

На правах рукописи



ПОПОВА Марина Сергеевна

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОДНОСЛОЙНЫХ КОРОНОК,
АРМИРОВАННЫХ СИНТЕТИЧЕСКИМИ АЛМАЗНЫМИ
МОНОКРИСТАЛЛАМИ С ПОВЫШЕННОЙ ТЕРМОСТОЙКОСТЬЮ**

Специальность 25.00.14 – Технология и техника геологоразведочных работ

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

Томск – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет» на кафедре технологии и техники разведки

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор,
член.-кор. РАЕН
Нескормных Вячеслав Васильевич

Официальные оппоненты:

Третьяк Александр Яковлевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (ЮРГПУ (НПИ), г. Новочеркасск), заведующий кафедрой «Нефтегазовая техника и технологии»

Ковалев Артем Владимирович, кандидат технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ, г. Томск), доцент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов

Ведущая организация:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ», г. Иркутск).

Защита диссертации состоится «18» декабря 2018 г. в 16 час.30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.269.07 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30 (корпус 20, ауд. 504)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск, ул. Белинского, 55) и на сайте: <http://portal/tpu/council/914/worklist>.

Автореферат разослан " " _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.г.-м.н.



Жорняк Л.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Эффективное разрушение твердых горных пород при бурении геологоразведочных скважин достигается при использовании алмазного породоразрушающего инструмента. Очень крепкие по твердости породы бурят импрегнированным инструментом, оснащенным мелкими природными и искусственными алмазами. Породы средней твердости – однослойными алмазными коронками, оснащенными крупными природными алмазами и сверхтвердыми режущими вставками. Породоразрушающий инструмент для бурения перемежающихся, крепких пород подбирается из имеющегося с учетом геологических условий, технических и технологических возможностей. Основными недостатками производства алмазного инструмента, необходимого для перечисленных условий бурения, является отсутствие сырьевой базы больших природных алмазов, низкие прочностные характеристики серийных сверхтвердых материалов, быстрая деградация их режущей кромки в процессе взаимодействия с породой.

Современные достижения в области синтеза крупных (1600/1250 мкм) алмазных монокристаллов с повышенной термостойкостью (до 1150 °С), которые могут использоваться для армирования алмазного инструмента, открыли широкие перспективы разработки нового поколения однослойных алмазных коронок и увеличения номенклатуры алмазного бурового инструмента для эффективного применения в разнообразных горно-геологических условиях, прежде всего в горных породах средней твердости и твёрдых.

Для разработки новых конструкций и технологий применения такого алмазного породоразрушающего инструмента необходимо дополнительное изучение особенностей его работы на забое. Известные теоретические модели не удовлетворяют современным требованиям комплексного рассмотрения процессов. В связи с этим, актуальным является исследование работы и разработка конструкции однослойной алмазной коронки, которая позволит существенно увеличить технико-экономические показатели бурения геологоразведочных скважин.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Автор принимала непосредственное участие с госбюджетных темах, выполненных в Донецком национальном техническом университете (ДонНТУ) и Институте сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины (ИСМ): Н-17-11 (приказ по ДонНТУ №227-15 от 29.09.2011), III-103-11 номер госрегистрации №0111U000630 (в соответствии с договором о сотрудничестве ДС – 1/2012).

Цель и задачи исследования. Цель работы – обоснование параметров алмазной однослойной коронки с синтетическими монокристаллами с повышенной термостойкостью и технологии её применения при бурении геологоразведочных скважин в породах V–VIII с пропластками до IX категории по буримости.

Достижение указанной цели обеспечивается в диссертационной работе путем решения следующих **задач**:

1. Осуществить обзор и анализ результатов ранее проведенных

экспериментальных и теоретических исследований работы алмазной коронки на забое.

2. Установить характер нагружения отдельных алмазов в секторе коронки в зависимости от её геометрических параметров и схемы раскладки алмазных монокристаллов.

3. Исследовать температурный режим работы алмазных монокристаллов в зависимости от режимов бурения для разных конструкций однослойных алмазных коронок с учетом циркуляции промывочной жидкости на забое.

4. Экспериментально проверить полученные результаты.

5. Выбрать и обосновать оптимальную конструкцию алмазной однослойной коронки, с возможностью армирования ее синтетическими монокристаллами зернистостью 1600/1250 мкм с повышенной термостойкостью.

6. Провести испытания разработанных коронок и апробацию технологии их применения в производственных условиях и оценить эффективности их работы при бурении геологоразведочных скважин.

Объект исследования – алмазные однослойные коронки с радиальной раскладкой синтетических монокристаллов с повышенной термостойкостью.

Предмет исследования – закономерности нагружения и температурного режима алмазных монокристаллов при работе коронки на забое.

Идея работы заключается в рассмотрении взаимодействия с горной породой каждого алмаза коронки как элемента единой и взаимосвязанной системы с учетом термических и гидродинамических процессов.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе проведены комплексные, взаимодополняющие теоретические и экспериментальные исследования. При аналитических исследованиях применялись методы математического моделирования, метод конечных элементов. При экспериментальных (лабораторных и производственных) исследованиях методика включала: подбор контрольно-измерительной аппаратуры, разработку собственно методики экспериментов, обработку данных и анализа полученного материала.

С целью подтверждения достоверности и эффективности научных разработок диссертационной работы осуществлено производственное внедрение однослойной алмазной коронки и технологии ее применения, что является практическим результатом работы.

Научная новизна полученных результатов.

1. Получена зависимость максимальной толщины слоя породы, срезаемой алмазом от количества и характера расположения алмазов на торце коронки с учетом углубления алмаза в породу при статическом вдавливании.

2. Установлено, что чем больше отношение расстояния в линии резания между первыми алмазами сектора и последними алмазами впереди идущего сектора (l_k) к расстоянию между алмазами внутри сектора (l_a) тем больше нагрузка, воспринимаемая алмазами первых радиальных рядов сектора.

3. Впервые, путем аппроксимации результатов компьютерного

моделирования температурных процессов на забое, получена зависимость температуры нагрева алмаза при бурении скважины от частоты вращения инструмента и подачи промывочной жидкости для коронок с 2, 3, 4 и 7 радиальными рядами в секторе.

Основные защищаемые положения.

1. Максимально термостойкие объемные алмазы следует располагать во втором радиальном ряду сектора, а прочность объемных алмазов первых двух радиальных рядов (P_1) и других радиальных рядов (P_2) сектора определяется из следующих соотношений:

- $P_1 = P_2 l_k / l_a$, если алмазы первого и последнего радиальных рядов сектора размещены на разных линиях резания;

- $P_1 = P_2 (l_k / l_a + 1)$, если на одной линии резания,

где l_k и l_a – расстояния в линии резания, соответственно, между первыми алмазами сектора и последними алмазами предыдущего сектора и между соседними алмазами одного сектора.

2. Интенсификация процесса разрушения горных пород V-VIII с пропластками пород более высоких категории по буримости достигается использованием конструкции алмазной коронки, в каждом секторе которой будет размещаться не более двух радиальных рядов объемных алмазов, при следующих соотношениях в геометрических размерах матрицы коронки:

- длина промывочного канала по внешнему краю коронки равна расстоянию между рядами объемных алмазов в секторе;

- длина сектора по внешнему краю коронки составляет три длины промывочного канала;

- сумма длин сектора и промывочного канала по внешнему краю коронки должна находиться в пределах не более 5-5,5 диаметров объемных алмазов.

Практическая ценность полученных результатов диссертационной работы заключается в том, что:

1. Разработаны научно обоснованная методика, а также программное обеспечение, позволяющие определять зависимость изменения механической скорости бурения однослойных коронок от типа и характера раскладки алмазов на торце их сектора, а также нагрузку на отдельный алмаз коронки в любой момент бурения.

2. Разработан метод проектирования однослойных алмазных коронок, армированных крупными синтетическими алмазными резцами.

3. Спроектирована и внедрена конструкция однослойной алмазной коронки, оснащенная термостойкими монокристаллическими алмазами разной прочности с размером зерна 1600/1250 мкм, обеспечивающая высокую механическую скорость при небольших осевых нагрузках и работоспособность, а также снижение расхода дорогостоящего сырья.

Личный вклад соискателя. Основные положения и результаты диссертационной работы, которые выносятся на защиту, получены автором лично. Экспериментальные работы и изготовление экспериментального и промышленного образца осуществлены с помощью коллег и специалистов ИСМ при непосредственном участии автора.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на: XIV–XVI международных конференциях «Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения» ИСМ (2011–2013 г.); международных научно-практических конференциях «Форум горняков – 2011» и «Форум горняков – 2013» (г. Днепропетровск, НГУ); VI и VII научно-практических конференциях «Донбасс-2020» «Перспективы развития глазами молодых ученых» г. Донецк, ДонНТУ (2012-2014 г.); XVIII и XX Международном симпозиуме им. академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, (2014 г и 2016 г, Томский политехнический университет). Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, были доложены на первой международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Технологии будущего нефтегазодобывающих регионов» г. Сургут, 2018г. В форум-конкурсе молодых ученых «Проблемы недропользования» (Санкт-Петербургский горный университет) 20-22 апреля 2016 года за доклад по результатам настоящей работы получен диплом за I место в секции «Комплексное освоение нефтегазовых месторождений и транспортировка углеводородного сырья».

Публикации. Основные результаты диссертации опубликовано в 31 статьях научных журналов, из них 7 в профессиональных изданиях из списка ВАК Украины, 2 из списка ВАК России и 1 статья на английском языке в издании, цитируемом в Scopus. Основные технические и технологические решения защищены 2 патентами на полезную модель и 2 патентами на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы в количестве 86 наименований и 2 приложений. Полный объем диссертации составляет 143 страницы, из них 126 страницы основного текста. Работа содержит 27 таблицы и 78 иллюстраций.

Благодарности.

Идейным вдохновителем, консультантом и наставником автора при написании диссертационной работы был выдающийся ученый, крупный специалист в области алмазного породоразрушающего инструмента ныне покойный к. т. н. Богданов Роберт Константинович.

Диссертационная работа начата в ДонНТУ, на кафедре технологии и техники бурения скважин (ТТР), при поддержке Института сверхтвердых материалов им. Бакуля НАН Украины. Автор выражает глубокую благодарность специалистам ИСМ, особенно Закоре А. П. и Супруну М. С. за предоставление информации, изготовление образцов коронок и оказание помощи при проведении экспериментальных исследований. Автор благодарит к.т.н., проректора ДонНТУ Каракозова А. А. за консультации и всестороннюю помощь, а также старшего преподавателя каф. ТТБС ДонНТУ Парфенюка С. Н. за методическую помощь и консультации в области компьютерного моделирования. Отдельная благодарность научному

руководителю, д.т.н., проф., член.-кор. РАЕН Нескоромных В. В. за ценные советы и помощь в подготовке работы к защите.

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 дан обзор современного состояния исследований и разработок конструкций однослойного алмазного породоразрушающего инструмента для бурения скважин. Предложена последовательность этапов исследования, схема взаимодействия параметров исследования.

Во второй главе исследована работа коронок на забое скважины с различной раскладкой алмазов на ее торце, описана уточненная математическая модель взаимодействия с забоем алмазных резцов однослойной коронки. Выведено выражение, определяющее толщину слоя породы, срезаемого каждым алмазом коронки при движении по линии резания, в процессе бурения. Определены влияния конструктивных параметров алмазной однослойной коронки на характер взаимодействия алмазов с горной породой на забое скважины. Представлена картина механических напряжений в элементах алмазной коронки при бурении скважин. Описаны особенности математического моделирования температурного режима работы однослойной алмазной коронки с учетом гидравлических процессов, происходящих на забое скважины. Даны рекомендации по выбору геометрических параметров и схем раскладок алмазов для однослойных коронок.

В третьей главе описаны экспериментальные исследования процесса взаимодействия алмазной однослойной коронки с забоем скважины в процессе бурения.

В четвертой главе представлена разработка конструкции и технологии использования однослойной алмазной коронки с режущими вставками, выполненными из синтетических монокристаллов термостойких алмазов. Изложены результаты испытаний и рекомендации для внедрения испытуемых образцов однослойной коронки.

ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ.

ПОЛОЖЕНИЕ 1. Максимально термостойкие объемные алмазы следует располагать во втором радиальном ряду сектора, а прочность объемных алмазов первых двух радиальных рядов (P_1) и других радиальных рядов (P_2) сектора определяется из следующих соотношений:

- $P_1 = P_2 l_k / l_a$, если алмазы первого и последнего радиальных рядов сектора размещены на разных линиях резания;
- $P_1 = P_2 (l_k / l_a + 1)$, если на одной линии резания,

где l_k и l_a – расстояния в линии резания, соответственно, между первыми алмазами сектора и последними алмазами предыдущего сектора и между соседними алмазами одного сектора.

Обобщив результаты ранее выполненных работ, предложено разработку новых алмазных коронок производить на основании комплекса исследований, позволяющих определить: нагрузки, действующие на каждый алмаз коронки при взаимодействии ее с горной породой на забое; механические напряжения в элементах коронки; поле скоростей жидкости под торцом коронки при бурении; температуру на контакте алмазов с породой и температурное поле в элементах коронки с учётом циркуляции промывочной жидкости.

Исходя из опыта работ, посвященных геометрическим параметрам однослойных коронок, за основу исследования приняты однослойные коронки с радиальным расположением алмазов по торцу матрицы, схема размещения которых рассчитывается по методике Н. В. Цыпина. Предложено классифицировать схемы раскладки алмазов на торце коронки по характеру расположения алмазов первого и последнего радиальных рядов сектора: I тип – алмазы находятся на разных линиях резания (рис. 1 а); II тип – алмазы находятся на одних линиях резания (рис. 1 б). Введено понятие "рабочий ряд", состоящий из алмазов двух смежных радиальных рядов считая от набегающей части сектора коронки.

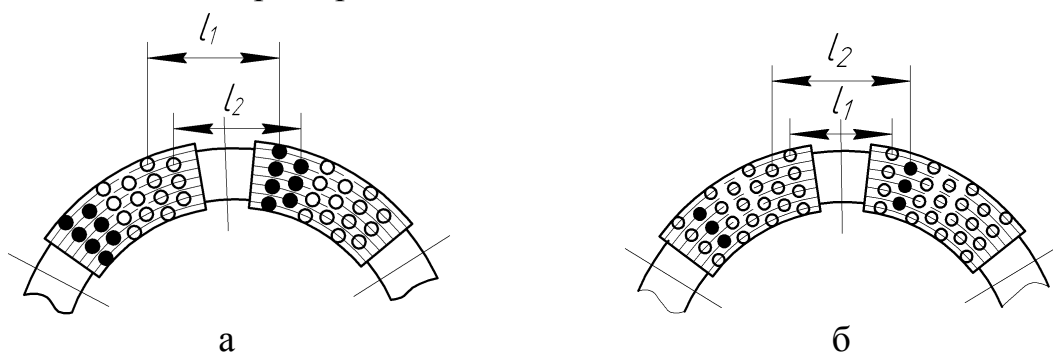


Рисунок 1 – Схема размещения алмазов в матрице:

а – I тип; **б** – II тип; ● – наиболее заглубленные в породу алмазы в секторе

На коронку действует осевая нагрузка P_{oc} , которая в статическом положении распределяется равномерно на каждый алмаз ($P_a = P_{oc}/n_k$, где n_k – количество алмазов в коронке). Положение каждого алмаза во время работы коронки определяется углом её поворота (φ) и углубкой коронки (z). Каждая линия резания коронки дополнительно характеризуется координатами поверхности забоя ($y(\varphi)$) в каждой своей точке (рис. 2). Тогда толщина слоя породы, срезаемая алмазом в конкретной точке забоя при определенном положении коронки (рис. 2 б), будет равна:

$$h_i = z - y_i, \quad (1)$$

где y_i – координата поверхности забоя перед конкретным алмазом.

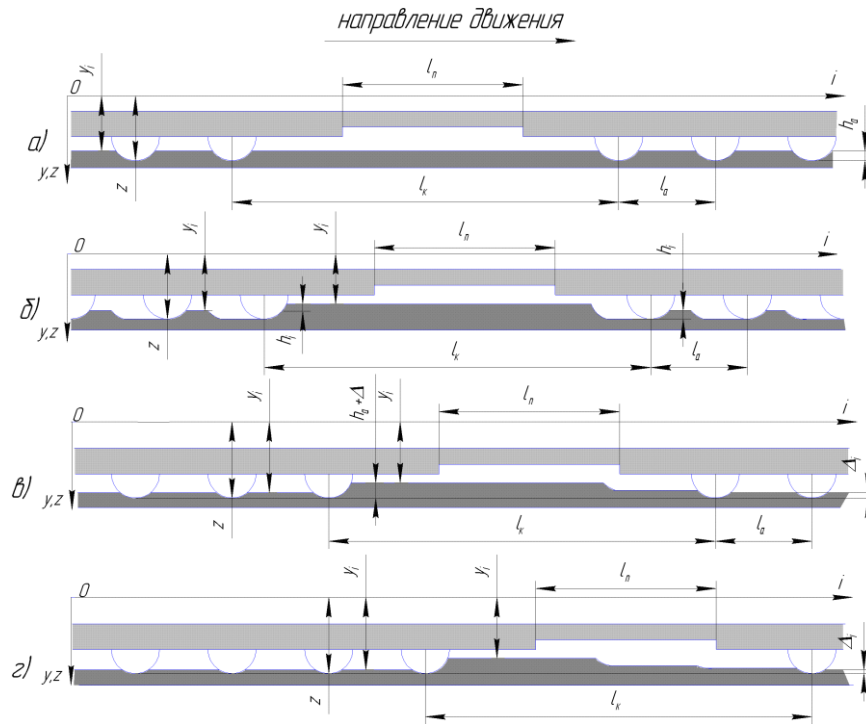


Рисунок 2 – Схема взаимодействия алмазов коронки одной линии резания с забоем скважины. Углубление алмазов в породу: а) первоначальная; б) при прохождении меньшего расстояния, чем расстояние между алмазами в пределах одного сектора (l_a); в) после прохождения расстояния l_a ; г) после прохождения расстояния $2l_a$. l_k – расстояние между первым алмазом сектора и последним алмазом предыдущего сектора; l_n – длина промывочного окна

С другой стороны, исходя из условия неизменности площади внедрения алмазов в забой при постоянной осевой нагрузке, имеем соотношение:

$$\sum_{i=1}^{n_a} h_i = n_k h_a \cdot \quad (2)$$

где h_a – углубка алмазов коронки в породу при статическом вдавливании, которая зависит от усилия на алмаз P_a и одинакова для всех алмазов:

$$h_a = \frac{P_a}{P_{um} \pi R} \cdot \quad (3)$$

где P_{um} – твердость породы по штампу; R – радиус алмаза.

При вращении коронки, за счет неравномерного распределения алмазов по одной линии резания $l_a < l_k$ (рис.2), происходит перераспределение сил сопротивления, действующих на алмазы и её периодическая углубка на величину Δ , соответствующая определенному положению коронки на забое.

$$\Delta = \frac{n_k h_a - \sum_{i=1}^{n_k} (z - y_i)}{n_k} = h_a - \frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^{n_k} (z - y_i). \quad (4)$$

При этом алмазы первого рабочего ряда будут внедрятся на максимально возможную для всех алмазов коронки величину h_{max} . Для коронок с раскладкой I типа ее значение составит:

$$h_{max} = h_a \left[1 + \sum_{i=1}^m (1 - \kappa_n)^i \right], \quad (5)$$

где $\kappa_n = n_1/n_a$, n_1 – количество алмазов в первом рабочем ряду сектора, n_a – количество алмазов в секторе; $m = (l_{\kappa}/l_a) - 1$, если отношение l_{κ}/l_a дробное, то m принимается равной целой части результата (без округления).

При изучении взаимодействия с забоем коронок с раскладкой II типа необходимо учитывать, что для коронок такого типа расстояние l_{κ} для двух смежных линий резания различное: большее значение ($l_{\kappa 2}$) для алмазов второго радиального ряда и меньшее – для первого ($l_{\kappa 1}$) ($l_{\kappa 1} = l_1$, $l_{\kappa 2} = l_2$ рис.1 б).

Полученные значения $h_{\max}$ для коронок с раскладкой II типа зависят от отношения $l_{\kappa 2}/l_a$ и приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Определение величин толщины максимального слоя породы, снимаемого алмазами коронки с раскладкой II типа

Величина $l_{\kappa 2}/l_a$	$h_{\max}$
$l_{\kappa 2}/l_a \leq 2$	$h_{\max} = h_a \left(3 - \frac{2n_1 + n_{12}}{n_a} + \kappa_n^2 \right)$
$2 < l_{\kappa 2}/l_a \leq 3$	$h_{\max} = h_a \left(4 - \frac{5n_1 + n_{12}}{n_a} + 4\kappa_n^2 - \kappa_n^3 \right)$
$3 < l_{\kappa 2}/l_a \leq 4$	$h_{\max} = h_a \left(5 - \frac{9n_1 + n_{12}}{n_a} + 10\kappa_n^2 - 5\kappa_n^3 - \kappa_n^4 \right)$

С использованием описанной модели была проведена сравнительная оценка однослойных коронок диаметром 59, 76 и 93 мм с различными раскладками алмазов. Рассматривались коронки, раскладка алмазов в которых определялась с учетом возможности различного соотношения длины сектора (l_c) и промывочного окна (l_n). При этом рассматривались коронки, в которых расстояние в одной линии резания (l_{κ}) между первыми алмазами сектора и последними алмазами предыдущего сектора было кратно или не кратно расстоянию между алмазами (l_a) в пределах одного сектора.

Определено, что для коронок с несколькими рабочими рядами в секторе наиболее рациональной конструкцией с точки зрения обеспечения максимума механической скорости бурения при меньшей нагруженности алмазов является коронка с раскладкой I типа. При такой раскладке алмазы первого рабочего ряда сектора нагружены равномерно. Однако, эта нагрузка не менее чем в 2 раза больше нагрузки, действующей на алмазы последующих рядов со стороны породы. Для раскладки II типа характерно неравномерное распределение нагрузки на алмазы первого рабочего ряда. Максимальная нагрузка приходится на алмазы второго радиального ряда и превышает нагрузку на алмазы третьего и последующих радиальных рядов более чем в 3 раза (по сравнению с раскладкой I типа этот показатель больше примерно на 25 %).

Учитывая различную толщину снимаемого слоя породы и окружную скорость для каждого алмаза, можно определить забойную мощность на отдельном алмазе, которая будет различна для алмазов даже одного радиального ряда. Как следствие, алмазы и торец коронки будут неравномерно нагреваться в процессе бурения. Для детального исследования температурных процессов на забое скважины необходимо одновременное

моделирование тепловых и гидравлических процессов, протекающих при работе коронки.

Для решения поставленной задачи целесообразно использовать метод конечных элементов с учетом основных законов механики сплошной среды. Составленная модель позволяет определять температуру, скорость течения жидкости, давление в любой точке призабойной зоны даже в самых мелких элементах и труднодоступных местах расчётной схемы. Основными исходными данными для составляемой модели являлись конструктивные параметры коронки с учетом раскладки алмазов, характеристики материалов матрицы и корпуса, горной породы, алмазов. Примеры результатов моделирования приведены на рисунке 3.

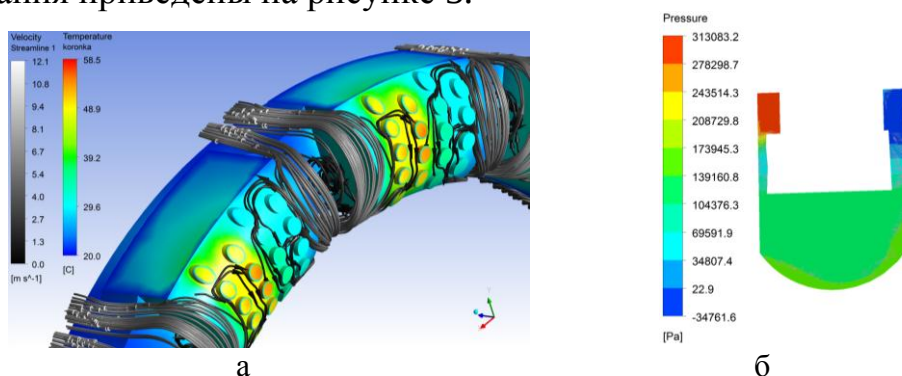


Рисунок 3 – Пример результатов моделирования процессов протекающих на забое скважины при бурении скважины: а – результаты моделирования (температура нагрева и скорость течения жидкости); б – распределение давления жидкости при бурении скважины однослойной алмазной коронки с тремя радиальными рядами в секторе

Компьютерное моделирование показало, что распределение температуры среди объемных алмазов следующая: максимально нагретыми являются алмазы второго радиального ряда; алмазы первого радиального ряда сильнее омываются промывочной жидкостью поэтому являются менее нагретыми, причем независимо от типа раскладки; минимально нагретыми являются алмазы последнего радиального ряда (рис. 3, а). Причем чем меньше радиальных рядов в секторе, тем меньше температура нагрева алмазов одного и того же радиального ряда (рис. 4).

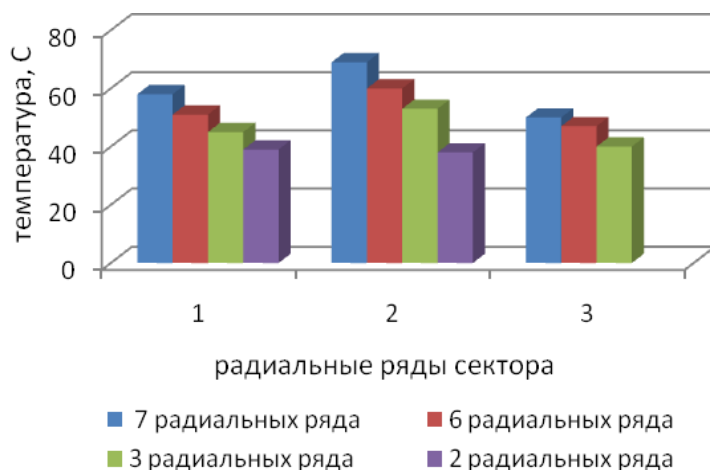


Рисунок 4 – Гистограмма сравнения температуры нагрева первых трех радиальных рядов коронок с 7, 6, 3 и 2 радиальными рядами в секторе

Режимы бурения – главные факторы, влияющие на температуру нагрева (T , °C) плоскости контакта алмаза с породой. Однако, зависимость температуры нагрева от режимов бурения неодинакова для коронок с разным количеством радиальных рядов в секторе. Так, при неизменной осевой нагрузке для коронок с четырьмя радиальными рядами в секторе зависимость температуры нагрева контакта алмаза с породой имеет вид:

$$T = -1,4 \cdot 10^{-7} n^2 q - 0,7 \cdot 10^{-5} n^2 + 1,5 \cdot 10^{-4} n \cdot q + 0,082n - 0,15q + 30 \quad (6)$$

- для коронок с семью радиальными рядами в секторе:

$$T = 1,8 \cdot 10^{-7} n^2 q - 2,2 \cdot 10^{-5} n^2 - 3,7 \cdot 10^{-4} n \cdot q + 0,094n - 1,7 \cdot 10^{-3} q + 23; \quad (7)$$

- для коронок с тремя радиальными рядами в секторе:

$$T = -3,8 \cdot 10^{-4} n \cdot q + 0,059n + 21; \quad (8)$$

- для коронок с двумя радиальными рядами в секторе:

$$T = 1,2 \cdot 10^{-7} n^2 q - 0,9 \cdot 10^{-5} n^2 - 3,8 \cdot 10^{-4} n \cdot q + 0,043n + 4,6 \cdot 10^{-2} q + 18. \quad (9)$$

Учитывая неравномерность механической и тепловой нагрузки алмазов коронки, рекомендуется в первом рабочем ряду сектора использовать более прочные алмазы, а для последующих рядов возможно использование алмазов меньшей прочности. Причем выбор прочности алмаза должен учитывать, что чем больше отношение расстояния в линии резания между первыми алмазами сектора и последними алмазами впередиидущего сектора (l_k) к расстоянию между алмазами внутри сектора (l_a), тем больше толщина слоя породы срезаемая алмазами первого рабочего ряда и температура их нагрева. Таким образом прочность алмазов первых двух радиальных рядов (P_1) и других радиальных рядов (P_2) сектора должна быть связаны следующими соотношениями: для коронок I типа схемы раскладки алмазов – $P_1 = P_2 l_k / l_a$, для коронок II типа – $P_1 = P_2 (l_k / l_a + 1)$. При этом наиболее термостойкие объемные алмазы следует располагать во втором радиальном ряду. Выбирая осевую нагрузку на коронку, необходимо учитывать разрушающую нагрузку менее прочных алмазов, т.е. алмазов стоящих в последнем радиальном ряду сектора.

Для оценки работоспособности коронок, в радиальных рядах которых установлены синтетические алмазные монокристаллы зернистостью 1600/1250 мкм с повышенной термостойкостью различной прочности, изготовлена опытная буровая коронка диаметром 59 мм (рис. 5 б) с использованием уже имеющегося пуансона (рис. 5 а) для разработанных ранее коронок с 22 радиальными рядами алмазов в секторе.



а



б

Рисунок 5 – Испытуемая коронка: а – пуансон; б – опытные образцы

Испытания коронки проходившие в ИСМ, осуществлялись в лабораторных условиях на экспериментальном стенде, выполненном на основе модернизированного радиально-сверлильного станка модели 2Н58, в ДонНТУ на буровом станке СКБ-4 с промывкой насосом НБЗ-120/40. Режимы бурения варьировались в пределах, соответствующих имеющимся рекомендациям для алмазного бурения. Бурение велось по образцам пород V-IX категорий по буримости.

За базу сравнения были приняты серийные импрегнированные буровые коронки типа БС06 диаметром 59 мм, оснащенные синтетическими алмазами АС 160Т зернистостью 355/300 мкм. Основные результаты испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты сравнительных лабораторных испытаний буровых коронок

Тип коронки	Размер алмазов, мкм	Параметры режима бурения		Механическая скорость бурения, $V_{\text{мех}}$, м/ч
		Частота вращения, об/мин	Осевая нагрузка, даН	
Однослойная (экспериментальная)	1600/1250	400	500	2,9
			750	5,0
			1000	6,0
Импрегнированная БС06	315/250	400	500	2,1
			750	2,6
			1000	3,3

Механическая скорость бурения однослойными коронками в 1,4–1,8 раза превышает аналогичный показатель для импрегнированных коронок, что свидетельствует о более эффективном разрушении породы средней крепости коронками, оснащенными синтетическими алмазами с размером зерна 1600/1250 мкм.

Результаты экспериментальных данных показали, что использование новых алмазных монокристаллов даёт существенные результаты с точки зрения повышения механической скорости бурения. При этом использование

в секторе коронки алмазного сырья разной прочности обеспечивает не только рациональное использование алмазного сырья, но и сохраняет качество работы коронки.

ПОЛОЖЕНИЕ 2 Интенсификация процесса разрушения горных пород V-VIII с пропластками пород более высоких категории по буримости достигается использованием конструкции алмазной коронки, в каждом секторе которой будет размещаться не более двух радиальных рядов объемных алмазов, при следующих соотношениях в геометрических размерах матрицы коронки:

- длина промывочного канала по внешнему краю коронки равна расстоянию между рядами объемных алмазов в секторе;
- длина сектора по внешнему краю коронки составляет три длины промывочного канала;
- сумма длин сектора и промывочного канала по внешнему краю коронки должна находиться в пределах не более 5-5,5 диаметров объемных алмазов.

Экспериментальные исследования коронки с 22 радиальными рядами алмазов в секторе показали, что из-за большой длины сектора происходит скопление шлама в его сбегающей части (рис. 6).



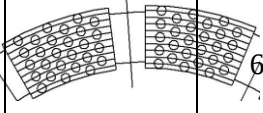
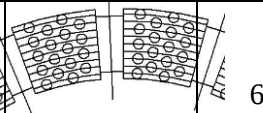
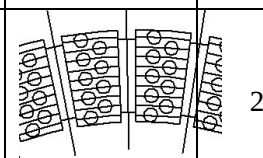
Рисунок 6 – Пример скопления шлама на сбегающей части сектора коронки

Данную проблему решает возможность уменьшения длины сектора с сохранением общего количества алмазов коронки.

Для исследования работы коронок с укороченным сектором были выбраны коронки одного диаметра с одинаковым количеством объемных алмазов, но различным количеством секторов и радиальных рядов в них. Результаты аналитических исследований (табл. 3) показали, что уменьшение количества радиальных рядов в секторе, и как следствие его длины l_c , снижает перепад нагрузки на алмазы (рис. 7).

Равномерная нагрузка на все алмазы коронки наблюдается только в случае размещения в каждом секторе одного рабочего ряда, т.е. двух радиальных рядов. Толщина снимаемого слоя породы любым монокристаллом в таких коронках всегда одинакова и равна h_a ($h_a = h_{max} = h_1$) это объясняется равномерным распределением алмазов по одной линии резания.

Таблица 3 – Результаты аналитического исследования взаимодействия алмазов коронки диаметром 93мм с породой в процессе бурения

№ п/п	Конструкция секторов	Кол-во радиал. рядов в секторе	Кол-во секторов	Всего алмазов	l_a , мм	h_a , мм	Толщина слоя породы, срезаемого соответствующим радиальным рядом мм			Углубка за оборот, мм	h_{max}/h_2
							h_1	h_2	h_3		
1		6	12	324	5,13	0,0087	0,022	0,022	0,002	0,3132	11
2		6	18	324	4,79	0,0087	0,015	0,015	0,0019	0,3132	7,89
3		2	36	324	-	0,0087	0,0087	0,0087	-	0,3132	1

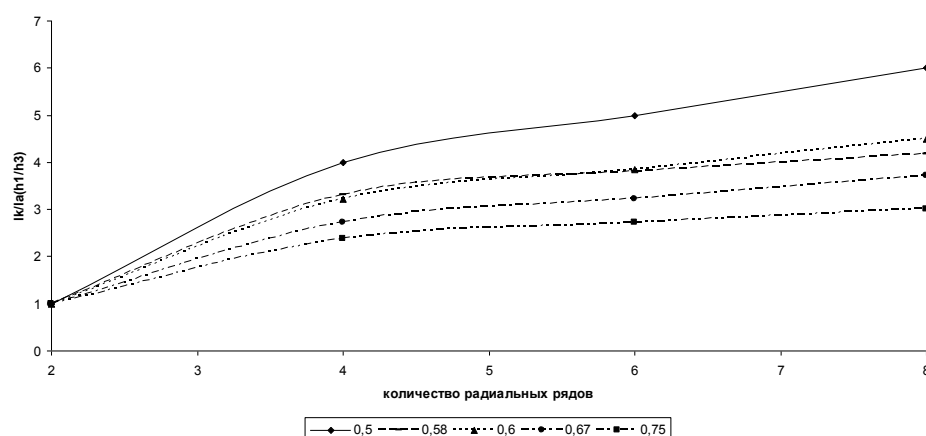


Рисунок 7 – График зависимости $h_{1(2)}/h_3$ от количества радиальных рядов в секторе для конструкций коронок, соотношение $l_c/(l_c+l_n)$ которых равно 0,5; 0,58; 0,6 и 0,75. $h_{1(2)}/h_3$ – толщина слоя породы срезаемая алмазами первого или второго, третьего радиальных рядов сектора

Равномерная нагрузка на все алмазы коронки наблюдается только в случае размещения в каждом секторе одного рабочего ряда, т.е. двух радиальных рядов. Толщина снимаемого слоя породы любым монокристаллом в таких коронках всегда одинакова и равна h_a ($h_a=h_{max}=h_1$) это объясняется равномерным распределением алмазов по одной линии резания.

Для детального изучения распределения механических нагрузок в коронках с укороченными секторами методом конечных элементов проведено моделирование ее работы на забое скважины с учетом осевых и крутящих усилий. Результаты моделирования показали, что сектор с небольшим количеством радиальных рядов выдерживает максимально возможные для техники режимы бурения (на рисунке 8 показаны результаты

моделирования работы коронки с 4 радиальными рядами в секторе при осевой нагрузке 20кН и частоте вращения 1000 об/мин).

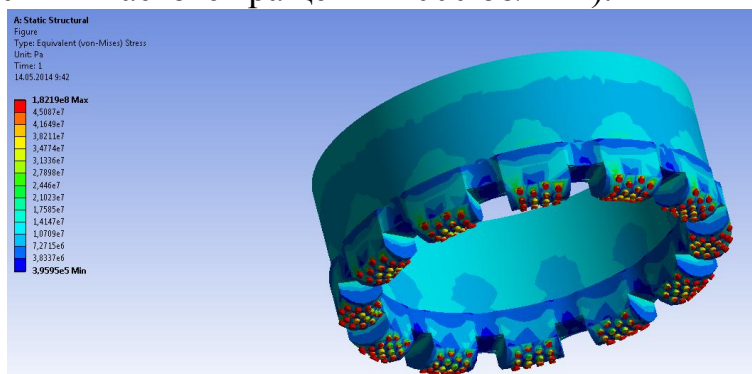


Рисунок 8 – Определение механических напряжений в алмазе и коронке с учетом действующей осевой нагрузки и крутящего момента

Математическое моделирование температурных режимов таких коронок показало, что при одних и тех же режимах бурения, снижая количество радиальных рядов в секторе на один, можно добиться уменьшения температуры нагрева алмаза на 30-40% (рис.8), что позволяет форсировать режимы бурения, избегая чрезмерного перегрева алмаза.

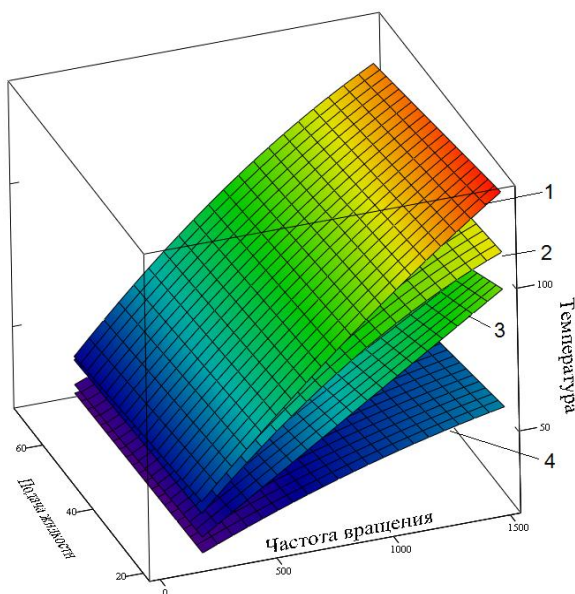


Рисунок 9 – График зависимости температуры на контакте алмаза с породой от частоты вращения и подачи промывочной жидкости коронки диаметром 93 мм :
1 – четыре; 2 – семь; 3 – три ;4 – два радиальных ряда в секторе

Так, нагрев алмазов первых двух радиальных рядов сектора коронки с 4 радиальными рядами в секторе более равномерный чем у коронок с 7 радиальными рядами в секторе (рис. 9). В коронке с 7 радиальными рядами при частоте вращения 1500 об/мин нагрев алмазов второго радиального ряда сектора превышает нагрев первого *не менее чем на 20%* в то время как в коронке с 4 радиальными рядами это превышение составляет *не более 12%*. К тому же, температура нагрева алмазов на контакте с породой в процессе бурения при одной и той же осевой нагрузке на алмаз у *коронки с 4 радиальными рядами на 5-20% меньше чем алмазов коронки с 7 радиальными рядами в секторе.*

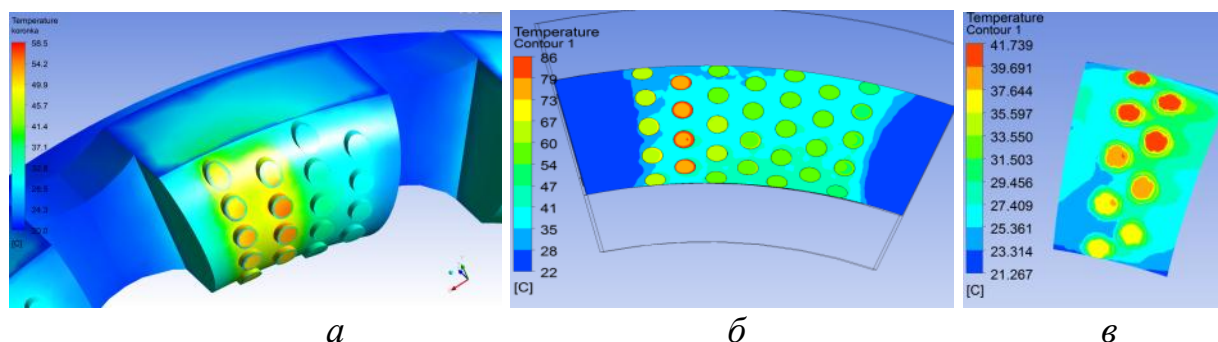


Рисунок 10 – Распределение температуры в пределах одного сектора торцевой части коронки:

а – с четырьмя; б – с семью; в – с двумя радиальными рядами в секторе

Как показывают результаты, приведенные в таблице 4, снижение количества радиальных рядов в секторе позволяет увеличивать осевую нагрузку на коронку избегая чрезмерного перегрева алмаза. При этом, вырабатывая одну и ту же мощность на разрушение породы можно рассчитывать на рациональное распределение температурной нагрузки на алмазы.

Таблица 4 – Максимальная температура (°C) контакта алмаза с породой при бурении коронками диаметром 93мм с различной осевой нагрузкой на коронку при подачи промывочной жидкости 40 л/мин

Кол-во радиальных рядов в секторе	Осевая нагрузка, кН	Мощность, Вт	Температура при частоте вращения 600 об/мин, °C	Мощность, Вт	Температура при частоте вращения 800 об/мин, °C	Мощность, Вт	Температура при частоте вращения 1000 об/мин, °C
7	20	75	64	228	76	303	86
4	22		78		92		105
2	69		68		81		95

Лишь алмазы коронки с двумя радиальными рядами в секторе равномерно омываются и охлаждаются промывочной жидкостью (рис.10, в), что является одним из преимуществ данной конструкции коронки. Температура нагрева алмазов коронки с двумя радиальными рядами в секторе в 1,3–3 раза меньше, чем у коронки с четырьмя. Для коронки с 4 радиальными рядами в секторе увеличение нагрузки на 20 % приводит к нагреву алмаза на 60 %, а для коронки с двумя радиальными рядами увеличение нагрузки на 20 % приводит к перегреву алмаза на 14 %.

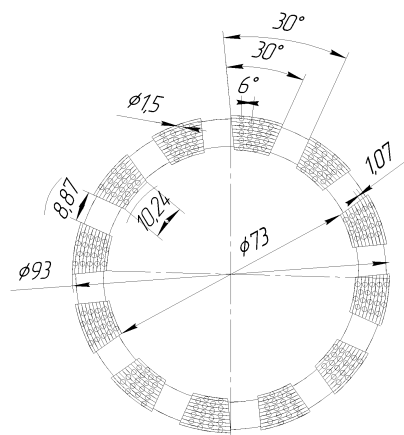
Таким образом коронки с двухрядной раскладкой имеют ресурс для форсирования режимов бурения, что позволит повысить механическую скорость проходки скважины.

Учитывая полученные данные, технические возможности и потребности производства, разработана конструкция однослойной буровой коронки диаметром 93 мм, оснащенной термостойкими монокристаллическими алмазами с размером зерна 1600/1250 мкм (рис. 11).

Алмазы в секторе разложены по I типу раскладки. Особенностью конструкции данной коронки является оснащение радиальных рядов ее рабочего торца алмазными зернами различной прочности, т.е. начиная с первого ряда (по набегающей части сектора) по последний, понижается прочность алмазных зерен.



а



б

Рисунок 11 – Коронка БСО-1: а – опытный образец; б – чертеж торца коронки

Опытные образцы разработанной коронки БСО-1 диаметром 93 мм испытывались на объектах ГПП «Донецкгеология». Испытания проводились при бурении скважин установкой УКБ-4С в породах VII-IX категории по буримости. Результаты сравнительных испытаний (табл. 5) показали, что 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. Полученные результаты подтверждают эффективность использования коронок с количеством радиальных рядов в секторе, не превышающем 4.

Таблица 5 – 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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является завершенной научно-исследовательской работой, в которой на основании экспериментальных и теоретических исследований установлены зависимости забойных процессов при бурении скважины от конструктивных особенностей породоразрушающего инструмента, позволяющие получить рекомендации по проектированию однослойного алмазного породоразрушающего инструмента.

Основными научными результатами, выводами и рекомендациями является следующее:

1. Разработана расчётная модель, позволяющая определять углубку коронки

при её движении по забою, а также толщину слоя породы, срезаемую каждым алмазом, в зависимости от раскладки алмазов и её конструктивных параметров.

2. Получена зависимость максимальной толщины слоя породы, срезаемой алмазом от количества и характера расположения алмазов на торце коронки с учетом углубления алмаза в породу при статическом вдавливании.

3. Установлено, что чем больше отношение расстояния в линии резания между первыми алмазами сектора и последними алмазами впередиидущего сектора (l_k) к расстоянию между алмазами внутри сектора (l_a) тем больше нагрузка, воспринимаемая алмазами первых радиальных рядов сектора

4. Определены следующие рациональные соотношения между конструктивными параметрами однослойной алмазной коронки, армированной синтетическими алмазными монокристаллами зернистостью 1600/1250 мкм с повышенной термостойкостью, предназначенной для бурения в породах V-VIII с пропластками до IX категории по буримости:

- Длина окна промывочного канала равна расстоянию между рядами алмазов ($l_k=l_p$);
- Длина сектора равна трем длинам окна промывочного канала ($l_c=3l_k$);
- Сумма длин сектора и окна промывочного канала находится в пределах 5-5,5 диаметров объемных алмазов ($l_c+l_k=5\div 5,5d_a$).

5. Прочность объемных алмазов первых двух радиальных рядов (P_1) и других радиальных рядов (P_2) сектора должны быть связаны следующими соотношениями: если объемные алмазы первого и последнего радиальных рядов сектора размещены на разных линиях резания, тогда $P_1=P_2l_k/l_a$, а если они размещены на одной линии резания, то $P_1=P_2(l_k/l_a+1)$, где l_k и l_a – расстояния в линии резания, соответственно, между первыми алмазами сектора и последними алмазами предыдущего сектора и между соседними алмазами одного сектора. При этом наиболее термостойкие объемные алмазы следует располагать во втором радиальном ряду.

6. Разработана и реализована трехмерная математическая модель, позволяющая определять температуру, скорость течения жидкости, давление в любой точке призабойной зоны при бурении однослойной алмазной коронкой.

7. Установлено, что снижая количество радиальных рядов в секторе на один, можно добиться уменьшения температуры нагрева алмаза на 30-40%.

8. Путем аппроксимации результатов компьютерного моделирования температурных процессов на забое, получена зависимость температуры нагрева алмаза при бурении скважины от частоты вращения инструмента и подачи промывочной жидкости для коронок с 2, 3, 4 и 7 радиальными рядами в секторе.

9. Разработана конструкция однослойной алмазной коронки, оснащенной термостойкими монокристаллическими алмазами с размером зерна 1600/1250 мкм различной прочности с четырьмя радиальными рядами в секторе, внедрение которой позволило увеличить механическую скорость бурения в

1,67 раза, а проходку на коронку в 1,64 раза.

10. Определены перспективы дальнейшего использования однослойных алмазных коронок с укороченным до двух радиальных рядов сектором.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Попова, М. С.** Результаты компьютерного моделирования температурного режима алмазного бурового инструмента // Научно-технический журнал «Инженер-нефтяник». – 2018. – №2. – С. 23-26.

2. **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». – 2018. – №8. – С. 26-31.

Статьи в зарубежных научных журналах и изданиях, включенных в Scopus:

3. 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, **М. С. Popova** Journal of Superhard Materials, March 2015, Volume 37, [Issue 2](#), pp 132-139.

Другие публикации РФ:

4. **Нескоромных, В. В.** Разработка алмазного инструмента с применением данных компьютерного моделирования и результатов системных исследований / В.В. Нескоромных, **М.С. Попова** // Научно-технический журнал «Инженер-нефтяник». – 2018. – №3. – С. 18-26.

5. **Попова, М.С.** Особенности оснащения алмазного породоразрушающего инструмента синтетическими монокристаллами с повышенной прочностью и термостойкостью // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XVIII Международного симпозиума им. акад. М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 115-летию со дня рождения академика Академии наук СССР, профессора К.И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения члена-корреспондента Академии наук СССР, профессора Ф.Н. Шахова. Том II; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – С. 421-422.

6. **Попова, М.С.** Разработка алмазного породоразрушающего инструмента на основе синтетических монокристаллов для бурения геологоразведочных скважин. / Проблемы недропользования: Сборник научных трудов. Часть I / Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 2016. – С. 201-204.

7. **Попова, М.С.** Исследование гидравлических и термодинамических процессов при бурении однослойной алмазной коронкой с синтетическими монокристаллами / 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. 769-772.

8. Каракозов А.А. Однослойные алмазные коронки для бурения пород V-VIII (IX) категории по буримости / А.А. Каракозов, **М.С. Попова**, С.Н. Парфенюк // Материалы Международной научно-практической конференции «Бурение в осложненных условиях», Санкт-Петербург, 4-6 октября 2016.

9. **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.

10. **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.

Патенты:

11. Алмазна одношарова бурова коронка. Патент на корисну модель №91720 E21B 7/00 / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, Р. К. Богданов, Загора А. П. // – опубл. 10.07.2014, Бюл. №13

12. Алмазна одношарова бурова коронка. Патент на корисну модель №92032 E21B 7/00 / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, Р. К. Богданов, Загора А. П. // – опубл. 25.07.2014, Бюл. №14

13. Алмазна одношарова бурова коронка. Патент на винахід №108943 E21B 10/36 E21B 10/46 / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, Р. К. Богданов, А. П. Загора // – Заявл. 24.02. 2014 ; опубл. 25.06.2015, Бюл. №12

14. Алмазна одношарова бурова коронка. Патент на винахід №108943 E21B 10/36 E21B 10/46 / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, Р. К. Богданов, А. П. Загора // – Заявл. 24.02. 2014; опубл. 25.06.2015, Бюл. №12.

Список в журналах, рекомендованных ВАК Украины за последние 5 лет

15. Каракозов, А. А. Разработка алмазного породоразрушающего инструмента для колонкового бурения скважин на основе синтетических монокристаллов с повышенной термостойкостью / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, Р. К. Богданов, Загора А. П. // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Гірничо-геологічна». – Вип. 1(20). – Донецьк, ДонНТУ, 2014. – С. 133–138.

16. Каракозов, А. А. Результаты исследований алмазного породоразрушающего инструмента для колонкового бурения скважин на основе синтетических монокристаллов с повышенной термостойкостью / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, С.Н. Парфенюк, Р. К. Богданов, Загора А. П. //

Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Гірничо-геологічна». – Вип. 1(20). – Донецьк, ДонНТУ, 2014. – С. 132–137.

17. Каракозов, А. А. Исследование теплового режима однослойной алмазной коронкой с синтетическими монокристаллами / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, С.Н. Парфенюк, Р. К. Богданов, Закора А. П. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Гірничо-геологічна». – Вип. 1(22). – Донецьк, ДонНТУ, 2015. – С. 39–44.

18. Каракозов, А. А. Уточнение критерия удельной энергоёмкости объёмного износа при оценке эффективности процесса взаимодействия импрегнированной алмазной коронки с породой / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, С.Н. Парфенюк, Р. К. Богданов, Закора А. П. // Наукові праці ДонНТУ: Серія Гірничо-геологічна. – Донецьк: ДонНТУ, 2016. – № 2(25), 2016. – С. 86-88.