

*На правах рукописи*



**Попова Марина Сергеевна**

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

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

**Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

**г. Красноярск 2022 г.**

Работа выполнена на кафедре технологии и техники разведки в ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (СФУ).

- Научный консультант:** **Нескоромных Вячеслав Васильевич**  
доктор технических наук, профессор, член-корр. РАН, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», заведующий кафедрой технологии и техники разведки
- Официальные оппоненты:** **Богомолов Родион Михайлович**  
доктор технических наук, профессор, заслуженный машиностроитель РФ, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», профессор кафедры «Технология Машиностроения»
- Спирин Василий Иванович**  
доктор технических наук, ООО «ПРОЕКТЦЕНТР», главный научный сотрудник
- Сериков Дмитрий Юрьевич**, доктор технических наук, ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», доцент кафедры стандартизации, сертификации и управления качеством производства нефтегазового оборудования
- Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»), г. Иркутск

Защита состоится «7» сентября 2022г. в 11-15 на заседании диссертационного совета Д 212.121.09 на базе Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, дом 23 в аудитории 4-73.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе и на сайте [https://www.mgri.ru/science/scientific-and-innovative-activity/dissertation-council/download/Diss\\_Popova\\_MS.pdf](https://www.mgri.ru/science/scientific-and-innovative-activity/dissertation-council/download/Diss_Popova_MS.pdf)

Автореферат разослан «7» июня 2022г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук, доцент



А.Л. Вильмис

**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<sup>-1</sup>).

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 *IT*-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., Спиринов 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*<sup>TM</sup> 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 *IT*-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 ИТ-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 «Перспектив Свободный» (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 – Наукам 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.

### **Основное содержание работы**

**Во введении** приводится общая характеристика работы, обосновывается ее актуальность, определяется цель, идея, задачи, излагаются защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе** выполнен анализ современного состояния научных исследований механизма разрушения горной породы и методов проектирования параметров алмазного бурового инструмента, дан обзор актуальных конструкций алмазного бурового инструмента.

**Во второй главе** представлена теория механизма разрушения горной породы алмазным резцом различного типа (*PDC*, синтетического монокристалла, мелкого алмаза) с учетом процессов и явлений, протекающих при бурении на забое скважины. Приведена схема распределения сил, воздействующих на работающий резец в процессе бурения с учетом сопутствующих гидродинамических процессов. Описана среда, возникающая в призабойной зоне, обосновано ее влияние на глубину резания-скалывания горной породы алмазным резцом. Выведены формулы определения динамической глубины резания-скалывания-раздавливания породы алмазным кристаллом и резцом типа *PDC* с учетом сил сопротивления и динамических процессов, возникающих при бурении скважин.

**В третьей главе** представлено компьютерное моделирование механики разрушения горных пород, гидродинамических, гидробарических процессов, сопутствующих бурению. Описаны этапы разработки и алгоритм программного обеспечения, используемого для проведения компьютерного

моделирования процесса взаимодействия резца с породой. Представлены результаты компьютерного моделирования и выполнен их анализ, сделаны выводы.

**В четвертой главе** описаны экспериментальные исследования влияния призабойной среды на результаты алмазного бурения, сделан анализ полученных данных.

**В пятой главе** описана методика исследования процесса разрушения горной породы по углублению за один оборот бурового инструмента на забое. Представлен алгоритм управления процессом бурения с целью оптимизации эффективности бурения и ресурса алмазного породоразрушающего инструмента.

**В шестой главе** показаны итоги внедрения результатов научного исследования при разработке породоразрушающего инструмента. Приведены конструкции высокоресурсного бурового инструмента, определены основные подходы к методам конструирования, способствующие повышению ресурса инструмента и его производительности.

**В заключении** сделаны выводы, даны рекомендации по использованию полученных научных выводов, определены перспективы дальнейшего развития предложенного научного направления

**Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях.**

**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.**

Согласно схеме механизма разрушения породы (рис. 1), на алмазный резец, в случае реализации резания-скалывания-раздавливания породы воздействует система разнонаправленных сил.

В процессе бурения на алмазный резец действует осевая ( $P$ ) и тангенциальная силы. Направление и величина их результирующей ( $R$ ) определяет характер воздействия резца на забой. Обязательным условием процесса разрушения породы является образование ядра сжатия 4 и трещины отрыва 5.

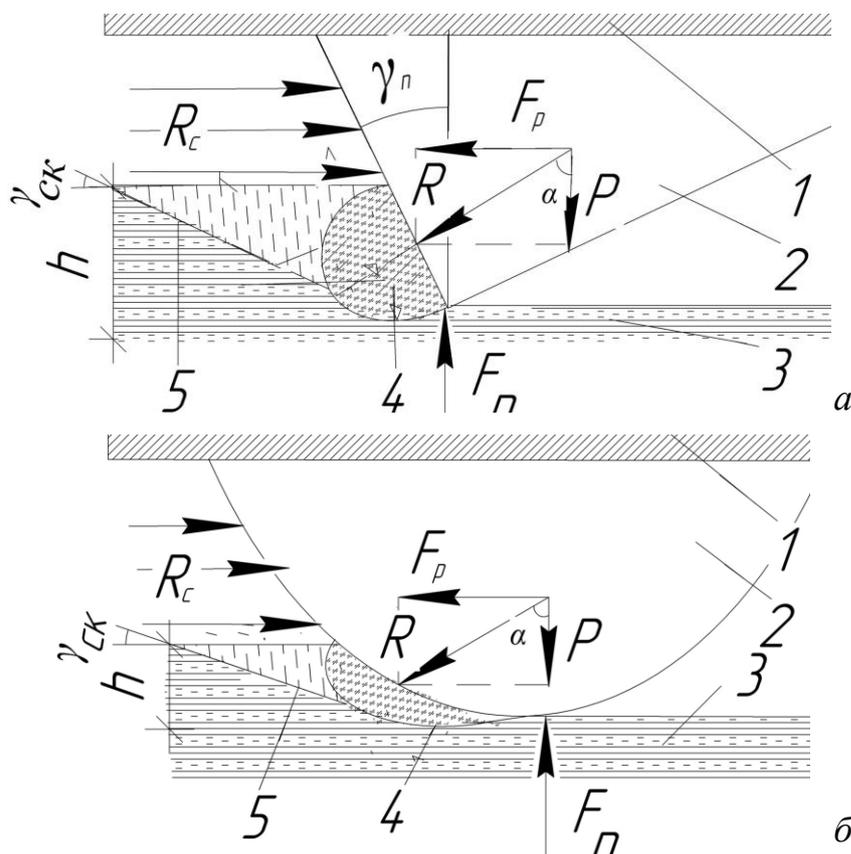


Рисунок 1 – Схема механизма разрушения горной породы алмазным резцом: а – типа PDC; б – монокристалла округлой формы; 1 – матрица; 2 – резец; 3 – массив горной породы; 4 – ядро сжатия породы; 5 – трещина отрыва

Исходя из этого, при детальном рассмотрении области контакта алмазного резца с горной породой (рис. 1) можно выделить несколько зон, отличающихся физико-механическими свойствами, состоянием и составом: зону циркулирующей промывочной жидкости; зону обильного насыщения промывочной жидкости шламом; зону горной породы (разрушенной и не разрушенной). Таким образом, на плоскость резца со стороны забоя воздействует сопротивление массива горной породы и жидкой среды ( $R_c$ ), состоящей из промывочной жидкости, шлама, разрушенной породы.

Разрушение горной породы произойдет тогда, когда сила резания ( $F_p$ ) будет больше сопротивления со стороны забоя.

Из анализа схемы механизма разрушения породы алмазным резцом (рис. 1) формула для расчета усилия резания-скалывания  $F_p$  с учетом влияния жидкой среды, примет вид:

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

где  $h$  – глубина внедрения резца в горную породу, м;  $d$  – диаметр алмазного резца, м;  $\sigma_{ск}$  – предел прочности на скалывание горной породы, Па;  $\varphi_{п}$  – 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;  $R_c$  – сопротивление среды, Н;  $\gamma_{п}$  – передний угол установки резца, град.

Силу, вызванную сопротивлением забоя и противодействующую осевой нагрузке ( $F_{п}$ ) можно определить как проекцию  $R_c$  на вертикальную плоскость с учетом предварительной проекции ее на плоскость резца и рассчитать по формуле:

$$F_{п} = R_c \sin\gamma_{п} \cos\gamma_{п}. \quad (2)$$

Согласно схеме механизма разрушения горной породы резцом (рис.1), усилие резания-скалывания горной породы также можно представить как:

$$F_p = \frac{(P - F_{п})}{tg\gamma_{п}} \quad (3)$$

Подставим (2) в (1) и (3), после чего приравняем (1) и (3) и, преобразовав относительно  $h$ , получим выражение для определения значения глубины резания-скалывания-раздавливания горной породы алмазным кристаллом с учетом сил сопротивления призабойной среды:

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

С целью проверки адекватности выражения (4) на языке программирования *LabVIEW* разработана программа *Bureniealmazom03.avi*, реализующая всесторонний расчет полученной математической модели (4).

В алгоритме программы сопротивление среды рассчитывается согласно уравнению Бернулли для скоростного напора:

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

где  $v_p^2$  – линейная скорость перемещения резца, м/с;  $C_c$  – коэффициент формы резца;  $\rho_c$  – удельный вес среды, Н/м<sup>3</sup>;  $S$  – площадь передней режущей поверхности резца, на которую действует сопротивление среды.

Результаты решения уравнения (4) показали, что формулу вычисления глубины резания-скалывания-раздавливания горной породы алмазным резцом в виде кристалла с учетом сил сопротивления среды можно представить в виде:

$$h = \left( \frac{-0,25\sqrt{d} + \sqrt{(0,25\sqrt{d})^2 + 4 \frac{\sqrt{2tg\gamma_{ск}(P(1-tg\gamma_{п}f) - R_c \sin\gamma_{п}(\cos\gamma_{п} - f \sin\gamma_{п} + 1))}}{\pi\sigma_{ск}tg\gamma_{п}(1+tg\varphi_{п})}}}{2} \right)^2. \quad (6)$$

Графическая интерпретация выражения (6), выполненная посредством компьютерной программы, подтверждает аналитическое описание механизма разрушения породы алмазным резцом и результаты экспериментальных исследований влияния отношения величины осевого  $P$  к тангенциальному  $F$  усилий на характер разрушения (рис. 2).

Согласно результатам моделирования при  $P < F$  наблюдается смещение ядра сжатия породы на переднюю грань резца, глубина внедрения резца в породу равна глубине резания-скалывания  $h$  (рис. 2, а). Сколотая и разрушенная порода выходит на переднюю грань резца, создавая сопротивление его движению. При  $P \approx F$ , ядро сжатия смещается под резец, лунка разрушения породы  $h_{л}$  превышает глубину резания  $h$  (рис. 2, б). Часть разрушенной породы выходит на переднюю грань резца, а часть по бокам лунки

разрушения. В случае смещения ядра сжатия под резец ( $P > F$ ) реализуется раздавливание горной породы (рис. 2, в), шлам остается за резцом.

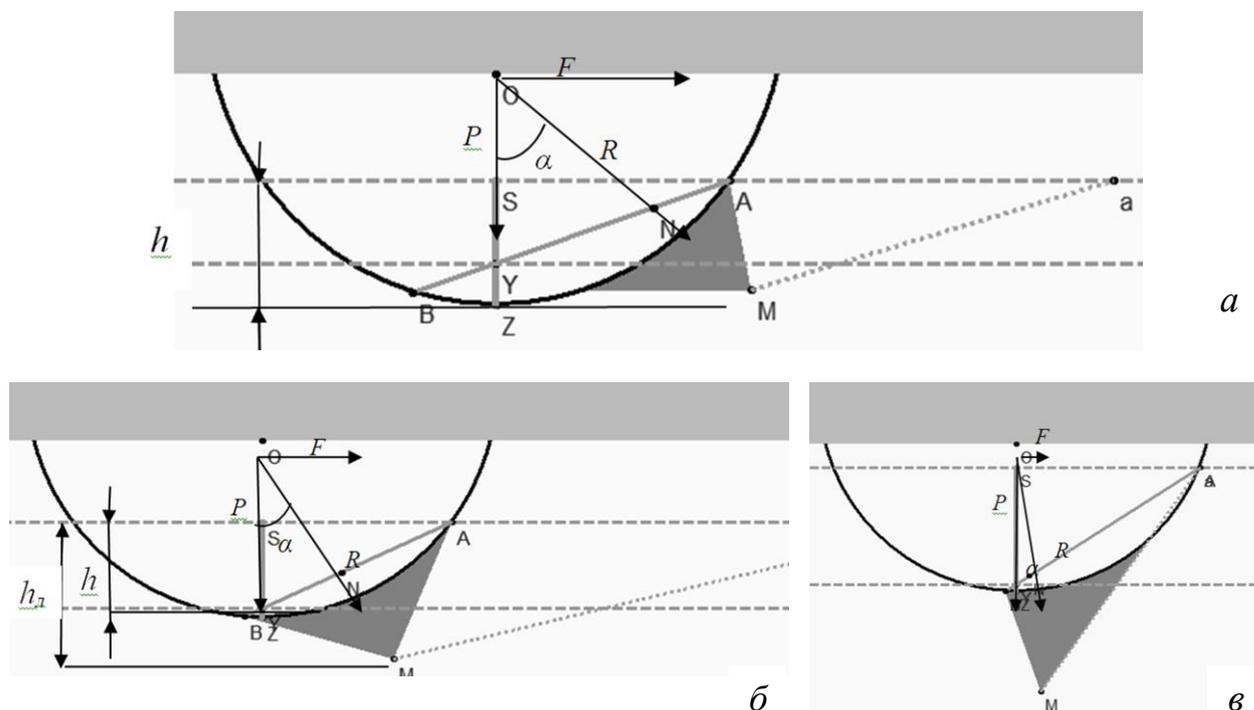


Рисунок 2 – Результаты моделирования механизма разрушения породы алмазным резцом в программе *Burenie\_almazom03.avi* согласно модели (6)

Аналогичным способом выведена зависимость (7), определяющая глубину резания-скалывания резцом *PDC*:

$$h = \sqrt[2]{\left\{ \frac{[(P - (R_c \cos \gamma_{\Pi} \sin \gamma_{\Pi})) (1 - f \operatorname{tg} \gamma_{\Pi}) - R_c \cos \gamma_{\Pi} \operatorname{tg} \gamma_{\Pi}] \sin \gamma_{\text{СК}}}{\pi \sigma_{\text{СК}} \sqrt{a} \operatorname{tg} \gamma_{\Pi} \cos \varphi_p (1 + \operatorname{tg} \varphi)} \right\}^3}, \quad (7)$$

Проведенная проверка сходимости результатов аналитических исследований, компьютерного моделирования и экспериментальных данных указывает на адекватность полученных математических моделей (6) и (7).

С целью определения степени взаимного влияния параметров выражений (6) и (7) проведен анализ, основанный на аналитических расчетах и компьютерном моделировании процессов, протекающих на забое при бурении алмазным инструментом. В результате установлено, что при прочих равных условиях: **1)** согласно выражению (7), в случае роста плотности призабойной среды, глубина резания породы **резцом *PDC*** уменьшается в

зависимости от размера, скорости перемещения и переднего угла его установки. Причем чем больше диаметр *PDC* тем больше степень сопротивления среды (рис. 3).

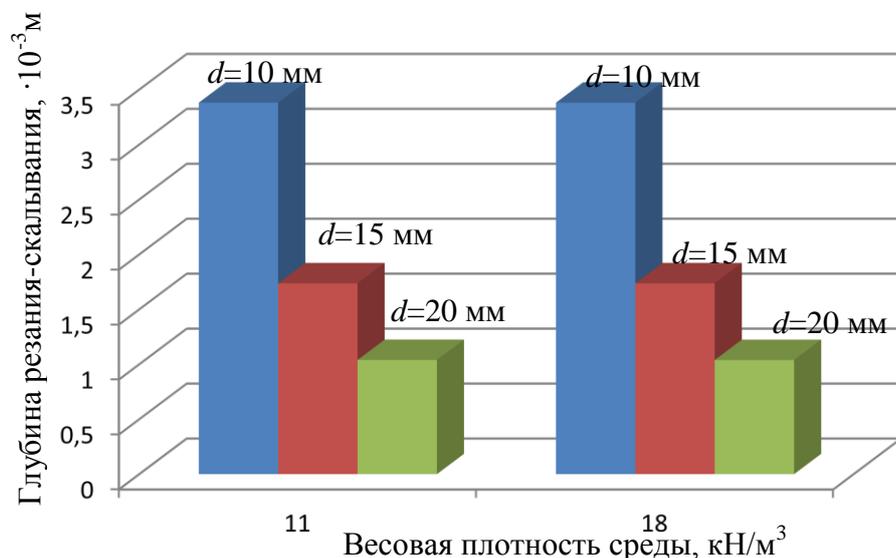


Рисунок 3. Глубина резания резцами *PDC* различного диаметра

Согласно результатам моделирования гидравлических процессов в системе *ANSYS*, чем больше величина отрицательного переднего угла установки *PDC* ( $\gamma_n$ ), тем зона максимального давления среды имеет более распространенный по рабочей поверхности резца характер и повышенные показатели. При этом увеличение значения угла  $\gamma_n$  способствует концентрации давления среды в плоскости контакта резца с породой (рис. 4).

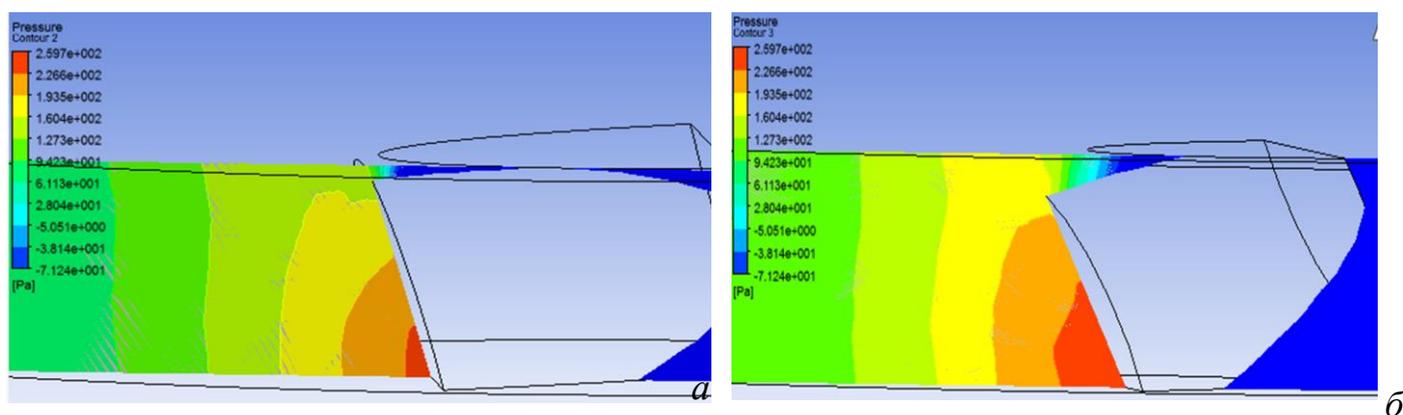


Рисунок 4 – Результаты моделирования гидравлических процессов в пределах резца *PDC* с передним углом установки: а –  $\gamma_n = -15^\circ$ ; б –  $\gamma_n = -25^\circ$  (красным отмечена зона максимального гидравлического давления)

2) согласно выражению (6), в случае роста значения плотности призабойной среды глубина резания-скалывания породы **алмазным кристаллом** уменьшается в зависимости от его размера, выпуска и скорости перемещения. Причем чем больше скорость перемещения резца, тем степень влияния среды больше (рис. 5).

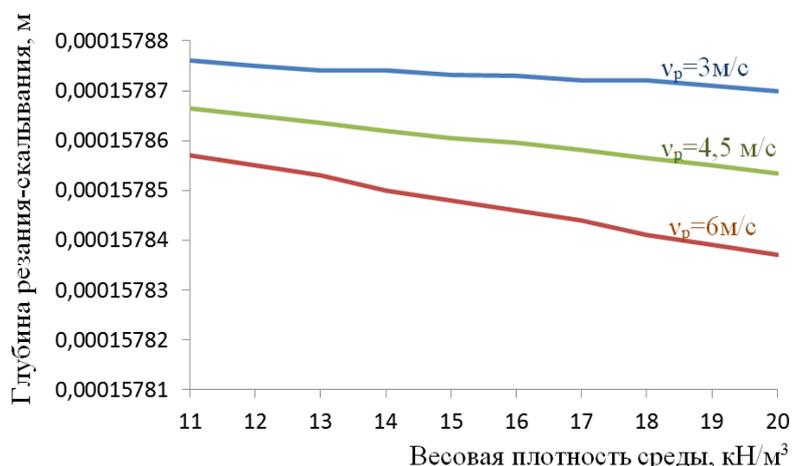


Рисунок 5 – Зависимость глубины резания-скалывания породы алмазом ( $d=0,9$  мм) от весовой плотности среды при различной скорости резца  $v_p$

Отсюда следует, что значительное влияние на эффективность процесса разрушения горных пород алмазными резцами 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. При этом если для резцов *PDC* эти явления имеют значение, прежде всего, вследствие значительного размера резцов и схемы их размещения на торце бурового инструмента, то для алмазных резцов в виде кристаллов, вследствие высочайших значений линейных скоростей перемещения по забою.

При этом важным является значение коэффициента сопротивления перемещению резцов  $\mu_k$ , которое, учитывая гидродинамику среды, образовавшейся на забое, можно найти из выражения, определяющего крутящий момент:

$$M_{кр} = F_{\tau} R_{и} = \frac{N}{\omega}, \quad (8)$$

где  $N$  – забойная мощность, определяемая по формуле  $N = \frac{\mu_k P R_n \omega}{97,5}$ ;

$R_n$  – средний радиус торца инструмента;  $\omega$  – частота вращения;

$F_T$  – тангенциальное усилие, с учетом наличия сопротивления среды определяемое как  $F_T = \frac{\mu_k P_{oc} h_d}{n_c h} + R_c$ , где  $n_c$  – число резцов инструмента.

Исходя из схемы механизма разрушения горной породы алмазным резцом (рис. 1), соотношение  $\frac{F_T}{P} = tg\alpha$ , где  $\alpha$  – угол между осевым усилием  $P$  и результирующей силой резания-скалывания-раздавливания породы  $R$  (рис. 2). После математических преобразований приведенных выражений с учетом сопротивления среды и наличия трения резцов о породу ( $f$ ) **коэффициент сопротивления** перемещению резцов можно определить как:

$$\mu_k = \frac{n_c h \left( \sqrt{\frac{h}{d}} - \frac{R_c}{P} \right)}{h_d} + f. \quad (9)$$

Анализ полученного выражения (9) подтверждает, что коэффициент сопротивления перемещению резцов  $\mu_k$  растет с глубиной резания-скалывания-раздавливания породы  $h$  и зависит от размера резца  $d$ . К тому же, выражение (9) аналитически обосновывает результаты экспериментальных исследований, показывающие, что с повышением частоты вращения до определенных пределов происходит снижение глубины борозды разрушения породы  $h_d$ . Это объясняется тем, что с ростом скорости резца  $v_p$ , повышается сопротивление среды  $R_c$  (формула 5), ядро сжатия породы смещается под резец и траектория движения резца устремляется в направлении поверхности забоя, что и приводит к снижению коэффициента сопротивления  $\mu_k$ . Следовательно, для повышения глубины разрушения породы резцом следует снижать сопротивление среды.

Снижению степени влияния среды способствует конструкция коронки с укороченными секторами, а также промывочная система, геометрия которых обеспечивает интенсивное проникновение промывочной жидкости под режущую часть инструмента (рис. 6).

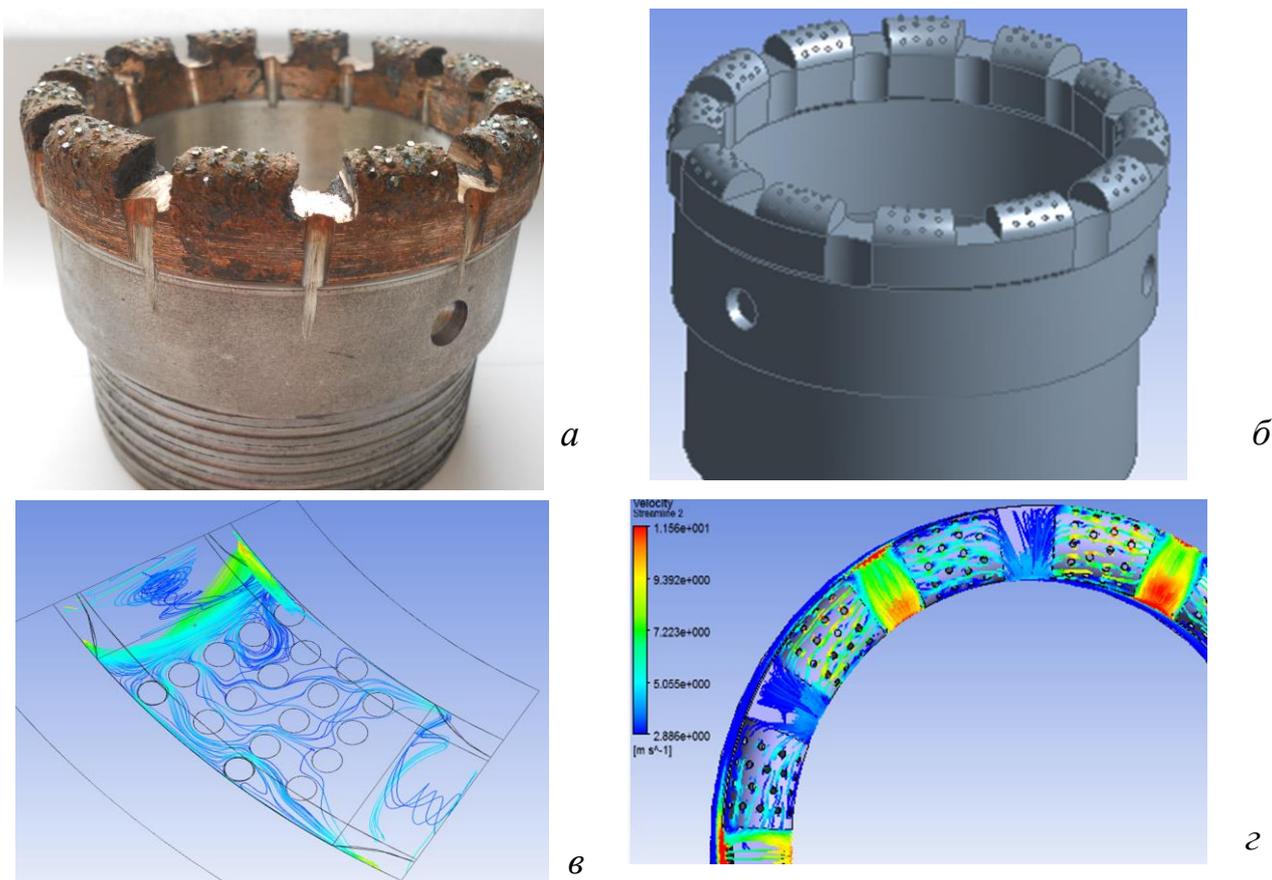


Рисунок 6 – Конструкция коронки, армированной синтетическим монокристаллом: а – фото образца коронки БСО-1; б – модель с улучшенной промывочной системой. Линии тока среды: в – в пределах сектора БСО-1; г – под коронкой с улучшенной промывочной системой

По предложенным конструкциям получены патенты (№108942; №2745546), акт испытаний коронки с укороченным сектором подтверждает повышение механической скорости бурения и проходки более чем в 1,6 раза.

Таким образом:

- увеличение скорости резания-скалывания горной породы повышает сопротивление призабойной среды, тем самым снижая глубину внедрения резца в горную породу;
- повышению эффективности алмазного бурения способствует снижение степени влияния среды призабойной зоны за счет конструктивных параметров инструмента или регулирования скорости резания-скалывания-раздавливания резца в зависимости от условий бурения и размера резцов.

2. 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 изменения формы торцевой части резцов.

Согласно схеме механизма разрушения горной породы резцом *PDC*, при постоянной глубине резания-скалывания равнодействующее усилие  $R$  концентрируется под прямым углом к центру его плоской режущей грани (рис. 1, *а*). При этом уровень сил трения на рабочей поверхности *PDC* низкий, что приводит к возникновению поперечных колебаний бурового инструмента. Регулирование распределения усилия  $R$  по режущей грани резца возможно путем создания на ней продольного углубления в виде конуса или сферы, а точнее изменения угла вершины ее вогнутости  $\alpha$  (рис. 7, *а, б*).

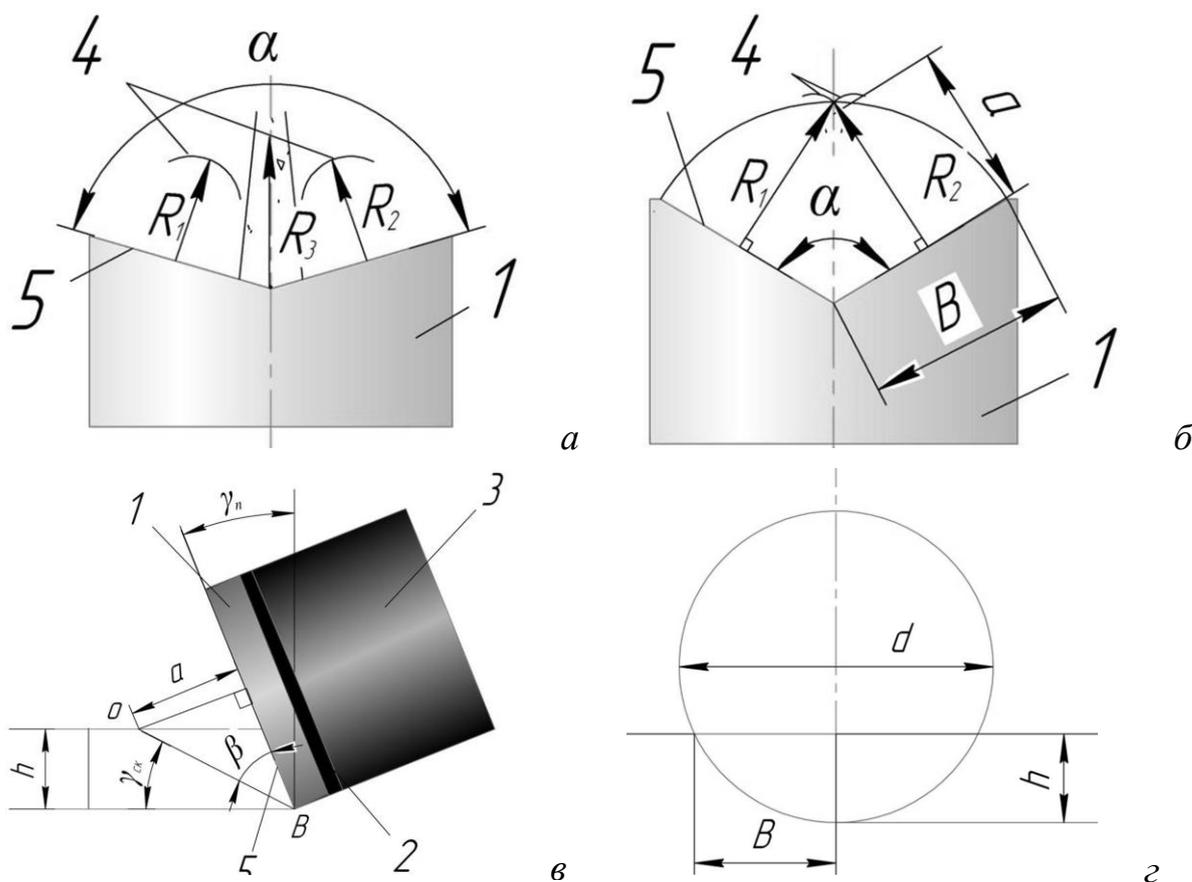


Рисунок 7 – Схема распределения сил и геометрические параметры резца *PDC* с вогнутой режущей поверхностью: 1 – слой поликристаллических алмазов; 2 – твердосплавная подложка; 3 – корпус; 4 – область разрушения породы; 5 – режущая поверхность

При бурении резцами с вогнутой формой режущей поверхности результирующая усилия резания-скалывания породы делится на несколько векторов  $R_i$  ( $R = \sum R_i$ ), которые направлены на встречу друг другу (рис. 7, а, б). Противодействуя, усилия  $R_i$  предотвращают поперечные колебания инструмента. 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 целика породы (рис. 7, а). При  $R_3 > (R_1+R_2)$  нагрузка на режущую грань будет неравномерной и гашения колебаний может не произойти. Антивибрационный эффект и равномерность распределения нагрузки гарантированы только в том случае, когда векторы усилия резания-скалывания  $R_1$  и  $R_2$  равны и направлены так, что области разрушения породы 4, возникшие от действия этих усилий, будут пересекаться или хотя бы соприкасаться (рис. 7, б). В этом случае, согласно схеме на рис. 7, б, угол вершины вогнутого конуса можно определить как:

$$\alpha = 2 \arctg \frac{2a}{B}, \quad (10)$$

где  $a$  – длина вектора  $R$ ;  $B$  – длина образующей вогнутого конуса.

Рассмотрим схему взаимодействия резца с породой на виде сбоку (рис. 7, в), имеем значения следующих геометрических параметров:

$$\begin{aligned} a &= OB \cdot \sin \beta, \\ \beta &= 90 - \gamma_{ск} - \gamma_{п}, \\ OB &= \frac{h}{\sin \gamma_{ск}}, \end{aligned} \quad (11)$$

Тогда длину вектора  $R$  можно выразить как

$$a = \frac{\sin(90 - \gamma_{ск} - \gamma_{п})h}{\sin \gamma_{ск}}. \quad (12)$$

А длина образующей вогнутого конуса  $B$  (рис. 7, з) составит

$$B = \sqrt{dh - h^2} \quad (13)$$

Отсюда, угол вершины вогнутого конуса режущей поверхности должен быть:

$$\alpha = 2 \arctg \frac{2 \cdot h \cdot \sin(90 - \gamma_{ск} - \gamma_{п})}{\sin \gamma_{ск} \cdot \sqrt{dh - h^2}} \quad (14)$$

Аналогично, радиус вогнутой сферы  $r_c$  определяется как

$$r_c = \frac{AB}{2\sin\frac{\alpha}{2}} \quad (15)$$

Согласно результатам исследований, форма резца с вогнутой поверхностью режущей грани позволяет достигать равномерного распределения нагрузки, гашения поперечных колебаний, осуществлять концентрацию разрушающей энергии в центре резца *PDC* и направлять поток жидкой среды в пласт с целью предразрушения породы (рис. 8).

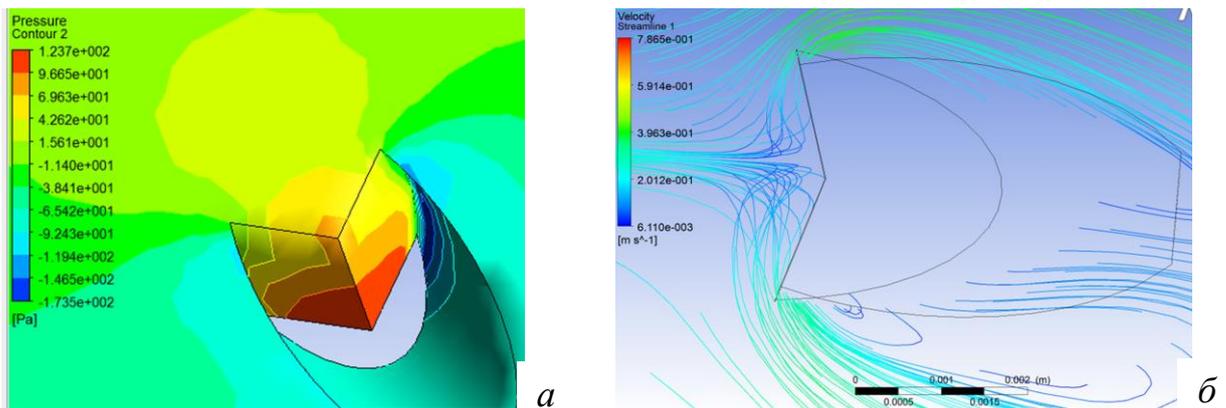


Рисунок 8 – Результаты моделирования гидравлических процессов в зоне резца *PDC* с вогнутой режущей поверхностью: а – распределение гидравлического давления; б – линии тока жидкой среды

В случае использования стандартной конструкции резцов *PDC* цилиндрической формы, равномерного распределения нагрузки по режущей грани можно достичь, обеспечив его вращение вокруг своей оси. Данный эффект достигается последовательным взаимодействием всей режущей поверхности резца с породой и возможен при расположении *PDC* на осях. При этом вращение реализуется в результате продольного перемещения бурового инструмента в процессе углубления забоя скважины за счет сил трения и прижатия резца к горной породе (со стороны керна или стенок скважины).

Значение крутящего момента резца можно определить по формуле:

$$M_{кр} = R_p \cdot F_y, \quad (16)$$

где  $R_p$  – радиус резца;  $F_y$  – усилие прижатия резца к боковой поверхности ствола скважины.

В то же время проворачиванию резца вокруг своей оси будет препятствовать момент сопротивления, который можно вычислить как:

$$M_c = r_o \cdot f \cdot F_y, \quad (17)$$

где  $r_o$  – радиус оси резца, м;  $f$  – коэффициент трения оси об корпус резца.

Коэффициент проскальзывания резца выражается через отношение  $M_{кр}/M_c$ . Из чего следует, что для снижения проскальзывания резца необходимо повышать соотношение следующих параметров:

$$R_p \cdot \mu / r_o \cdot f \rightarrow \max. \quad (18)$$

Отсюда, повышению ресурса инструмента способствует принцип метода комбинирования, выражающийся в одновременном повышении фрезерной способности поверхности резца и снижении сил трения резца об ось вращения. А также принцип метода динамизации, заключающийся в проворачивании резца вокруг своей оси по мере углубления скважины, в результате чего оголяется неизношенная часть его режущей грани, при этом «отдыхающая» часть может проходить заточку и повторно использоваться для работы. Так реализуется равномерное изнашивание всей режущей поверхности резца, а ресурс одного резца увеличивается минимум на длину окружности его рабочей поверхности.

Решением повышения ресурса посредством применения принципов метода динамизации для колонкового бурения является конструкция коронки, в матрице которой по наружной и внутренней периферии располагаются две оси (4 и 5, рис. 9), на которых с возможностью вращения на  $360^\circ$  закреплены круглые скважинообразующие 1 и кернообразующие 2 резцы *PDC*. Для повышения прочности оси вращения могут быть выполнены в форме равностороннего многоугольника (рис. 10, б). Проворачивание резца достигается за счет алмазного покрытия или создания насечек на его поверхности, взаимодействующей с породой. С целью обеспечения смазки

контакта оси с *PDC*, оси выполняются полыми с перфорацией и наполняются смазкой (рис. 10). При вращении резца за счет трения повышается температура, смазка плавится и проникает через отверстия 5 на поверхность оси 3. Непрерывная смазка контакта вращающихся деталей непосредственно в процессе бурения **повышает ресурс и работоспособность инструмента**, а также позволяет сократить время на спуско-подъемные операции с целью смены или обработки инструмента.

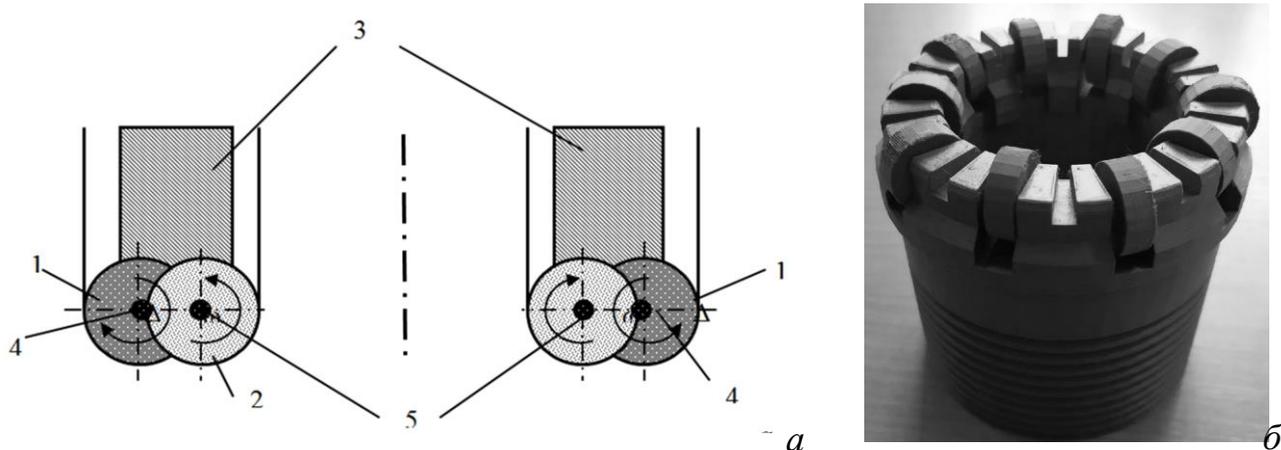


Рисунок 9 – Коронка с вращающимися при бурении резцами: а – схема поперечного сечения; б – модель коронки в сборе; 1 – наружный резец; 2 – внутренний резец; 3 – корпус коронки с матрицей; 4 – ось вращения наружных резцов; 5 – ось вращения внутренних резцов

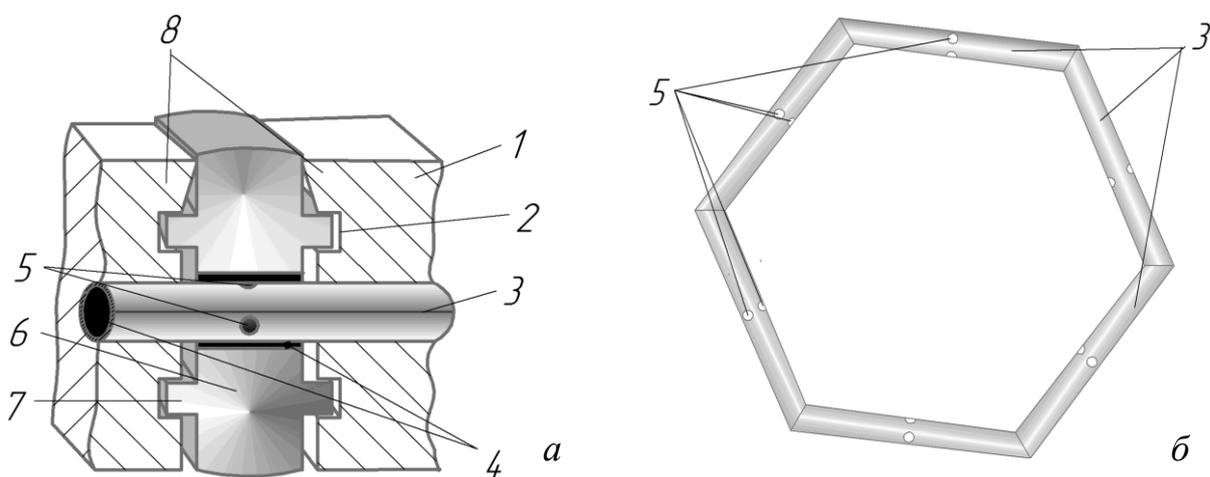


Рисунок 10 – Элементы конструкции коронки с вращающимися резцами: а – схема контакта резца *PDC*, оси и матрицы буровой коронки в разрезе; б – оси вращения резцов с перфорацией: 1 – матрица; 2 – кольцевые проточки; 3 – ось; 4 – смазка; 5 – перфорационное отверстие; 6 – резец *PDC*; 7 – стабилизирующий буртик; 8 – абразивный уступ для заточки «отдыхающей» части *PDC*

По предложенным конструкциям получены патенты № 2702787, № 190545; № 2715574; № 2764761.

Таким образом:

- равномерное распределение нагрузки по режущей поверхности резцов, достигаемое за счет их вращения или изменения формы их торцевой части, повышает ресурс алмазного бурового инструмента.

**3. 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**

Учитывая взаимное влияние переменных факторов: размера резца, свойств горной породы, глубины разрушения, динамических и гидравлических процессов для достижения высоких показателей бурения необходим комплексный подход к регламентации технологии применения бурового инструмента исходя из его ресурсных возможностей. В качестве критериев оптимизации следует использовать текущие значения параметров бурения, в полной мере отражающих процесс разрушения горной породы. К таким параметрам можно отнести механическую скорость бурения  $v_b$  (показатель буримости и темпа проходки), углубление за один оборот  $h_o$  (показатель эффективности разрушения горной породы) и энергоёмкость  $N/v_b$  (показатель возможного ресурса инструмента). А оптимизации режима эксплуатации бурового инструмента можно достичь своевременной координацией осевой нагрузки ( $P$ ), частоты вращения ( $\omega$ ) и подачи промывочной жидкости ( $Q$ ). Для определения взаимосвязи параметров процесса бурения применим метод полного факторного эксперимента,

позволяющий на основе имеющихся данных получать математические зависимости типа:

$$\begin{aligned} v_6 &= A + B \cdot P + C \cdot \omega + D \cdot Q + E \cdot P \cdot \omega \cdot Q; \\ h_o &= F + H \cdot P + K \cdot \omega + L \cdot Q + M \cdot P \cdot \omega \cdot Q; \\ N/v_6 &= S + T \cdot P + X \cdot \omega + Y \cdot Q + Z \cdot P \cdot \omega \cdot Q, \end{aligned} \quad (19)$$

где  $A, B, C, D, E, F, H, K, L, M, S, T, X, Y, Z$  – коэффициенты, указывающие на степень взаимного влияния параметров модели.

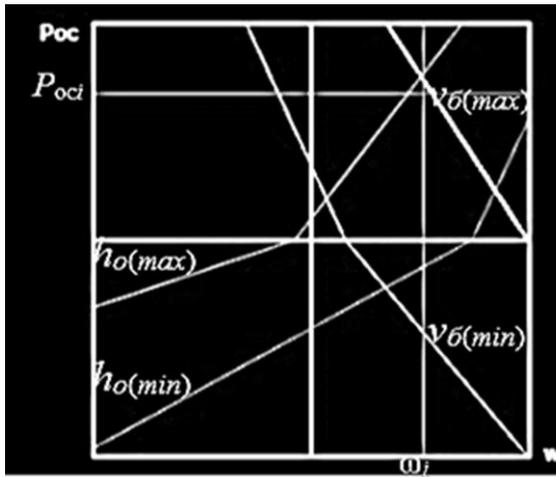


Рисунок 11 – Пример поиска области оптимальных значений режима бурения

Совокупный анализ моделей (19) позволяет решать задачи управления в направлении поиска наиболее приемлемых значений параметров бурения. А их графическая интерпретация дает возможность наглядно оценивать потенциал инструмента и выбирать область оптимального режима бурения (рис. 11).

Учитывая влияние износа на размер алмазного резца и как следствие на механизм разрушения породы, наиболее рациональным критерием управления алмазным бурением выступает показатель углубления за оборот ( $h_o$ ), принятый как величина обратная показателю  $RPI$ . Регулирование механической скорости бурения в пределах наибольших значений с учетом ресурса инструмента основывается на анализе математической модели (19) и зависимости (20):

$$v_6 = h_o \cdot \omega. \quad (20)$$

Основой управления выступает пошаговое снижение величины критерия оптимизации – углубления за оборот в пределах рекомендуемых значений показателя  $RPI$  по мере износа инструмента.

Подбираются такие показатели режимов бурения ( $P, \omega, Q$ ), при которых обеспечена реализация наибольшей величины механической скорости бурения

$v_6(max)$  при максимально возможных показателях углубления за оборот  $h_{max}$  и минимально допустимых затратах мощности  $N$ .

По мере износа резца меняется механизм разрушения горной породы и координация режима бурения не приносит положительного результата, приводя к критическому износу инструмента. Снижение критерия углубления за оборот позволит сохранить допустимые показатели механической скорости бурения при шадящем износе инструмента (точка 2, 3, рис. 12).

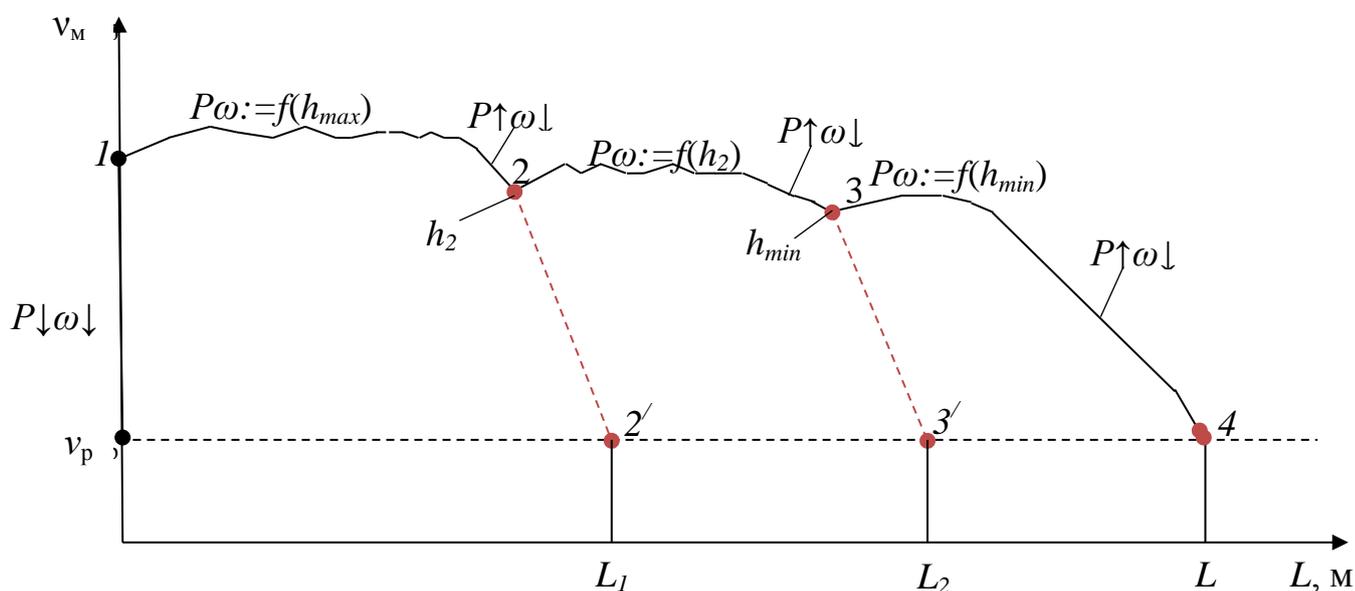


Рисунок 12 – Графическая интерпретация технологии процесса алмазного бурения с оптимальным ресурсом бурового инструмента ( $L$ )

Актуальным описанное управление процессом бурения является в случае своевременности реализации предложенных операций, т.е. требует автоматизации и исполнения в режиме реального времени.

Решением автоматизации управления алмазным бурением с целью повышения ресурса породоразрушающего инструмента является разработка для управляющего компьютера программного продукта, в алгоритм которого заложены законы взаимного влияния параметров бурения (рис. 13).

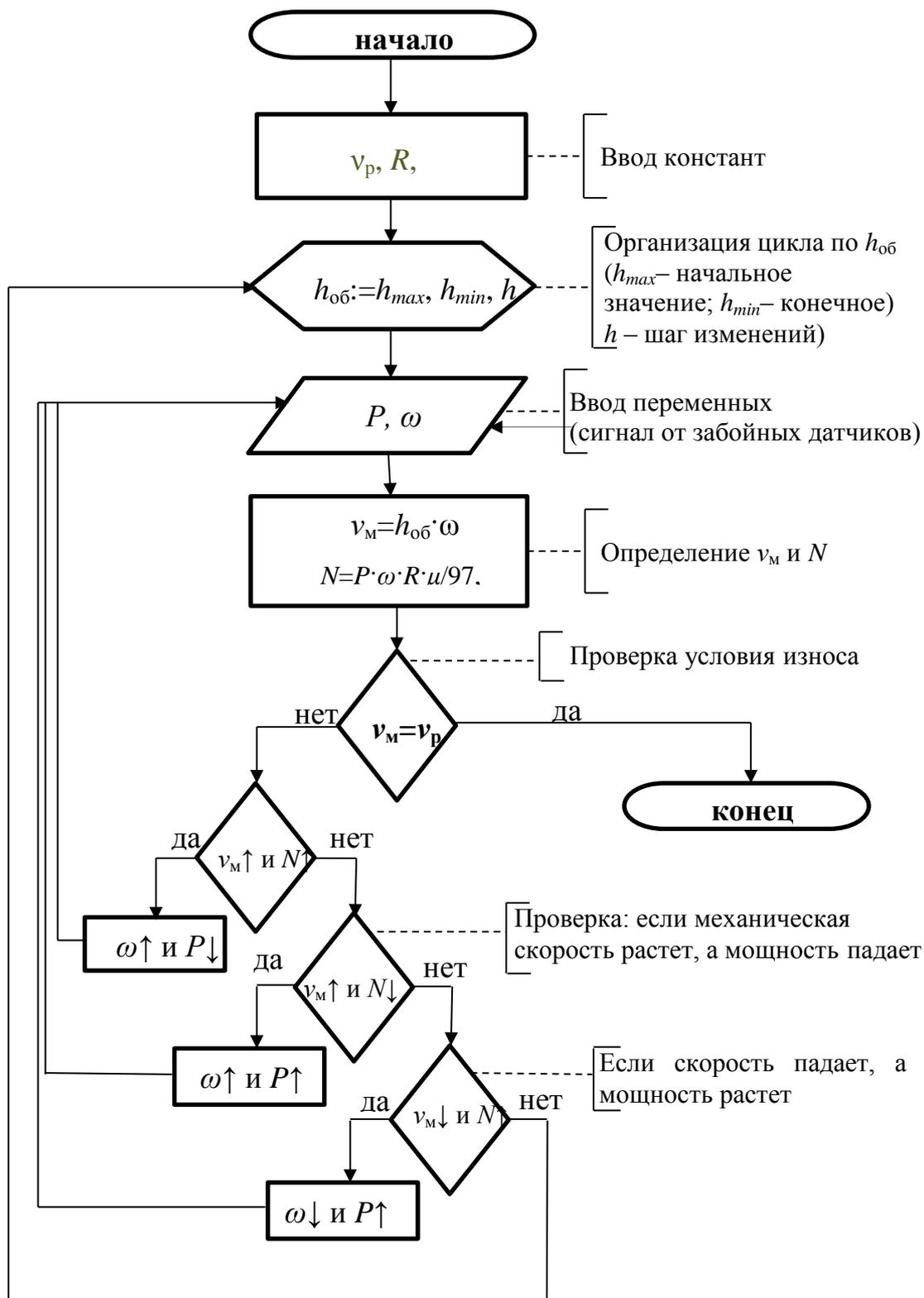


Рисунок 13 – Блок-Схема алгоритма управления алмазным бурением

Вводными такого программного обеспечения должны выступать параметры, фиксируемые забойными датчиками, например телесистемы. Непрерывно получая информацию о характере режима бурения на забое, программа проводит анализ возможных изменений механической скорости

бурения ( $v_m$ ) и мощности ( $N$ ), затрачиваемой на бурение. 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 случае роста механической скорости ( $v_m \uparrow$ ), при снижении мощности ( $N \downarrow$ ) отдается команда повышения осевой нагрузки и частоты вращения ( $P \uparrow \omega \uparrow$ ). При росте 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 падает ( $v_m \downarrow$ ), а мощность растет ( $N \uparrow$ ) – о снижении частоты вращения ( $\omega \downarrow$ ) и повышении осевой нагрузки ( $P \uparrow$ ), что снизит сопротивление среды и сохранит глубину резания. Если многочисленные преобразования не привели к должному результату, отдается команда о снижении критерия оптимизации – углубления за оборот ( $h_{об} \downarrow$ ) и цикл повторяется.

Таким образом:

- управление процессом алмазного бурения с целью повышения ресурса и производительности бурового инструмента должно основываться на комплексном подходе, учитывающем особенности механизма разрушения горной породы и результаты анализа критериев процесса бурения с применением метода полного факторного эксперимента;

- автоматизация управления алмазным бурением способствует своевременному реагированию на изменение системы взаимодействия резец-порода и повышению проходки на инструмент.

## 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 растет.

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 сопротивление внедрению резца в породу наложением высокочастотных вибраций;

- разработка программного обеспечения для автоматизированного управления процессом алмазного бурения на основе комплексного анализа критериев бурового процесса.

### **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:**

– статьи в зарубежных научных журналах и изданиях, включенных в Scopus:

1. 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. S. Popova** // Journal of Superhard Materials, March 2015, Volume 37, Issue 2, pp 132-139;

2. **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 (0,56/0,3 п.л.);

3. 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 (0,57/0,2 п.л.);

4. Нескоромных В.В. Разработка породоразрушающего инструмента с резцами PDC / В.В. Нескоромных, **М.С. Попова**, Е.В. Парахонько // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2020. – Т. 331. – № 2. – С.131-138 (0,44/0,2 п.л.);

5. 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.);

6. 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 (0,5/0,25 п.л.);
7. 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 (0,57/0,25 п.л.);
8. 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 (0,44/0,2 п.л.);
9. 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 (0,57/0,25 п.л.);
10. 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 (0,63/0,35 п.л.);
11. 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 (0,5/0,3 п.л.);

12. 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 (0,5/0,3 п.л.);
13. Нескоромных В. В. и др. Резцы PDC с вогнутой поверхностью режущей грани / В.В. Нескоромных, **М.С. Попова**, З.Г. Зотов, Лиу Баочанг // / В.В. Нескоромных, **М.С. Попова**, З.Г. Зотов, Лиу Баочанг. – 2022. – Т. 333. – №. 4. – С. 181-192 (0,5/0,3 п.л.);
- статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:
14. **Попова М.С.** Результаты компьютерного моделирования температурного режима алмазного бурового инструмента / **М.С. Попова** // Инженер-нефтяник. Научно-технический журнал. – 2018 – №2. – С. 23-26 (0,19 п.л.);
15. 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 (0,19/0,09 п.л.);
16. Нескоромных В.В. Разработка алмазного инструмента с применением данных компьютерного моделирования и результатов системных исследований / В.В Нескоромных, **М.С. Попова** // Инженер-нефтяник. Научно-технический журнал. – 2018 – №3. – С. 26-31 (0,19/0,09 п.л.);
17. Нескоромных В.В. Применение материала нового поколения в качестве элементов современного породоразрушающего инструмента / В.В Нескоромных, **М.С. Попова**, А.Е. Головченко // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. Научно-технический журнал. – 2019. – №10. – С. 15-20 (0,19 п.л./0,07);
18. 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 (0,44/0,19 п.л.);

19. 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 (0,25/0,1 п.л.);
20. Нескоромных В.В. Методика проектирования долот с резцами *PDC*, учитывающая динамические процессы резания-скалывания горной породы и сопротивление среды / В.В Нескоромных, **М.С. Попова**, А.В. Чихоткин // Инженер-нефтяник. Научно-технический журнал. – 2020. – №2. – С. 13-18 (0,31/0,18 п.л.);
21. 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 (0,125/0,07 п.л.);  
– патенты:
22. Алмазная однослойная буровая коронка. Патент на полезную модель №91720 Е21В 7/00 / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, Р. К. Богданов, Загора А. П. // опубл. 10.07.2014, Бюл. №13;
23. Алмазная однослойная буровая коронка. Патент на изобретение №92032 Е21В 7/00 / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, Р. К. Богданов, Загора А. П. // опубл. 25.07.2014, Бюл. №14;
24. Алмазная однослойная буровая коронка. Патент изобретение №108943 Е21В 10/36 Е21В 10/46 / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, Р. К. Богданов, А. П. Загора // Заявл. 24.02. 2014; опубл. 25.06.2015, Бюл. №12;
25. Алмазная однослойная буровая коронка. Патент изобретение №108942 Е21В 10/36 Е21В 10/46 / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, Р. К. Богданов, А. П. Загора // Заявл. 24.02. 2014; опубл. 25.06.2015, Бюл. №12;
26. Долото для бурения. Патент на полезную модель №190545 / В.В. Нескоромных, **М. С. Попова**, Е.В. Парахонько // Заявка № 2019111095 от 2019.04.12;

27. Буровая коронка. Патент на изобретение №2702787 / В.В. Нескоромных, **М. С. Попова**, Е.В. Парахонько // Заявка № 2019106202 от 2019.03.04, опубл. 11.10.2019, Бюл. №29;
28. Буровая коронка. Патент на изобретение №2715574 С1 / В.В. Нескоромных, А.Г. Вахровеев, **М. С. Попова**, К.А. Бовин, Д.И. Касинцев, Е.В. Парахонько // Заявка № 2019133687 от 22.10.2019., опубл. 02.03.2020, Бюл. №7;
29. Коронка для бурения Патент на полезную модель №195564 / В.В. Нескоромных, П.Г. Петенев, **М. С. Попова**, И.А. Комаровский // Заявка № 2019131730 от 08.10.19., опубл. 31.01.2020, Бюл. №7;
30. Алмазная буровая коронка. Патент на изобретение №2745546 / В.В. Нескоромных, **М. С. Попова**, А.А. Берзюков // Заявка № 2020133566 от 2020.10.12., опубл. 26.03.2021, Бюл. №9;
31. Буровая коронка. Патент на изобретение №2715574 С1 / В.В. Нескоромных, А.Г. Вахровеев, **М. С. Попова**, К.А. Бовин, Д.И. Касинцев, Е.В. Парахонько // Заявка № 2020141613 от 2020.12.16, опубл. 23.08.2021, Бюл. №24
- в других изданиях и материалах различных конференций и семинаров:
32. Каракозов А. А. и др. О процессе взаимодействия алмазов с забоем скважины при работе однослойных коронок / А. А. Каракозов, **М.С. Попова**, Р. К. Богданов, А. П. Загора // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. – 2011. – Вып.14. – С. 78-85;
33. **Popova M.** Using computer simulation to aid the research of drilling processes / *Marina S. Popova*, Anton Y. Kharitonov, Sergey N. Parfenyuk // Resource-Efficient Technologies, 3 (2019). – P. 13–19 (0,38/0,3 п.л.);
34. **Попова М.С.** Перспективы разработки геологоразведочного алмазного породоразрушающего инструмента / *М.С. Попова*, В.В. Нескоромных // Разведка и охрана недр. – 2021.– №12. – С. 44-48 (0,25/0,2 п.л.);
35. **Попова М.С.** Армирование породоразрушающего инструмента крупным синтетическим монокристаллом / Породоразрушающий и

- металлообрабатывающий инструмент и технология его изготовления. Сб. научн. Трудов. – Киев: ИСМ им. Бакуля, 2019. – Вып.22. – С. 109-115. (0,38 п.л.);
36. **Попова М.С.** Некоторые особенности проектирования породоразрушающего инструмента / Актуальные проблемы недропользования: материалы международной научно-практической конференции / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2019. – С. 132-134. (0,13 п.л.);
37. **Попова М.С.** Особенности силового воздействия алмазного резца на породу в процессе бурения скважин / В.В. Нескоромных, *М.С. Попова*, А.Ю. Харитонов // Булатовские чтения. – Том: 1. – 2021. – С. 349-353 (0,38/0,27 п.л.);
38. **Попова М.С.** Исследование гидродинамических процессов при разрушении горных пород резцами *PDC* / В.В. Нескоромных, *М.С. Попова* // Рассохинские чтения: материалы международной конференции. – 2021.– №12. – С. 44-48 (0,25/0,15 п.л.);
39. Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при бурении скважин алмазным буровым инструментом : монография / В. В. Нескоромных, **М. С. Попова**, Б. Лиу // Сибирский федеральный университет, Институт горного дела, геологии и геотехнологий. – Красноярск : СФУ, 2020 (2020-09-29). – 265 с., (10/16.8 п. л.).