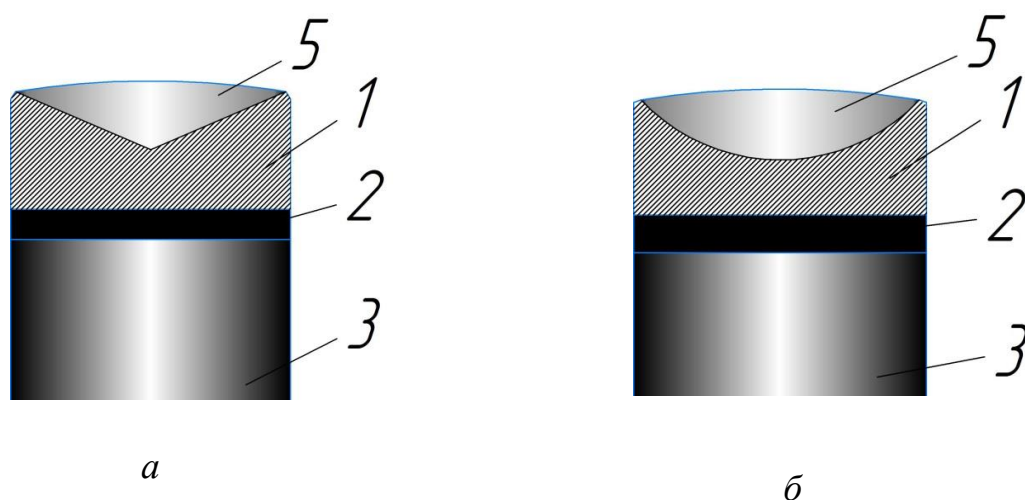


Рисунок 6.25 – Конструкция резцов долота, режущая поверхность которых выполнена в виде: *а* – продольного конусного углубления; *б* – продольной вогнутой сферы: 1 – слой поликристаллических алмазов; 2 – твердосплавная подложка; 3 – корпус; 5 – режущая поверхность

При бурении резцами с вогнутой формой режущей поверхности результирующая усилия резания-скалывания породы может разделиться на несколько векторов R_i ($R = \sum R_i$), которые будут направлены на встречу друг другу (рис. 6.26). Противодействуя, усилия R_i предотвращают поперечные колебания резца и таким образом гасят вибрации инструмента. Однако, это будет происходить только в том случае, если величина крайних векторов усилия R_1 и R_2 будет достаточна для стабилизации резца. Если области разрушения породы 4, созданные усилиями R_1 и R_2 , соприкоснуться не будут, в центральной части режущей грани 5 возникнет еще один вектор усилия – R_3 , необходимый для разрушения оставшегося в центральной части режущей грани 5 целика. При $R_3 > (R_1 + R_2)$ гашения колебаний может не произойти (рис. 6.26, *а*). Гарантирован антивибрационный эффект только в том случае, когда векторы усилия резания-скалывания R_1 и R_2 будут направлены так, что области разрушения породы 4, возникшие от действия этих усилий, будут пересекаться или хотя бы соприкасаться в точке, находящейся в плоскости, проходящей через ось резца (рис. 6.26, *б*). В этом случае, векторов будет два

и $R_1 = R_2$. Только равенство этих сил будет способствовать гашению поперечных колебаний резца.

Регулирование распределения усилия резания-скалывания на режущей грани резца 5 возможно путем изменения угла вершины вогнутого конуса (α) режущей поверхности слоя поликристаллических алмазов 1.

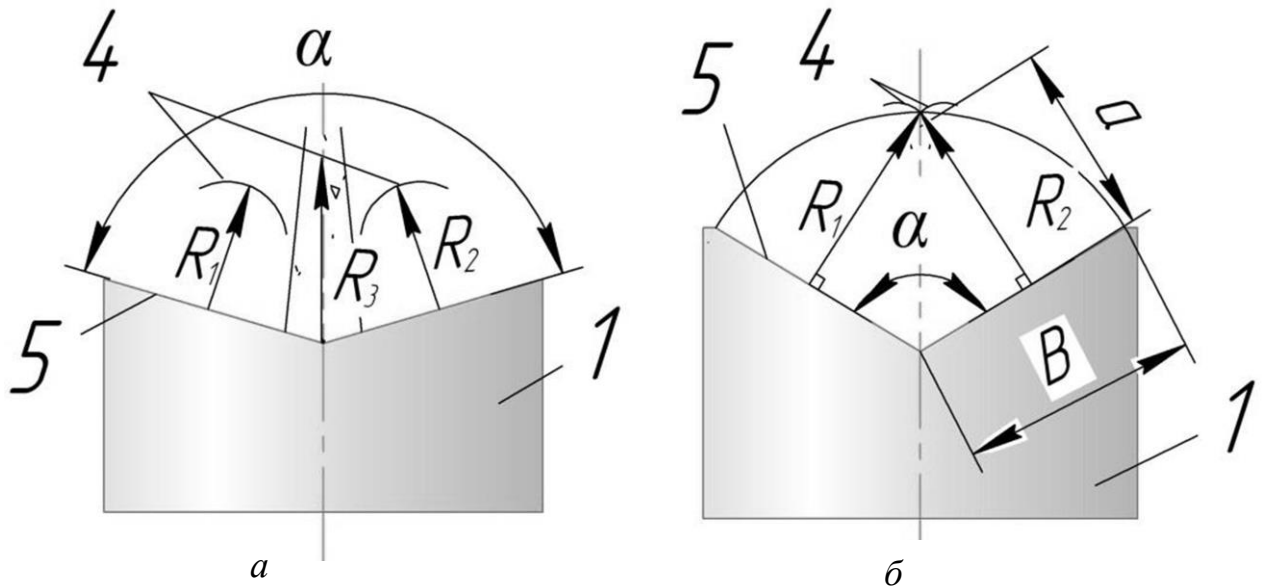


Рисунок 6.26 – Схема возможного распределения сил в пределах одного резца (вид сверху): а – $R_3 > (R_1 + R_2)$; б – $R_3 > (R_1 + R_2)$; 1 – слой поликристаллических алмазов; 4 – область разрушения породы; 5 – режущая поверхность

Согласно схеме (рис. 6.26, б), показывающей распределение сил при взаимодействии резца с породой, когда два вектора усилия резания-скалывания R_1 и R_2 направлены так, что области разрушения породы 4 от действия этих усилий будут соприкасаться в точке, находящейся в плоскости, проходящей через ось резца, угол вершины вогнутого конуса можно определить по формуле:

$$\alpha = 2 \arctg \frac{2a}{B}, \quad (6.8)$$

где a – длина вектора R ; B – длина образующей вогнутого конуса.

Рассмотрим схему взаимодействия резца с породой на виде сбоку (рис. 6.27, а). Имеем значения

$$a = OB \cdot \sin \beta, \quad (6.9)$$

$$\beta = 90 - \gamma_{\text{ск}} - \gamma_{\text{п}}, \quad (6.10)$$

где $\gamma_{\text{ск}}$ – угол скалывания породы перед передней гранью резца; $\gamma_{\text{п}}$ – передний угол установки резца.

$$OB = \frac{h}{\sin \gamma_{\text{ск}}}, \quad (6.11)$$

где h – глубина резания-скалывания породы.

Тогда

$$a = \frac{\sin (90 - \gamma_{\text{ск}} - \gamma_{\text{п}}) h}{\sin \gamma_{\text{ск}}}, \quad (6.12)$$

Длина образующей вогнутого конуса B будет зависеть от диаметра резца d и глубины резания-скалывания породы h (рис. 6.27, б) и составит

$$B = \sqrt{dh - h^2}. \quad (6.13)$$

Таким образом, угол вершины вогнутого конуса поверхности слоя поликристаллических алмазов резца, способствующего гашению поперечных колебаний должен быть равен:

$$\alpha = 2 \arctg \frac{2 \cdot h \cdot \sin(90 - \gamma_{\text{ск}} - \gamma_{\text{п}})}{\sin \gamma_{\text{ск}} \cdot \sqrt{dh - h^2}} \quad (6.14)$$

где h – глубина резания-скалывания породы; $\gamma_{\text{ск}}$ – угол скалывания породы перед передней гранью резца; $\gamma_{\text{п}}$ – передний угол установки резца.

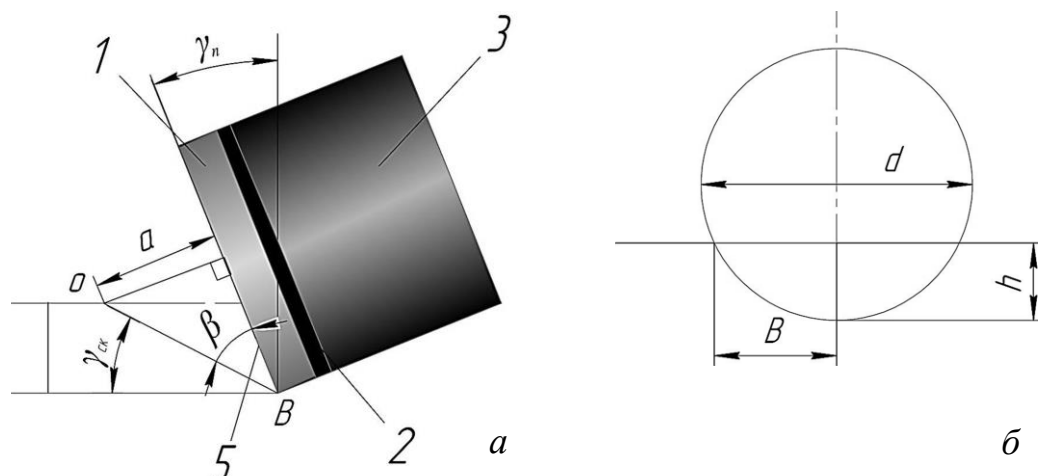


Рисунок 6.27 – Схема к расчеты угла вершины вогнутого конуса

Серийно-выпускаемые резцы *PDC* имеют следующий ряд диаметральных размеров: 8мм; 13мм; 16 мм; 19 мм. Согласно результатам аналитических расчетов, представленных в табл. 6.1, для нормальной работы резца, угол α должен находиться в пределах от 104° до 155° .

Таблица 6.1 – Результаты расчета угла вершины вогнутого конуса поверхности резца, способствующего гашению поперечных колебаний ($\gamma_{ск}=20^\circ$; $\gamma_{п}=20^\circ$)

d , мм	h , мм	B , мм	α , град
8	4	4	155
	2	3,5	137,5
13	6,5	6,5	155
	3	5,5	135,7
16	8	8	155
	4	7	137,5
	2	5	104
19	9,5	9,5	155
	5	8,4	139

В случае формы режущей поверхности в виде вогнутой сферы (рис. 6.28) радиус вогнутой поверхности также будет определяться значением угла α . Согласно схеме (рис. 6.28), показывающей распределение сил при взаимодействии резца с породой, радиус вогнутой сферы r определяется как

$$r = \frac{AB}{2\sin\frac{\alpha}{2}} \quad (6.15)$$

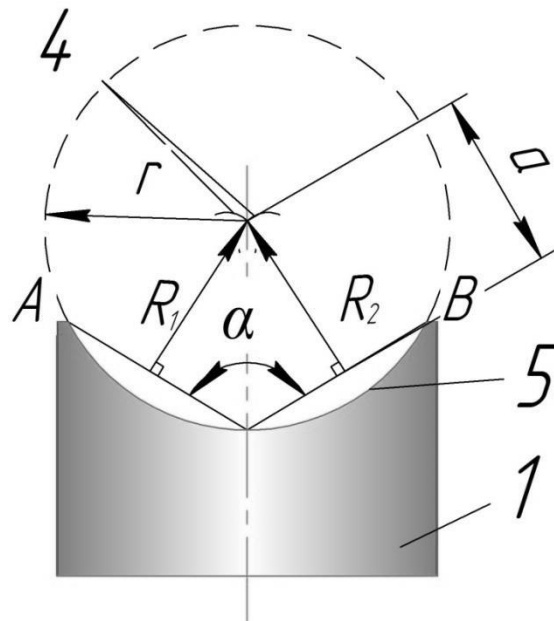


Рисунок 6.28 – Схема для определения геометрических параметров резца, режущая поверхность которого выполнена в виде продольной вогнутой окружности

Согласно проведенным аналитическим исследованиям (см. глава 2), в рабочей части призабойной зоны образуется некая среда, представляющая собой смесь очистного агента с разрушенной горной породой. Такое образование, находясь под резцом, оказывает определенной степени сопротивление внедрению резца. Полученные результаты указывают на необходимость исследования гидродинамических процессов возникающих в процессе бурения резцами *PDC* с вогнутой рабочей поверхностью с целью определения оптимальной схемы их установки в породоразрушающем

инструменте. Правильно подобранная схема раскладки резцов может способствовать повышению производительности бурения, создавая зону предразрушения за счет проникновения струи жидкости в породу и очистки забоя, а неверно – может привести к снижению параметров бурения, создавая дополнительное сопротивление внедрению резца в породу.

Область взаимодействия резца с породой – мелкогабаритная система исследования, для достоверного и доступного изучения гидродинамических процессов, протекающих под резцом *PDC*, принят метод компьютерного имитационного моделирования. Результаты моделирования показали, что при установке двух соседних резцов по технологии *Ulterro* (на встречу друг к другу), зона максимального давления скапливается между резцами, причем чем ближе располагаются резцы, тем давление жидкости между ними больше (рис. 6.29). Небольшой зазор между резцами ведет к созданию местных сопротивлений и такое гидробарическое состояние может привести к тому, что зазор между резцами омываться не будет. Учитывая, что фронтальное расположение резцов по технологии *Ulterro* ведет к смещению шлама именно в межрезцовое пространство, здесь при определенных геологических условиях может образоваться «пробка» шлама, которая при накоплении возможно приведет к прижегу.

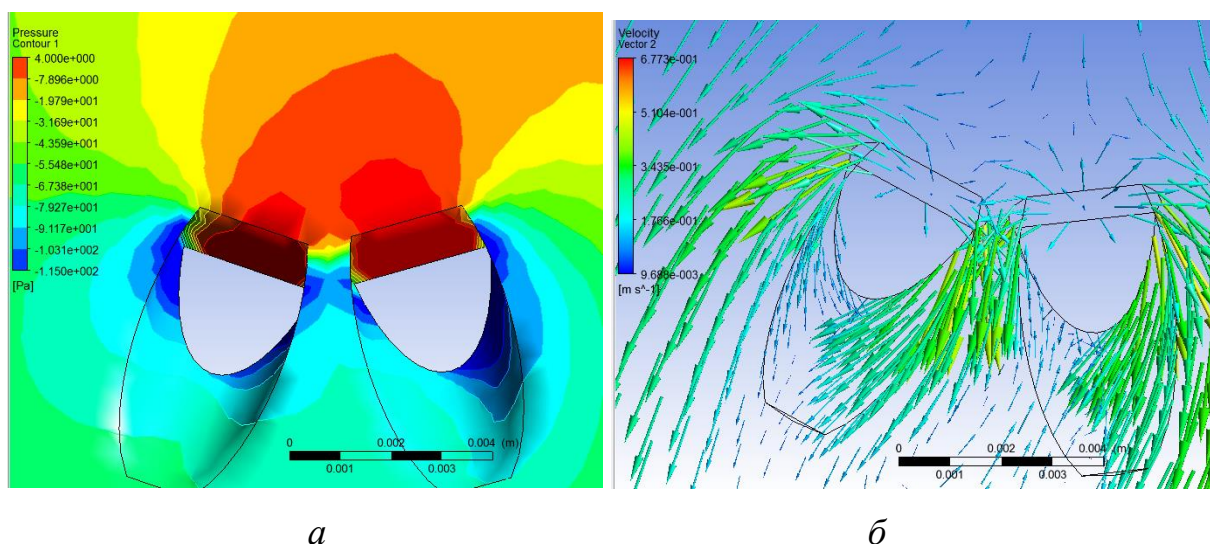


Рисунок 6.29 – Результаты моделирования гидродинамических процессов, протекающих на забое скважины при бурении породоразрушающим инструментом, армированным резцами *PDC* по технологии *Ulterro*: *a* – распределение давления в пределах двух смежных резцов; *б* – направление и скорость течения жидкости в пределах двух смежных резцов

Под резцом с вогнутой поверхностью режущей части с отрицательным передним углом установки также наблюдается распределение жидкой среды на зоны различного давления. При этом уменьшение угла α при большом значении переднего угла способствует концентрации зоны максимального давления в области контакта резца с породой (рис. 6.30, *б*), тем самым повышая интенсивность проникновения промывочной жидкости в породу. К тому же, как показали результаты компьютерного моделирования, значение переднего угла установки резца оказывает влияние на понижение давления под режущей частью резца.

При неизменно равных условиях, чем больше угол α , тем меньше область распределения зоны максимального давления (рис. 6.31). Увеличение угла α при неизменном переднем угле установки резца также способствует смещению зоны максимального давления жидкости в зону контакта резца с породой, при этом площадь максимального давления жидкости на резец

уменьшается, что с другой стороны способствует снижению сопротивления внедрению резца.

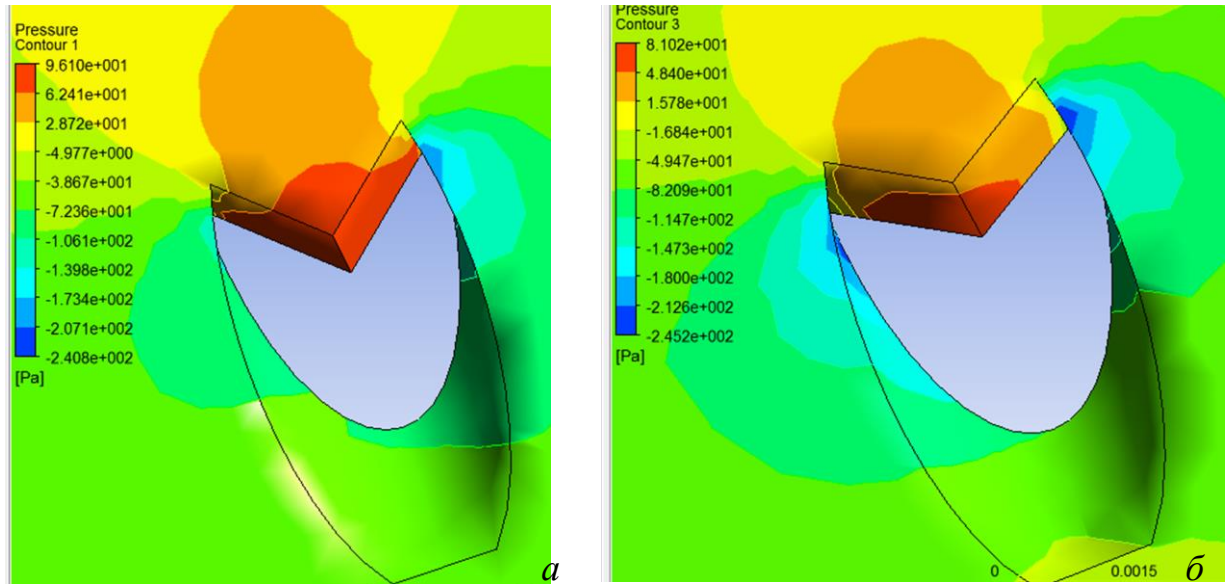


Рисунок 6.31 – Результаты моделирования гидродинамических процессов, протекающих при бурении резцом с вогнутой режущей гранью, вид со стороны контакта резца со средой при $\gamma_n = -25^\circ$: а – $\alpha=104^\circ$; б $\alpha=123^\circ$

Таким образом применение в вооружении бурового инструмента резцов с вогнутой режущей гранью обеспечивает гашение его поперечных колебаний, увеличивает ресурс резца, устраняя воздействие на него ударных нагрузок. К тому же предложенная форма поверхности резца с углублением в центре его режущей поверхности будет способствовать направлению струи промывочного агента, поступающего из промывочных каналов долота, строго в цент режущей грани (рис. 6.32), что обеспечит улучшенную очистку и охлаждения резца от шлама в самой нагруженной его части.

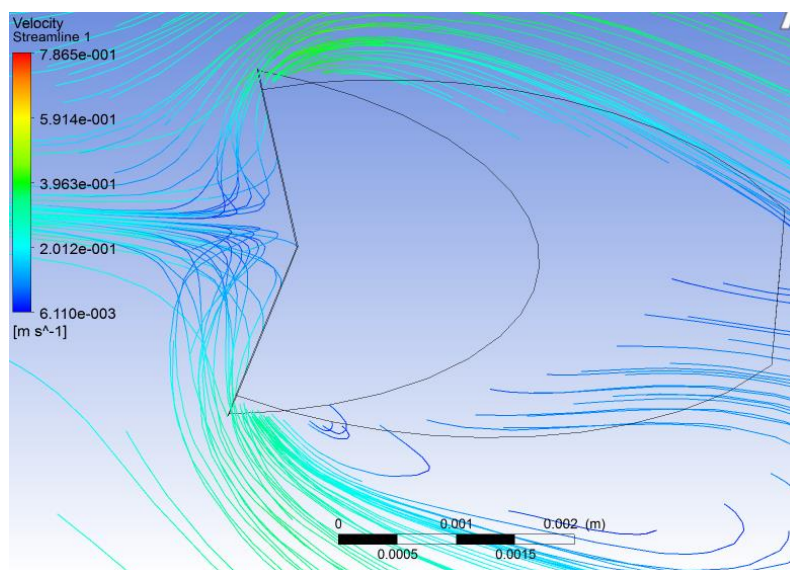


Рисунок 6.32 – Результаты компьютерного имитационного моделирования гидродинамических процессов в призабойной зоне резца PDC с вогнутой режущей поверхностью – линии тока жидкой среды в пределах призабойной зоны (вид со стороны забоя)

При этом появляется возможность, путем регулирования углов установки и угла вершины вогнутого конуса поверхности резца, добиваться оптимального положения так, чтобы при интенсивном направлении жидкости в зону контакта резца с породой, давление на поверхность резца было минимальным.

ВЫВОДЫ

В результате проведенной работы по проектированию конструкций алмазного бурового инструмента получены следующие основные результаты и сделаны выводы:

1. повышению ресурса алмазного бурового инструмента способствует использование при проектировании его конструкции принципов метода динамизации, рационализации и комбинирования;

2. условием динамизации режущих элементов алмазного бурового инструмента является повышение параметров радиуса резца и фрикционной способности его поверхности при одновременном снижении параметров радиуса оси вращения и коэффициента трения резца об ось;

3. оптимальная схема раскладки алмазных резцов может способствовать повышению производительности бурения, создавая зону предразрушения за счет проникновения струи жидкости в породу и очистки забоя, а нерациональная – к снижению параметров бурения, создавая дополнительное сопротивление внедрению резца в породу;

4. применение в вооружении бурового инструмента резцов с вогнутой режущей поверхностью обеспечивает гашение его поперечных колебаний, увеличивает ресурс резца, устраняя воздействие на него ударных нагрузок.

Таким образом, при разработке высокоресурсного бурового инструмента с резцами *PDC* одним из ключевых подходов к методам конструирования может служить принцип динамизации (вращения) буровых резцов, размещаемых не только в наиболее нагруженных частях торца долота или буровой головки (коронки), но по всей рабочей поверхности, а также за счёт изменения формы торцевой части резцов, например, вогнутой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненного автором исследования механизма разрушения горной породы алмазным резцом методами компьютерного моделирования, изложены новые научно-обоснованные подходы к разработке алмазного бурового инструмента, обладающего повышенным ресурсом и производительностью. Получены следующие основные *выводы*:

1. Для разработки высокоресурсного бурового инструмента необходим комплексный подход, включающий анализ механизма разрушения горной породы, явлений сопутствующих бурению, конструктивных особенностей инструмента и параметров процесса бурения.

2. Среда, образовавшаяся в призабойной зоне в процессе бурения, в зависимости от ее физико-механического состояния, геометрии размещения резцов и режима бурения, оказывая сопротивление, снижает глубину резания-скалывания алмазным резцом.

3. С ростом размера резца и скорости резания-скалывания горной породы степень сопротивления среды растёт.

4. При смещении механизма разрушения в сторону раздавливания, сопротивление среды снижается.

5. Динамическая составляющая сопротивления среды вызывает снижение коэффициента сопротивления горной породы резанию-скалыванию-раздавливанию резца, что связано с тем, что рост линейной скорости перемещения резца, вызванный повышением частоты вращения бурового инструмента, приводит к снижению глубины формируемой борозды разрушения.

6. Повышению эффективности бурения способствует снижение степени влияния среды и направление энергии гидродинамических процессов на создание зоны предразрушения горной породы перед резцом.

7. Для увеличения ресурса бурового инструмента необходимо автоматизированное управление процессом бурения на основе комплексной

оценки механизма разрушения горной породы, возникающей при этом механической скорости бурения, энергоёмкости и углубления бурового инструмента за один оборот.

8. Разработка бурового алмазного инструмента, основанная на принципах метода динамизации, комбинирования и рационализации способствует повышению эксплуатационных результатов бурового процесса.

9. Компьютерный метод моделирования – перспективный и надежный метод разработки алмазного бурового инструмента, позволяющий исследовать труднодоступные для эксперимента области системы резец-порода.

Результаты:

1. Установлена зависимость для определения глубины резания-скалывания горной породы алмазным резцом различного типа с учетом динамических процессов и сил сопротивления, возникающих при бурении скважин;

2. Установлена аналитическая зависимость влияния скорости резания-скалывания горной породы на коэффициент сопротивления призабойной среды с учётом гидродинамической составляющей процесса на работу алмазных резцов и динамическую глубину внедрения резца в горную породу.

3. Разработана методика управления процессом алмазного бурения, позволяющая повышать эксплуатационные результаты бурового процесса

4. Разработан алгоритм управления процессом бурения, обеспечивающий повышение эффективности использования и полную выработку ресурса алмазного бурового инструмента

5. Разработаны конструкции высокоресурсного бурового инструмента.

Перспективные направления

В качестве перспективы развития предложенного научного исследования взаимодействия алмазного резца с горной породой с целью повышения ресурса алмазного бурового инструмента являются:

- снижение сопротивления внедрению резца в породу наложением высокочастотных вибраций;
- разработка программного обеспечения для автоматизированного управления процессом алмазного бурения на основе комплексного анализа критериев бурового процесса

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Недра, – 1976. – 279 с.
2. Арсеньев Ю.А., Соловьев Н.В., Назаров А.П. Обоснование основных параметров механизма разрушения горных пород и конструктивных элементов лопастных долот. // Инженер нефтяник, – №2, – 2019. – С. 13-20.
3. Ашкинази Е.Е., Ральченко В.Г., Конов В.И., Шульженко А.А., Богданов Р.К., Гаргин В.Г., Соколов А.Н., Закора А.П. Буровая коронка: пат. Рос. Федерация № 2478767; заявл. 04.04.11; опубл. 10.04.13, Бюл. № 10. – 11 с.
4. Базанов, Л. Д. Исследования гидравлических сопротивлений при промывке геологоразведочных скважин малого диаметров. [Текст] – Автореф. дис. канд. техн. наук. – М.: МГРИ, – 1970. – 19 с.
5. Бакиев Р.Т., Пятницкий А.С. Применение *PDC* долот *ONYX* при бурении карбонатных и солевых отложений Ярактинского НГКМ в Иркутской области. // Инженерная практика. – 2011. – № 10. – С. 8–9.
6. Башкатов, Д. Н. Исследование процесса алмазного бурения с позиции системного подхода. Сб. Разработка и совершенствование методов и средств оптимизации и автоматизации процессов алмазного бурения, – ВИТР, – Л.: 1988, – с. 19–24.
7. Башкатов Д.Н. Обоснование угла установки резцов в долотах лопастного типа // Инженер-нефтяник. – 2010. – № 3. – С. 2–4.
Башкатов, Д. Н. Планирование эксперимента в разведочном бурении. [Текст] – М.: Недра, 1985. – 181 с.
8. Бессон А., Берр Б., Диллард С. Новый взгляд на режущие элементы буровых долот // Нефтегазовое обозрение. – 2002. – № 2 – 26 с.
9. Блинов Г.А., Васильев В.И., Глазов М.Г. Алмазосберегающая технология бурения. – Л.: Недра, 1989. – 184 с.
10. Блинов Г.А., Буркин О.А., Володин О.А. Техника и технология высокоскоростного бурения. – М.: Недра, 1982. – 408 с.

11. Богданов, Р. К. Сверхтвердые материалы в геологоразведочном инструменте [Текст] / Р. К. Богданов, А. П. Загора, А. М. Исонкин, О. А. Колобков, О. В. Ошкордин, К. А. Плеханов, С. Г. Фролов. – Екатеринбург: УГГА, 2003. – 138 с.
12. Богданов, Р. К. Буровая однослойная коронка с крупными синтетическими монокристаллическими алмазами / Р. К. Богданов, Загора А. П., **М. С. Попова**, М. С. Супрун, А. А. Каракозов // Инструментальный світ. – №1 (57) 2013. – С. 7-9
13. Богомоллов Р. М., Гринев А. М., Сериков Д. Ю. Буровое долото с алмазными резцами //Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2019. – №. 12. – С. 28-34.
14. Богомоллов Р. М., Мозговой Г. С., Сериков Д. Ю. Буровое долото *PDC* со стопорным устройством для вращающихся резцов //Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2021. – №. 4. – С. 11-15.
15. Борисов К. И. Научный метод оценки эффективности процессов динамического разрушения горных пород при бурении скважин современными инструментами режуще-скалывающего действия. Диссертация на соискание ученой степени доктора наук по специальности 25.00.14. – Технология и техника геологоразведочных работ, Томск, – 2012, – с. 140
16. Борисов К.И. Современные методы оценки сопротивления горных пород резанию-скалыванию при бурении долотами *PDC*. – Томск: Изд-во. ТПУ, 2013. – 166 с.
17. Борисов К.И. Актуальные научные и прикладные вопросы развития нового научного метода оценки свойств и эффективности динамического разрушения горных пород инструментами режуще-скалывающего типа *PDC* // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. – 2010. – № 3. – 14 с.
18. Бочечка А.А., Романко Л.А., Гаврилова В.С. Особенности спекания алмазных порошков различной дисперсности в условиях высокого давления // Сверхтвердые материалы. – 2007. – № 1. – С. 24–31.

19. Будюков, Ю. Е. Алмазный породоразрушающий инструмент [Текст] / Ю. Е. Будюков, В. И. Власюк, В. И. Спирин. – Тула : ИПП «Гриф и К», 2005. – 288 с.
20. Будюков, Ю. Е. Алмазный инструмент для бурения направленных и многоствольных скважин: Монография [Текст] / В. И. Власюк, В. И. Спирин. – Тула: «Гриф и К», 2007. – 176 с.
21. Буренков Н. Н., Третьяк А.А., Чихоткин А.В. Режущая часть долота PDC: оптимизация геометрических параметров/ Oil and Gas Journal Russia, 2013. –№5. – С. 56–58.
22. Буринтех. Каталог продукции [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <http://burintekh.ru/products/pdc/>. – 11 с. последняя дата обращения 12.16.2021.
23. Бугаев, А. А. Синтетические алмазы в геологоразведочном бурении [Текст] / А. А. Бугаев, В. Н. Лившиц, В. В. Иванов, Р. К. Богданов, В.Ф. Фадеев. – К., «Наук. думка», 1978. – 232 с.
24. Бугаев, А. А. Некоторые закономерности работы алмазной импрегнированной коронки. // Буровой инструмент из сверхтвердых материалов. – Киев.: ИСМ АН УССР, 1986. – с.74-79.
25. Будюков, Ю.Е. Рациональный принцип размещения алмазов в коронках для бурения геологоразведочных скважин./Ю.Е. Будюков, Б.С. Чугунов. Сб. «Алмазы», вып.4. НИИМАШ. – М.: 1968. – с.7-9.
26. Бурсервис. Каталог продукции. – 2015. – 6 с. URL: <https://www.burservice.ru/> (последняя дата обращения 28.04.2022)
27. Васильев А.С., Лашманов О.Ю. Основы программирования в среде *LabVIEW* – СПб: Университет информационных технологий, механики и оптики, 2015. – 82 с.
28. Васильев А. А., Сериков Д. Ю., Близнюков В. Ю. Совершенствование буровых долот различных типов //Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2019. – №. 6. – С. 28-31.

29. Власюк, В. И. Новые технологии в создании и использовании алмазного породоразрушающего инструмента. / В.И. Власюк, Ю.Е. Будюков, Л. К. Горшков, Л. И. Осецкий, С.Я. Рябчиков, В.И. Спирин. – М.: «Геоинформмарк», 2002 – 140 с

30. Винниченко, В. М. Технология бурения геологоразведочных скважин. Монография [Текст] / Н. Н. Максименко. – М. : ООО "Недра", 2000. – 278с.

31. ВНИИБТ – Буровой инструмент. Каталог продукции [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <http://www.vniibtbi.ru/upload/iblock/522/5222133e136601e8185e7c3da5fcf452.pdf>. – 31 с. (последняя дата обращения 20.07.2021).

32. Воздвиженский Б.И., Мельничук И. П., Пешалов Ю. А. Физико-механические свойства горных пород и влияние их на эффективность бурения. – М.: Недра, 1973. – 240 с.

33. Воздвиженский, Б. И. Повышение эффективности колонкового алмазного бурения / Б. И. Воздвиженский, Г. А. Воробьев, Л. К. Горшков и др. – М. : Недра, 1990. – 208 с.

34. Воздвиженский, Б. И. Разведочное бурение. Монография [Текст] / О.Н. Голубинцев, А.А. Новожилов. – М., Недра, 1979. – 830 с.

35. Волков, А. С. Буровой геологоразведочный инструмент. [Текст] / А.С. Волков. – М.: Недра, 1979. – 286 с.

36. Ганджумян, Р. А. Практические расчеты в разведочном бурении. [Текст] / Р.А. Ганджумян – М.: Недра, 1986. – 253с.

37. Гореликов, В. Г. Исследование механизма углубки скважин при алмазном бурении / В. Г. Гореликов, Г.А. Блинов // Техника, технология и организация геологоразведочных работ. – Москва, 1994. – С. 53-55.

38. ГОСТ 9206-80. Порошки алмазные. Технические условия (с Изменениями № 1, 2, 3) М.: Издательство стандартов, 1989

39. Гусман А.М., Вяхирев В.И., Левина А.Б. Новые подходы к конструкциям долот *PDC* для крепких пород // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. – 2010. – № 4. – С. 22–24.

40. Есьман, Б. И. Термогидравлические процессы при бурении скважин [Текст] / Б. И. Есьман, Г.Г. Габузов. –М.: Недра, 1991. – 216 с.

41. Жентичка М. В. Применение *PDC* долот *Smith Bits (Schlumberger)* при бурении скважин на Ванкорском месторождении // Инженерная практика. – 2012. – № 10. – С. 56.

42. Заневский, О. А. Получение крупнозернистых высокопрочных шлифпорошков алмаза для применения в буровом инструменте [Текст] / О. А. Заневский, С. А. Ивахненко, Г. Д. Ильницкая, А. П. Закора, Р. К. Богданов, А. А. Каракозов, **М. С. Попова** // Сверхтвердые материалы : науч.-теор. журн. / Ін-т надтвердих матер. ім. В. М. Бакуля Нац. акад. наук України. – К.: 2015. – Вип. 2. – 2015. С. 85-96.– ISSN 0203-3119

43. Зыбинский, П. В. Сверхтвердые материалы в геологоразведочном бурении: Монография [Текст] / П. В. Зыбинский, Р. К. Богданов, А. П. Закора, А. М. Исонкин. – Донецк: Норд-Пресс, 2007. – 244 с.

44. Илларионова, Т. М. Методика расчета гидравлических сопротивлений в алмазных коронках. [Текст] – в сб. Методика и техника разведки. – Л.: ВИТР, 1975, №97. – С 19-26.

45. Ильницкая Г. Д. Исследование и рекомендации по оснащению бурового инструмента крупными синтетическими алмазами [Текст] / Г. Д. Ильницкая, А. П. Закора, Р. К. Богданов, С. А. Ивахненко, О. А. Заневский, А. А. Каракозов, **М. С. Попова** // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сборник научных трудов. – Вып. 15. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, НАН Украины, 2012. – С. 56–62. – ISSN 2223-3938

46. Исаев, М. И. Основы прогрессивной технологии алмазного бурения геологоразведочных скважин / М. И. Исаев, П. В. Пономарев. – М.: Недра, 1975. – 288 с.

47. Июдин, П. Н. Применение электросверл для бурения шпуров по породам. [Текст] – Углетехиздат, 1957.

48. Казика, В. Ф. Один из аспектов расчета буровых коронок при проектировании [Текст] // Сб. науч. тр.: Применение синтетических алмазов в бурении. – Л.: ВИТР, 1991. – с. 38-47.

49. Калинин, А. Г. Разведочное бурение. Учеб. для вузов [Текст] / О.В. Ошкордин, В. М. Питерский, Н. В. Соловьев. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. – 748с.

50. Камминг Дж. Д. Руководство по алмазному бурению. – М.: Госгеолтехиздат, 1960. – 327 с.:ил.

51. Каракозов, А. А. Моделирование работы алмазных резцов однослойных коронок на забое и оценка влияния схемы раскладки алмазов на механическую скорость бурения / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, С.Н. Парфенюк, Р. К. Богданов, Загора А. П. // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Гірничо-геологічна». – Вип. 16(206). – Донецьк, ДонНТУ, 2012. – С. 162–166.

52. Каракозов, А. А. Разработка однослойных алмазных коронок с укороченными секторами / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, Р.К. Богданов, А.П. Загора // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент и технология его изготовления. Сб. научн. Трудов.- Киев: ИСМ им. Бакуля, 2016. – Вып.19. – С. 10-16.

53. Каракозов, А. А. Исследования и разработка конструкции однослойной буровой коронки с синтетическими алмазными монокристаллами [Текст] / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, Р. К. Богданов, Загора А. П. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент и технология его изготовления. Сб. научн. Трудов. – Киев: ИСМ им. Бакуля, 2014. – Вып.17. – С. 73-79.

54. Каракозов, А. А. Результаты исследований алмазного породоразрушающего инструмента для колонкового бурения скважин на основе синтетических монокристаллов с повышенной термостойкостью

[Текст] / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, С.Н. Парфенюк, Р. К. Богданов, Загора А. П. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Гірничо-геологічна». – Вып. 1(20). – Донецьк, ДонНТУ, 2014. – С. 132–137

55. Каракозов, А. А. Исследование теплового режима однослойной алмазной коронкой с синтетическими монокристаллами [Текст] / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, С.Н. Парфенюк, Р. К. Богданов, Загора А. П. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Гірничо-геологічна». – Вып. 1(22). – Донецьк, ДонНТУ, 2015. – С. 39–44

56. Калинин А.Г. Технология бурения разведочных скважин. / А.Г. Калинин, В.И. Власюк, О.В. Ошкордин, Р.М. Скрыбин.- М: Изд-во «Техника», ТУМАГРУПП, 2004. – 528 с.

57. Каракозов, А. А. О процессе взаимодействия алмазов с забоем скважины при работе однослойных коронок/ А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, Р. К. Богданов, Загора А. П. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент и технология его изготовления. Сб. научн. Трудов.- Киев: ИСМ им. Бакуля, 2011. – Вып.14. – С. 78-85.

58. Каракозов, А. А. О влиянии схем раскладки алмазов однослойных коронок на их нагружение при взаимодействии с забоем скважины / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, Р. К. Богданов, А. П. Загора // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2011». – Дніпропетровськ: НГУ, 2011. – С. 35 – 38.

59. Каракозов, А. А. О влиянии конструктивных параметров однослойной алмазной коронки на показатели разрушения породы на забое / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, Р. К. Богданов, А. П. Загора // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2011, №4(41). – С. 47-51.

60. Каракозов, А. А. Уточнение критерия удельной энергоёмкости объёмного износа при оценке эффективности процесса взаимодействия импрегнированной алмазной коронки с породой [Текст] / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, С.Н. Парфенюк, Р. К. Богданов, Загора А. П. // Наукові праці

ДонНТУ: Серія Гірничо-геологічна. – Донецьк: ДонНТУ, 2016. – № 2(25), 2016. С. 86-88

61. Каракозов, А. А. Однослойные алмазные коронки для бурения пород V-VIII (IX) категории по буримости [Текст] / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, С.Н. Парфенюк // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции «Геологоразведочное и нефтегазовое дело в XXI веке: технологии, наука и образование». – Алматы, КазННТУ, 2016. – С. 85-91. – ISBN 978-601-7529-48-2.

62. Каракозов А. А., **Попова М. С.**, Богданов Р. К., Загора А. П. Патент № 91720 Украина, МПК (2014.01) E21B 7/00. Алмазная однослойная буровая коронка: № u201402067: заявл. 28.02. 2014 : опубл. 10.07.2014 ; заявитель ДонНТУ. – 4 с.: ил.

63. Каракозов А. А., **Попова М. С.**, Богданов Р. К., Загора А. П. Алмазная однослойная буровая коронка: патент № 92032 Украина, МПК (2014.01) E21B 7/00. № u201402063: заявл. 28.02. 2014: опубл. 25.07.2014 /; заявитель ДонНТУ. – 5 с.: ил.

64. Каракозов, А. А. Однослойные алмазные коронки для бурения пород V-VIII (IX) категории по буримости [Текст] / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, С.Н. Парфенюк // Материалы Международной научно-практической конференции «Бурение в осложненных условиях», Санкт-Петербург, 4-6 октября 2016.

65. Каракозов А. А., **Попова М. С.**, Богданов Р. К., Загора А. П. Алмазная однослойная буровая коронка: патент № 108943 Украина, МПК E21B 10/36 (2006.01) E21B 10/46 (2006.01): № u20140755: заявл. 24.02. 2014: опубл. 25.06.2015; заявитель ДонНТУ. – 3 с.: ил.

66. Кардыш В.Г., Мурзаков Б.В., Окмянский А.С. Энергоемкость бурения геологоразведочных скважин. – М.: Недра, 1984. – 201 с.

67. Кичигин, А. Ф. Алмазный инструмент для разрушения крепких горных пород [Текст] / А. Ф. Кичигин, С. Н. Игнатов, Ю. И. Климов, В. Д. Ярема. – М., Недра, 1980, – 159 с.

68. Кожевников, А. А. Забойные факторы алмазного бурения геологоразведочных скважин [Текст] / А. А. Кожевников, С. В. Гошовский, И. И. Мартыненко и др. – Д.: ЧП «Лири ЛТД», 2006. – 264 с.

69. Кожевников, А. А. Разрушение горных пород на забое геологоразведочных скважин : Монография / А. А. Кожевников, С. В. Гошовский, И. И. Мартыненко, П. П. Вирвинский. – К.: укрГГРИ, 2006. – 146 с.

70. Кожевников, А. А. Тепловой фактор при бурении скважин: Монография [Текст] / С. В. Гошовский, А. Ю. Дреус, И. И. Мартыненко. – К.: укрГГРИ, 2008. – 166 с.

71. Кожевников, А. А. Численный анализ теплового состояния буровых алмазов [Текст] / А.А. Кожевников, А.Ю. Дреус // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. Выпуск 17. – Киев, 2014. – С. 23-25.

72. Козловский, Е. А. Справочник инженера по бурению геологоразведочных скважин: в 2-х томах [Текст] / Е. А. Козловский, В. Г. Кардыш, Б. В. Музаков, Г. А. Блинов, В. М. Питерский. – Том. 1. – М.: Недра, 1984. – 512 с.

73. Козловский, А. Е. Оптимизация процесса бурения: структура и элементы управления / А. Е. Козловский. – М., 2000.–187 с.

74. Корнилов Н.И., Блинов Г.А., Курочкин П.Н. Технология бурения скважин алмазным инструментом при высоких скоростях вращения. – М.: Недра, 1978. – 237 с.

75. Корнилов Н.И., Бухарев Н.Н., Киселев А.Т. Буровой инструмент для геологоразведочных скважин: справочник под ред. Н.И. Корнилова. – М.: Недра, 1990. – 395 с.

76. Королев А.Л. Компьютерное моделирование. – М.: БИНОМ. ЛЗ, 2013. – 230 с.

77. Кубасов, В. В. Новый способ изготовления породоразрушающего инструмента. / В.В. Кубасов В.И. Спирин, Ю.Е. Будюков. Приоритетные

направления науки и технологий: тезисы докладов XVI международной научн. - техн. конф.; под общ.ред. В.М. Панарина. – Тула: Изд-во «Инновационные технологии», 2014, – с.76-81.

78. Кувыкин С.И., Кагарманов Н.Ф. Механизм разрушения горных пород и проектирование режимов алмазного бурения. – Нефт. Хоз-во, 1965, – №1, – с. 12-18.

79. Кудряшов, Б. Б. Нагрев и охлаждение алмазной коронки при бурении [Текст] / , Ю. А. Оношко // Сборник «Методика и техника разведки» Л.: ОНТИ ВИТР. – 1964. – № 46. – С. 49-61

80. Кудряшов, Б. Б. Анализ и расчет температурного поля в теле алмазной коронки [Текст] // А. А. Яковлев // Бурение разведочных скважин в сложных условиях. Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В. Плеханова. – 1985. – Том 105. – С. 10-16

81. Лисовский А.Ф., Бондаренко Н.А. Термодинамическое исследование легирования композиции алмаз-WC-Co силицидами переходных металлов // Журнал сверхтвердых материалов. – 2012. – 34 (4). – С. 239-242.

82. Лысаковский В.В. НТНР-кристаллизация алмаза с использованием металлических раствориелей углерода, полученных методом порошковой металлургии / В.В. Лысаковский, С.А. Гордеев, С. А. Ивахненко, А. А. Заневский, А. В. Савицкий // Инструментальное материаловедение: Сборник научных трудов. – Вып.24. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2021.– С. 147-151.

83. Лшпкевич Ю. Ф., Асеева А. Е., Третьяк А. А. Разработка методики расчета наработки породоразрушающего инструмента с алмазно-твердосплавным вооружением //Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2010. – №. 12. – С. 2-5.

84. Магда Ю.С. *LabVIEW*: практический курс для инженеров и разработчиков. – М.:ДМК Пресс, 2012. – 208 с.

85. Маковой Н. Гидравлика бурения: пер. с рум. Н. Маковой. – М.: Недра, 1986. – 536 с.

86. Марамзин, А. В., Алмазное бурение на твердые полезные ископаемые. Технология работ [Текст] / А. В. Марамзин, Г. А. Блинов. – Л.: «Недра», 1977. – 248 с.

87. Нескоромных, В. В. Разрушение горных пород при бурении скважин алмазным буровым инструментом : монография / В. В. Нескоромных, **М. С. Попова**, Б. Лиу ; ред.: А. Я. Третьяк, А. Г. Вахромеев ; Сибирский федеральный университет, Институт горного дела, геологии и геотехнологий. – Красноярск : СФУ, 2020 (2020-09-29). – 265 с., 16.8 усл. печ. л. : граф., цв.ил. - Библиогр.: с. 256-263. – ISBN 978-5-7638-4413-9. – Изд. № 2020-12033. – Текст : непосредственный : электронный.

88. Нескоромных В.В. Алгоритм управления системой алмазного бурения / В.В. Нескоромных, **М.С. Попова**, З.Г. Зотов, Лиу Баочанг // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2022. – Т. 333. – № 2. – С. 81–89

89. Нескоромных В.В. Анализ влияния сил сопротивления на эффективность бурения инструментом типа *PDC* / В.В. Нескоромных, **М.С. Попова**, А.В. Чихоткин, А.Е. Головченко, Е.Е. Шубенина // Инженер-нефтяник. Научно-технический журнал. – 2020. – №1. – С. 16-23

90. Нескоромных В.В., Борисов К.И. Аналитическое исследование процесса резания-скалывания горной породы долотом с резцами *PDC* // Известия Томского политехн. ун-та. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 191–195.

91. Нескоромных В.В. Исследование сопротивления породы при бурении мелкорезцовым алмазным инструментом / В.В. Нескоромных, **М.С. Попова**, Лиу Баочанг // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2021. – Т. 332. – № 6. – С. 167–177

92. Нескоромных В.В. Влияние сил сопротивления на глубину резания-скалывания горной породы алмазным / В.В. Нескоромных, **М.С. Попова**,

А.Ю. Харитонов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 40–48

93. Нескоромных В.В. Искривление скважин в анизотропных горных породах: монография. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. – 204 с.

94. Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при бурении скважин: учеб. пособие. – М.: ИНФРА-М; Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. – 336 с.

95. Нескоромных В.В. Оптимизация в геологоразведочном производстве. – М.: ИНФРА-М; Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. – 199 с.

96. Нескоромных В.В. Определение глубины разрушения горной породы резцами *PDC* с учетом сопротивления среды / В.В Нескоромных, **М.С. Попова**, А.В. Чихоткин, А.Е. Головченко, Е.Е. Шубенина // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. Научно-технический журнал. – 2020. – №5 (329). – С. 23-27

97. Нескоромных В.В., Пушмин П.С. Методика оптимальных параметров режима и условий бурения скважин // Известия Сибирского отделения. Секция наук о Земле РАН – 2011. – №1 (38). – С. 151–157.

98. Нескоромных В.В. Методика проектирования долот с резцами *PDC*, учитывающая динамические процессы резания-скалывания горной породы и сопротивление среды / В.В Нескоромных, А.В. Чихоткин // Инженер-нефтяник. Научно-технический журнал. – 2020. – №2. – С. 13-18

99. Нескоромных В.В., **Попова М.С.**, Головченко А.Е. Применение материала нового поколения в качестве элементов современного породоразрушающего инструмента// Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море». – 2019. – №10. – С. 15–20.

100. Нескоромных В. В., Петенёв П. Г., Неверов А. Л. Разработка и экспериментальные исследования особенностей работы алмазной коронки для бурения в твердых анизотропных горных породах // Известия Томского политехн. ун-та. – Томск: Изд-во. ТПУ. – 2015. – № 4. – С. 30–40.

101. Нескоромных В.В., **Попова М.С.**, Парахонько Е.В. Разработка породоразрушающего инструмента с резцами *PDC* // Известия Томского

политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. № 2. – С. 131–138.

102. Нескоромных В.В., **Попова М.С.** Разработка алмазного инструмента с применением данных компьютерного моделирования и результатов системных исследований// Инженер-нефтяник. – 2018. – №3.– С. 18–23.

103. Нескоромных В.В. Основы системного подхода к проектированию бурового инструмента / В.В Нескоромных, **М.С. Попова** // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. Научно-технический журнал. – 2018. – №8. – С. 26-31.

104. Нескоромных В.В. Разработка методики управления процессом бурения на основе комплексного анализа критериев / В.В. Нескоромных, **М.С. Попова** // Записки Горного института. – 2019. – Т. 240. – С. 701-710.

105. Нескоромных В.В. Влияние поверхностно-активных веществ на искривление скважин при бурении в анизотропных горных породах/ В.В. Нескоромных, П.С. Пушмин, **М.С. Попова** // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2020. – 331. – № 9. – с. 146–158 (0,75/0,3 п.л.);

106. Нескоромных В.В. Гидродинамика при бурении импрегнированным породоразрушающим инструментом с эксцентриситетом режущей части торца матрицы / В.В. Нескоромных, П.Г. Петенев, **М.С. Попова**, И.А. Комаровский, А.Е. Головченко, Лиу Баочанг // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2020. – Т. 331. – № 11. – С. 176–185.

107. Нескоромных В.В. Гидродинамика процесса резания резцами *PDC* / В.В Нескоромных, **М.С. Попова** // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. Научно-технический журнал. – 2020. – №7 (331). – С. 13-15.

108. Нескоромных В.В. Методика управления процессом бурения и экспериментальные исследования сил сопротивления при бурении долотами

с резцами PDC / В.В. Нескоромных, **М.С. Попова**, П.Г. Петенев А.Е. Головченко, Лиу Баочанг // Записки Горного института. – 2020. – Т. 245. – С. 539-546.

109. Нескоромных В.В. Современные направления совершенствования бурового инструмента типа *PDC* / В.В. Нескоромных, Лиу Баочанг, Чжаоран Чен, **М.С. Попова**, П.Г. Петенев, А.Е. Головченко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2021. – Т. 332. – № 5. – С. 60–69

110. Нескоромных В.В. Влияние среды призабойной зоны скважины на эффективность разрушения горной породы резцом *PDC*/ В.В. Нескоромных, **М.С. Попова**, Лиу Баочанг // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2021. – Т. 332. – № 9. – С. 119–127

111. Новиков Н.В., Бондаренко В.П., Богданов Р.К. и др. Применение синтетических сверхтвердых материалов для бурения геоогоразведочных скважин // Техн., технол. И орг. Геол.-разв. Работ: Обзор ВНИИ экон. Минер. Сырья и геол.-разв. работ (ВИЭМС). М.. 1990, 45 с.

112. Новиков, Н. В. Физические свойства алмазов: Справочник [Текст] / Ю. А. Кочержинский, Л. А. Шульман, Т. Д. Оситинская и др. – Киев: Наукова Думка, 1987. – 188 с.

113. ОАО «Волгабурмаш»: надежный сервис для любых условий бурения [Электронный ресурс] // Бурение и нефть. – 2013. – № 6. – Режим доступа: <http://www.burneft.ru/archive/issues/2013-06/5>. (последняя дата обращения 13.03.2021).

114. Осипов А.С., Быков А.И., Колабылина Т.В. Спекание композита в системе алмаз–*TiN*–*WC/Co* при высоком давлении и высокой температуре // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент — техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. – Вып. 16. – Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля, НАН Украины, 2013. – С. 311–316.

115. Остроушко, И.А. Бурение твердых горных пород. – М.: Недра, 1966. – 289 с.: ил.

116. Пак М.С. Долота *Sting Blade* с алмазными коническими элементами // Бурение и нефть. – 2015. – № 6. – С. 51.

117. Патент Российской Федерации № 195564. Коронка для бурения: заявл. 08.10.2019; опубл. 31.01.2020 / Нескоромных В.В., Петенёв П.Г., **Попова М. С.**, Комаровский И.А.

118. Патент Российской Федерации на изобретение №2745546. Алмазная буровая коронка: № 2020133566 : заявл от 2020.10.12., опубл. 26.03.2021 / Нескоромных В.В., Попова М. С., Берзюков А.А., Бюл. №9.

119. Патент Российской Федерации № 2715574. Буровая коронка: Заявл. 22.10.2019; опубл. 02.03.2020./ Нескоромных В.В., Вахромеев А.Г., **Попова М.С.**

120. Патент Российской Федерации № 190545. Долото для бурения: Заявл. 12.04.2019; опубл. 03.07.2019 / Нескоромных В.В., **Попова МС.**, Парахонько Е.В.

121. Патент Российской Федерации № 2702787. Буровая коронка: Заявл.04.03.2019, опубл. 11.10.2019. / Нескоромных В.В., **Попова МС.**, Парахонько Е.В.

122. Патент Российской Федерации № 2764761. Долото для бурения: заявл. 25.02.2021; опубл. 21.01.2022 / Нескоромных В.В., **Попова МС.**

123. Патент Российской Федерации № 2577351. Стабилизирующая кольцевая буровая коронка: Заявл. 26.01.15; опубл. . 20.03.16. / Третьяк А. А. , Литкевич Ю. Ф., Савенок О. В., Туровский И. Г. // Бюл. № 8. – 5 с.

124. Патент Российской Федерации № 2735319. Буровое долото с резцами PDC: Заявл. 19.07.19; опубл. . 30.10.19. / Богомоллов Р.М.

125. Пинчук, Н. П. Методы повышения эффективности бурения геологоразведочных скважин (опыт концерна «Геологоразведка») [Текст] / Н. П. Пинчук, В. А. Кудря, И. П. Мельничук. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2000. – 536 с.

126. Пономарев, П. П. Алмазное бурение трещиноватых пород. – Л. : Недра, 1985. – 144 с.

127. **Попова, М. С.** Результаты компьютерного моделирования температурного режима алмазного бурового инструмента // Научно-технический журнал «Инженер-нефтяник». – 2018. – №2. – С. 23-26.

128. **Попова, М.С.** Учет влияния конструктивных и технологических факторов на температурный режим работы однослойной алмазной коронки / Проблемы геологии и освоения недр: труды XXII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 155-летию со дня рождения академика В.А. Обручева, 135 - летию со дня рождения академика М.А. Усова, основателей Сибирской горно-геологической школы, и 110-летию первого выпуска горных инженеров в Сибири. Том 2 / Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2018. – С. 514-516.

129. **Попова, М.С.** Течение жидкости на забое скважины при бурении алмазной однослойной коронкой / Попова М.С., Остапюк А.Ю. // Проблемы недропользования: Сборник научных трудов. Часть I / Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 2018. – С. 87-89.

130. **Попова М.С.** Обоснование параметров однослойных коронок, армированных синтетическими алмазными монокристаллами с повышенной термостойкостью: дис... канд. техн. наук / Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 2020. 152 с.

131. **Попова, М. С.** Исследование гидравлических и термодинамических процессов при бурении однослойной алмазной коронкой с синтетическими монокристаллами [Текст] / М. С. Попова, С.Н. Парфенюк // Проблемы геологии и освоения недр : труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета. Том 2 / Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – с. 769-771.

132. **Попова, М. С.** Разработка алмазного породоразрушающего инструмента на основе синтетических монокристаллов для бурения

геологоразведочных скважин [Текст] // Проблемы недропользования: Сборник научных трудов. Часть I / Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 2016. 214 с. (Международный форум –конкурс молодых ученых. 20-22 апреля 2016г) С. 47–50.

133. **Попова, М. С.** Разработка однослойных алмазных коронок с укороченными секторами [Текст] / М. С. Попова, А.А. Каракозов, Р.К. Богданов, А.П. Загора // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент и технология его изготовления. Сб. научн. Трудов.- Киев: ИСМ им. Бакуля, 2016. – Вып.19. – С. 10-16.

134. **Попова, М. С.** Развитие теоретических моделей работы однослойных алмазных коронок на забое скважин [Электронный ресурс] // Инновационные перспективы Донбасса, г. Донецк, 2017 г. Т. 7: Перспективные технологии в геологоразведочной и нефтегазовой отраслях, геодезии и маркшейдерии. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – 67 - 70 С. – URL: <http://ipd.donntu.org/> (дата обращения: 25.04.2018)

135. **Попова М.С.** Компьютерное моделирование процессов, протекающих при бурении скважин / **М.С. Попова**, А.Ю. Харитонов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. - № 12. – С. 18–27

136. Пятницкий А.С., Жентичка М.В. Возможности второго поколения резцов *ONYX* для долот *PDC* // Инженерная практика. – 2010. – № 10 – С. 108.

137. Разрушение горных пород инструментом из сверхтвердых материалов: сборник научных работ. – ИСМ АН УССР, Киев, 1980 г. – 125 с.

138. Ребрик, Б. М. Бурение инженерно-геологических скважин. Справочник [Текст] / Б.М. Ребрик. – М.: Недра, 1990. – 336 с.

139. Рябчиков, С.Я. Повышение износостойкости породоразрушающего инструмента различными физическими способами. Обзор МГП «Геоинформмарк», М.: 1993.-36 с.:ил

140. Садыков Г.С., Новожилов Б.А, Козловский А.Е., Воробьев Г.А. Способ заточки алмазной коронки // Патент SU № 1716074, E21B 10/48, от 29.02.1998 г. Бюд.№8.
141. Станишевский, А. С. Режимы колонкового бурения. [Текст] // Труды ВИТРа, выпуск 27. – Ленинград, 1960.
142. Сериков Д.Ю., Гаффанов Р.Ф. Исследование напряженно-деформируемого состояния двух смежных центробежно-объемного-армированных зубьев вооружения шарошечного бурового инструмента // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2018. – №9. – С. 42–47.
143. Соловьев Н.В., Чихоткин В.Ф., Богданов Р.К., Загора А.П. Ресурсосберегающая технология алмазного бурения в сложных геологических условиях. – М.: Изд-во ВНИИОЭНГ, 1997. – 329 с.
144. Соловьев Н.В., Исонкин А.М., Богданов Р.К. Механизм разрушения горной породы и определение составляющих сил ее резания буровым инструментом, оснащенным алмазно-твердосплавными пластинами // Инженер-нефтяник. – 2010. – № 1. – С. 35.
145. Соловьев, Н. В. Основы конструирования алмазного породоразрушающего инструмента / Н.В. Соловьев Н.В., В.Ф. Чихоткин, В.И. Власюк, Р.А. Ганджумян и др. – М.: МГГА, 2000. – 111 с.:ил.
146. Спивак А.И., Попов А.Н. Разрушение горных пород при бурении скважин: учебник для вузов.– 4-е изд., перераб. и допол. – М.: Недра, 1986. – 208 с.
147. Сологуб, С. Я. Результаты лабораторных и промышленных исследований резцов и коронок торцового резания. [Текст] // Сборник трудов «Электровращательное бурение шпуров и скважин в крепких породах» Материалы 1-го координационного совещания состоявшегося в г.Фрунзе. – 1963.
148. Страбыкин Н.Н. Техника бурения взрывных скважин в мерзлых породах. – М.: Недра, 1989. – 172 с.

149. Сулакшин, С. С. Разрушение горных пород [Текст]/ С. С. Сулакшин. – Томск: ТПУ, – 1994. – 100 с.

150. Технология «KymeraTM» [Электронный ресурс]. – Март 2013. — Режим доступа: <http://www.eric siegmund.com/fireant/2013/03/130306kymerabit.html> (последняя дата обращения 20.08.2019).

151. Тревис Дж. Кринг. *LabVIEW* для всех: 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ДМК Пресс, 2011.– 904 с.

152. Третьяк, А. А. Теоретическое обоснование, разработка конструктивных параметров и технологии бурения скважин коронками, армированными алмазно-твердосплавными пластинами : автореферат дис. ... доктора технических наук : 25.00.14 / Третьяк Александр Александрович; [Место защиты: Рос. гос. геологоразведоч. ун-т им. С. Орджоникидзе (РГГРУ)]. - Москва, 2017. - 42 с.

153. Третьяк А.Я., Попов В.В., Гроссу А.Н., Борисов К.А. Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 8 – С. 225–230.

154. Цысарь А.М. Зависимость статической прочности крупных монокристаллов синтетических алмазов типа Па октаэдрического габитуса от их размера / А.М. Цысарь, А.П. Закора, С.А. Ивахненко, Г.Д. Ильницкая, О.А. Заневский, С.А. Гордеев // Инструментальное материаловедение: Сборник научных трудов. – Вып.24. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2021.– С. 169-174.

155. Цыпин, Н. В. Износостойкость композиционных алмазосодержащих материалов для бурового инструмента [Текст] / Н. В. Цыпин. – К. : Наук. думка, 1983. – 191 с.

156. Чихоткин, В. Ф. Исследование техники и технологии бурения геолого-разведочных скважин и разработка нового поколения алмазного породоразрушающего инструмента [Текст] / В. Ф. Чихоткин. – М.: ОАО

«ВНИИОЭНГ», 1997. – 241 с.

157. Чулкова В.В. Разработка методических и технологических решений по выбору долот *PDC* с усиленным антивибрационным вооружением: дис. канд. техн. наук. – М., 2017 – 141 с.

158. Шамшев, Ф. А. Технология и техника разведочного бурения. / Ф.А. Шамшев, С.Н. Тараканов, Б.Б. Кудряшов, Ю.М. Парийский, А.М. Яковлев – М.: Недра, 1983. – 565 с.:ил.

159. Шерстюк, О. И. Исследование и разработка метода оперативного управления процессом бурения скважин в твердых породах. [Текст] – Автореф. дис. канд. техн. наук. – Л., 1982. –24 с.

160. Шрейнер, Л. А. Физические основы механики горных пород. [Текст] – Гостоптехиздат, 1950.

161. Шульженко А.А., Гаргин В.Г., Соколов А.Н. Свойства оксидной оптической нанокерамики, полученной, полученной в условиях высокого давления и температуры// Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент — техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. – Вып. 17. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, НАН Украины, 2014. – С. 340–349.

162. Эйгелес Р.М. Разрушение горных пород при бурении. – М.: Недра, 1970. – 232 с.

163. Aalizad S. A., Farshad R. Prediction of penetration rate of rotary-percussive drilling using artificial neural networks - a case study. // Archives of Mining Sciences. – 2012. – Vol. 57. – № 3.

164. ANSYS, Inc. – Corporate Homepage (Engineering Simulation for the 21st Century). – URL: <http://www.ansys.com>. (последняя дата обращения 14.04.19)

165. Belmonte M., Ramírez C., González-Julián J., Schneider J., Miranzo P., Osendi M.I. The beneficial effect of graphene nanofillers on the tribological performance of ceramics // Carbon. – 2013. – 61. – P. 431-435.

166. Boland J.N., Li X.S. Microstructural Characterisation and Wear Behaviour of Diamond Composite Materials // *Materials*. – 2010. – 3 (2). – P. 1390-1419.

167. Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2002. – 39(1). – P. 41–58.

168. Cocorandu, M. O metoda de determinare a indicilor tehnico-ekonomici de foray. // *Petrol si Gaze*, 1958, 9 an № 6.

169. Crostack H.A., Selvadurai-Lassl U., Tillmann W., Gathen M., Kronholz C., Wroblewski T., Rothkirch A. Residual Stresses in Sintered Diamond-Cobalt Composites // *Materials Science Forum*. – 2006. – 524-525. – P. 787-792.

170. Cutter having shaped working surface with varying edge chamfer: Patent 8739904 US. Fil. 10.12.2013; Publ. 03.06.2014.

171. Dong G., Chen P. 3D numerical simulation and experiment validation of dynamic damage characteristics of anisotropic shale for percussive-rotary drilling with a full-scale PDC bit // *Energies*. – 2018. – 11(6). – 1326.

172. Drill bit: Patent 2020/0149350 A1 US. Fil. 9.11.2019; Pub. Date: 14.05. 2020.

173. Kivade S. B., Murthy Ch. S. N., Vardhan H. Laboratory Investigations on Percussive Drilling. // *Journal of The Institution of Engineers*. – 2013. – Vol. 94. – № 2.

174. Liu S., Han L., Zou Y., Zhu P., Liu B. Polycrystalline diamond compact with enhanced thermal stability // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2017. – 33 (11). – P. 1386-1391.

175. Liu Y., Hu C., Feng W., Men J., Cheng L., Zhang L. Microstructure and properties of diamond/SiC composites prepared by tape-casting and chemical vapor infiltration process // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2014. – 34 (15). – P. 3489-3498.

176. Liu Y., Hu C., Men J., Feng W., Cheng L., Zhang L. Effect of diamond content on microstructure and properties of diamond/SiC composites prepared by

tape-casting and CVI process // Journal of the European Ceramic Society. – 2015. – 35 (8). – P. 2233-2242.

177. Li J., Yue W., Qin W., Wang C. Approach to controllable tribological properties of sintered polycrystalline diamond compact through annealing treatment // Carbon. – 2017. – 116. – P. 103-112.

178. Llorente J., Belmonte M. Friction and wear behaviour of silicon carbide/graphene composites under isooctane lubrication // Journal of the European Ceramic Society. – 2018. – 38 (10). – P. 3441-3446.

179. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design / Zhijiu Ai, Yiwei Han, Yuchun Kuang, Yuanji Wang and Mingming Zhang // Advances in Mechanical Engineering, 2018, Vol. 10(6) 1–12

180. Ramirez C., Miranzo P., Belmonte M., Osendi M.I., Poza P., Vega-Diaz S.M., Terrones M. Extraordinary toughening enhancement and flexural strength in Si₃N₄ composites using graphene sheets // Journal of the European Ceramic Society. – 2014. – 34 (2). – P. 161-169.

181. Saadati M., Forquin P.A., Weddfelt K., Larsson P.L., Hild F. Granite rock fragmentation at percussive drilling – experimental and numerical investigation // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 2014. – 8 (8). – P. 828-843.

182. Saksala T. 3D numerical modelling of bit-rock fracture mechanisms in percussive drilling with a multiplebutton bit // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 2013. – Vol. 3. – P. 309–324.

183. Seiner H., Sedlák P., Koller M., Landa M., Ramírez C., Osendi M.a.I., Belmonte M. Anisotropic elastic moduli and internal friction of graphene nanoplatelets/silicon nitride composites // Composites Science and Technology. – 2013. – 75. – P. 93-97.

184. Stinger. Алмазный конический элемент. За гранью возможностей // Инженерная практика. – 2013. – № 11. – Режим доступа: <http://lib.glavteh.ru/publicationreader/303/?folder=demo#page/1/mode/1up>.

185. Stratapax drill blanks & Geoset drill diamond. –

www.abrasivesnet.com/en/product/mbs/strata/down/DI%20Stratapax.pdf

186. Shin J.-H., Hong S.-H. Fabrication and properties of reduced graphene oxide reinforced yttria-stabilized zirconia composite ceramics // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2014. – 34 (5). – P. 1297-1302.

187. Su O., Ali Akcin. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2011. – 48(3). – P. 434–442.

188. Teale R. The concept of specific energy in rock drilling // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 1965. – 2(1). – P. 57–73.

189. Tran M. Разработка конструкций долот при помощи использования программных средств// *Нефтегазовые технологии*. – 2008. – № 3. – С. 32.

190. Varel International. Каталог продукции [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.varelintl.com/ru/Oil-and-Gas/PDC-Drill-Bits/>. (последняя дата обращения 25.06.2021)

191. Huang H., Lecampion B., Detournay E. Discrete element modeling of tool-rock interaction I: Rock cutting // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. – 2013. – 37(13).– P. 1913–1929.

192. Jaworska L., Szutkowska M., Klimczyk P., Sitarz M., Bucko M., Rutkowski P., Figiel P., Lojewska J. Oxidation, graphitization and thermal resistance of PCD materials with the various bonding phases of up to 800°C // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2014. – 45. – P. 109-116.

193. Yamashita M., Nishii T., Mizutani H., Resistivity Measurement by Dual-Configuration Four-Probe Method // *Japanese Journal of Applied Physics* 42. – 2003. – Part 1, No. 2A. – P. 695-699.

194. Zanevskii, O. A. Production of coarse-grained high-strength microgrits to be used in drilling tools / O. A. Zanevskii, S. A. Ivakhnenko, G. D. Il'nitskaya, A. P. Zakora, R. K. Bogdanov, A. A. Karakozov, M. C. Popova // *Journal of Superhard Materials*, March 2015. – Volume 37, Issue 2. – PP. 132-139.

195. Zhang X., Zhang S., Luo Y., Wua D. Experimental study and analysis on a fluidic hammer – an innovative rotary-percussion drilling tool // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. vol. 173. – P. 362–370.



吉林大学 建设工程学院

College of Construction Engineering, Jilin University

No.938, Ximinzhu Street, Changchun City, Jilin Province, China, 130021, Tel. +86-431-88502066, Fax: +86-431-88502337

ACT

of implementing the results of a doctoral dissertation of Popova Marina Sergeevna on the topic «The scientific foundations of developing a diamond drilling tool based on the study of the mechanics of the process of destruction of rocks and computer modeling methods»,

Within the framework of the international agreement No. 04.05.03 / 86-20.18 dated 18.09.2020 between State Higher Education Institution «Siberian Federal University», Russia and Jilin University, China, on the basis of scientific research presented in the dissertation of Popova M.S., joint scientific work was carried out, a technique for designing a diamond rock cutting tool has been developed, the designs of diamond drilling tools have been obtained.

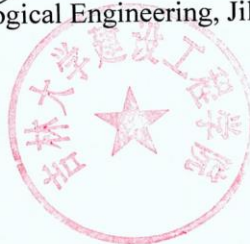
As a result of joint activities, patents for inventions were obtained; 7 scientific articles published in international journals included in the Scopus database, monograph published.

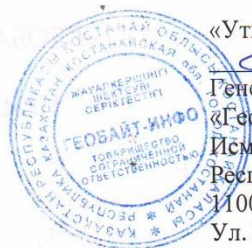
The results of the dissertation work were used and served as the basis for the implementation of grants (projects) Research on Nanomaterials Dispersion Strengthened Impregnated Diamond Bits (funded by Education Department of Jilin Province, China) and Biomimetic Design and Strengthening Mechanism of Polycrystalline Diamond Compacts for Hard Rock Drilling (funded by National Natural Science Foundation of China).

Prof. Baochang Liu

Head of Department of Drilling and Geological Engineering, Jilin University, China

02-04-2022





«Утверждаю»

Генеральный директор ТОО
«Геобайт-Инфо»
Исмаилов У.Ж.
Республика Казахстан
110000 гор. Костанай
Ул. Гоголя 75А
main@geobyte.kz

Технический акт

С 01.09.2020. по 01.10.2020 на участке буровых работ ТОО «Геобайт-Инфо», проводились испытания буровых долот на основе *PDC* диаметром 215,9 мм.

В цель исследований докторанта Поповой М.С. входило бурение скважин с V-VII категорией пород по буримости (аргиллиты, алевролиты, диориты).

Экспериментальные долота были армированы пластинами *PDC* различного диаметра: 4 и 13 мм.

При проведении экспериментов изучалось влияние диаметра пластин *PDC* на механическую скорость бурения в одинаковых условиях.

При бурении долотом, армированного пластинами *PDC* с диаметром 4 мм, средние значения показателя механической скорости бурения составили 16 м/час.

При бурении долотом, армированного пластинами *PDC* с диаметром 13 мм средние значения показателя механической скорости бурения составили 14, 75 м/час.

При работе долота вели себя стабильно. Уводок в сторону замечено не было.

Во время испытаний долота, армированного пластинами *PDC* с диаметром 13 мм, приходилось корректировать осевую нагрузку в сторону увеличения за счет образующихся в процессе бурения призабойных сопротивлений.

Рекомендации: результаты исследований внедрять при дальнейшем проектировании технологии бурения скважин.

механическую скорость бурения в одинаковых условиях.

Начальник партии _____ Игнатьев В. В.

Буровой мастер _____ Шель Д. П.

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Заст. директора

ІНМ НАН України

т.н. Клименко С.А.

2013 р.



“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Головний інженер

ДГП “Донецькгеологія”

Карелов М.І.

2013 р.

**ТЕХНІЧНИЙ АКТ****виробничих випробувань дослідних бурових коронок типу БСО-1 виробництва****Інституту надтвердих матеріалів НАН України**

Комісія у складі :

1. Голова комісії - начальник ГРП ДГП “Донецькгеологія”

Алєфіренко А.М.

2. Члени комісії - техрук ГРП ДГП “Донецькгеологія”

Резванов М.В.

- старший науковий співробітник Інституту надтвердих
матеріалів НАН України

Закора А.П.

- аспірант кафедри ТТБС Донецького Національного
технічного університету

Попова М.С.

Склали цей акт про наступне.

У період вересня - жовтня 2013 р. на бурових об'єктах ДГП “Донецькгеологія” проводилися випробування бурових коронок типу БСО-1 діаметром 93 мм виробництва ІНМ НАН України за розробленою ІНМ сумісно з кафедрою ТТБС ДонНТУ конструкцією.

Роботи проводилися з метою перевірки працездатності бурових коронок, оснащених крупними термостійкими монокристалами синтетичних алмазів розміром 1620/1250 мкм і розроблених в ІНМ НАН України сумісно з кафедрою ТТБС ДонНТУ за темою № 0966 .

Виготовлені ІНМ НАН України бурові коронки типу БСО-1 діаметром 93 мм кількістю 5 одиниць були передані на випробування у ДГП “Донецькгеологія” згідно акту здачі-приймання № 35 від 10 вересня 2013 р.

Випробування коронок типу БСО-1 діаметром 93 мм проводили при бурінні планових геологорозвідувальних свердловин на верстаті УКБ-4С в породах VII - IX категорій за

буримістю (пісковики, вапняки) з використанням одинарного колонкового снаряда. За базу порівняння були прийняті серійні бурові коронки типу 01А3 діаметром 93 мм. При цьому використовувалися такі режими буріння:

- частота обертання 435 хв.⁻¹;
- осьове навантаження 1200 даН;
- витрати промивної рідини 60 дм³/хв.

Результати порівняльних випробувань дослідних і серійних коронок наведені в таблиці.

Таблиця. Результати порівняльних випробувань коронок типу БСО-1 діаметром 93 мм та 01А3 діаметром 93 мм

Тип інструменту	Кількість, шт	Середні показники буріння	
		Механічна швидкість буріння, м/г	Проходка на коронку, м
БСО-1 Ø 93	5	2,5	15,4
01А3 Ø 93	5	1,5	9,4

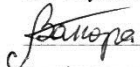
Наведені в таблиці результати виробничих випробувань свідчать, що бурові коронки типу БСО-1 діаметром 93 мм, оснащені крупними термостійкими монокристалами синтетичних алмазів розміром 1620/1250 мкм, перевершують серійні коронки 01А3 діаметром 93 мм по механічній швидкості буріння в 1,67 рази і за проходкою на коронку (по зносостійкості) в 1,64 рази.

Комісія зазначає, що за результатами випробувань коронки типу БСО-1 діаметром 93 мм можуть бути рекомендовані для буріння свердловин в породах VII - IX категорії за буримістю.

Випробувані в умовах ДГП "Донецькгеологія" бурові коронки типу БСО-1 діаметром 93 мм в кількості 5 шт. повністю відпрацювали свій ресурс, не підлягають рекуперації і до подальшої експлуатації непридатні.

Від ІНМ НАН України

Ст. науковий співробітник

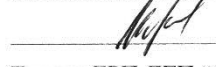
 Закора А.П.

Аспірант кафедри ТТБС ДонНТУ

 Попова М.С.

Від ДГП "Донецькгеологія"

Начальник ГРП ДГП "Донецькгеологія"

 Алсфіренко А.М.

Техрук ГРП ДГП "Донецькгеологія"

 Резванов М.В.