

На правах рукописи



Кубасов Владимир Викторович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ БУРЕНИЯ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН В ТВЕРДЫХ ПОРОДАХ
ПУТЁМ МОДЕРНИЗАЦИИ МАТРИЦ АЛМАЗНОГО
ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**

*Специальность 25.00.14 - Технология и техника
геологоразведочных работ*

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

г. Москва - 2015

Работа выполнена на кафедре Современных технологий бурения скважин имени проф. Б.И. Воздвиженского в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ-РГГРУ) и на базе Открытого акционерного общества «Тульское научно-исследовательское геологическое предприятие»

Научный руководитель:

Куликов Владимир Владиславович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Горшков Лев Капитонович
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры механики военно-
космической академии
им. А.Ф. Можайского,
г. Санкт-Петербург.

Бучковский Евгений Владимирович
кандидат технических наук,
руководитель проекта
ООО «Инновации. Технологии.
Сервис» г. Москва

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Националь-
ный исследовательский Томский политех-
нический университет», г. Томск

Защита диссертации состоится «24» ноября 2015г в 14 часов 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.121.05 при Государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ-РГГРУ) по адресу: 179970, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, аудитория 4-56.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГРИ-РГГРУ

Автореферат разослан «___» _____ 2015 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук

А.П. Назаров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Бурение скважин является основным способом разведки полезных ископаемых. При этом наиболее эффективным в настоящее время и обозримом будущем способом сооружения скважин в твердых горных породах является алмазное колонковое бурение с применением одинарных и двойных снарядов, в том числе наиболее прогрессивными техническими средствами – снарядами со съёмными керноприёмниками (ССК, КССК) отечественного и зарубежного производства.

Расширение области применения алмазного бурения охватывает широкий диапазон горных пород и обуславливает применение соответствующего типа и качества алмазного породоразрушающего инструмента. При бурении ССК в породах средней твёрдости в ФГУПП «Запсибгеолсъёмка» станками Diames-282 максимальная проходка, достигнутая алмазной коронкой конструкции АО «Тульское НИГП» типа К-75-3СВМ составила 1046,8 м. При бурении в этих же геолого - технических условиях проходка на коронку фирмы Борт-Лонгир типа NQ достигла 477,2 м. Это высокие показатели по ресурсу как отечественных так и зарубежных алмазных коронок

Однако при бурении в твёрдых и очень твёрдых горных породах, которые составляют около 70% объёма алмазного бурения в РФ, ресурс алмазных коронок значительно снижается, как при использовании отечественного, так и зарубежного породоразрушающего инструмента и не всегда превышает трёх-пяти десятков метров. Поэтому необходимо провести исследования по совершенствованию алмазных коронок с целью повышения их эксплуатационных показателей при бурении в твёрдых и очень твёрдых породах, прежде всего снарядами ССК и КССК, которыми выполняется около 60% объёма алмазного бурения, а также одинарными колонковыми снарядами (ОС). Эти исследования по модернизации алмазных коронок необходимо провести по следующим направлениям: улучшение прочностных свойств низкосортных природных алмазов на основе обработки в аппаратах с вихревым слоем; выбор матричных композиций с заданными свойствами, термическая обработка алмазосодержащих матриц и уточнение отдельных конструктивных параметров инструмента. Повышение эффективности бурения разведочных скважин ССК (КССК) и одинарными снарядами в твердых и очень твердых

горных породах за счёт модернизации алмазных коронок является актуальной задачей.

Цель работы – улучшение качества алмазов, повышение геологической и технико-экономической эффективности бурения разведочных скважин путём применения модернизированного отечественного алмазного породоразрушающего инструмента, успешно конкурирующего с зарубежным.

Идея работы - повышение эксплуатационных показателей алмазного породоразрушающего инструмента путём его модернизации, за счёт улучшения качества применяемых низкосортных алмазов, подбора матриц с заданными свойствами, термообработки инструмента с учётом релаксации напряжений в материале матрицы и выбора рациональных отдельных параметров коронок и режимов бурения ими.

Задачи исследований.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие основные задачи:

1. Анализ отечественного и зарубежного опыта алмазного бурения геологоразведочных скважин ССК (КССК) и ОС.
2. Исследование и моделирование износа алмазных буровых коронок.
3. Исследование движения ферромагнитных элементов и частиц дробимого материала в вихревом слое аппарата АВСП-100
4. Выбор состава матриц алмазных коронок.
5. Исследование остаточных напряжений композиционных матриц коронок с учетом релаксации после термообработки.
6. Модернизация конструкций алмазных коронок и их опробование в стендовых и производственных условиях.

Методика исследований. Для решения поставленных задач применялся комплексный метод исследований, включающий анализ и обобщение опубликованных работ по выбранной теме, а также теоретические, стендовые и экспериментально-производственные исследования с использованием современных установок, приборов и вычислительной техники.

Научная новизна проведенных исследований заключается в получении следующих результатов:

1. Получена зависимость для определения скорости частицы, необходимой для её разрушения при столкновении с преградой.
2. Уточнены зависимости распределения нормального давления и работы трения за один оборот алмазной коронки от осевой нагрузки и

конструктивных параметров инструмента с учётом влияния продольных вибраций на износ коронки.

3. Установлена зависимость диаметра алмазного зерна в объемном слое матрицы коронки от действующего усилия и параметров физико-механических свойств горных пород.

4. Уточнена зависимость определения остаточных напряжений в матрице алмазной коронки с учетом развития процессов релаксации.

5. Установлены закономерности взаимосвязи конструктивных параметров модернизированных алмазных коронок, параметров технологического режима и механической скорости бурения от физико-механических свойств горных пород.

Практическая ценность работы. Практическая ценность полученных приоритетных результатов:

1. Разработана расчетная методика и составлена компьютерная программа GrownBit, функционирующая в среде операционной системы Windows, для определения максимальных значений работы трения и распределения нормального давления вдоль радиуса алмазной коронки.

2. Усовершенствован способ избирательного дробления дефектных и трещиноватых низкосортных природных алмазов в вихревом слое аппарата АВСП-100.

3. Выполнена модернизация конструкции алмазных коронок и проведены их испытания в стендовых условиях АО «Тульское НИГП» и на объектах геологоразведочных работ ООО «Норильскгеология».

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций автора диссертации обоснована необходимым объемом теоретических и экспериментальных исследований, а также проверкой положений выводов и рекомендаций в условиях производственных и максимально приближенным к производственным и достаточной сходимостью опытных данных с результатами ранее проведенных теоретических исследований.

Результаты, установленные в ходе диссертационного исследования, используются в учебном процессе при чтении курсов «Бурение скважин на твердые полезные ископаемые», «Направленное бурение скважин».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных международных научных конференциях профессорско-преподавательского состава научных сотрудников, аспирантов и студентов МГРИ – РГГРУ имени Серго Орджоникидзе «Новые

идеи в науке о Земле», а также на ежегодных международных научных конференциях Тульского государственного университета: «Приоритетные направления развития науки и технологий», и «Инновационные наукоемкие технологии».

Публикации. Результаты исследований по теме освещены в 22 опубликованных работах, поданы три заявки на предполагаемые изобретения и полезные модели в институт ФИПС Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, по двум из которых уже получены патенты.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 82 наименований. Диссертация содержит 24 таблицы и 27 рисунков. Во введении обоснованы актуальность и научно-техническое значение повышения эффективности бурения разведочных скважин ССК (КССК) и ОС для выявления промышленных запасов твердых полезных ископаемых. Определены цель и задачи диссертационной работы, представлены основные защищаемые положения и результаты реализации работы.

В главе 1 рассмотрено современное состояние проблемы повышения износостойкости и прочности алмазного породоразрушающего инструмента для ССК (КССК), ОС проведен анализ факторов, определяющих его эксплуатационные показатели, произведен выбор и обоснование перспективных направлений исследований по повышению работоспособности алмазного породоразрушающего инструмента. Показано, что наиболее перспективными являются: повышение прочностных свойств природных алмазов пониженного качества, подбор композиционного состава матриц с заданными свойствами и объемное упрочнение матриц, а также уточнение отдельных конструктивных параметров инструмента.

В главе 2 изложена методика комплексных исследований.

В главе 3 приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по упрочнению алмазов в вихревом слое, подбору рациональных составов матриц, исследованию остаточных напряжений и структурных характеристик композиционных матриц после термообработки и выбору отдельных конструктивных параметров коронок.

В главе 4 изложены результаты стендовых и производственных испытаний алмазного породоразрушающего инструмента.

В главе 5 дана технико - экономическая оценка применения алмазных модернизированных коронок для КССК и ОС.

Работа выполнена в Российском государственном геологоразведочном университете имени Серго Орджоникидзе с использованием лабораторных стендов АО «Тульское НИГП». Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю д.т.н. профессору Куликову В.В. за постоянную методическую помощь поддержку в работе. Автор искренне признателен преподавателям и сотрудникам кафедры Современных технологий бурения скважин им. Б.И. Воздвиженского МГРИ-РГГРУ, сотрудникам отдела геологоразведочных технологий АО «Тульское НИГП», а также научному консультанту д.т.н. Будюкову Ю.Е.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Решению отдельных вопросов повышения стойкости алмазного породоразрушающего инструмента посвящены работы многочисленных ученых и крупных специалистов: Воздвиженского Б.И., Шамшева Ф.А., Уткина И.А., Остроушко А.И., Кардыша В.Г., Башкатова Д.Н., Кудряшова Б.Б., Сулакшина С.С., Козловского Е.А., Калинина А.Г., Власюка В.И., Соловьева Н.В., Горшкова Л.К., Онищина В.П., Морозова Ю.Т., Корнилова Н.И., Будюкова Ю.Е., Спирина В.И., Пономарева П.П., Осецкого А.И., Куликова В.В., Бронникова И.Д., Ганджумяна Р.А., Рябчикова С.Я., Володченко В.К., Богданова Р.К., Сасаки.

Проведенный анализ работ, опубликованных упомянутыми и другими исследователями, а также собственные экспериментальные исследования автора по алмазному бурению показали, что необходимые для повышения работоспособности инструмента закономерности износа алмазного инструмента при бурении ССК (КССК), ОС в твердых и очень твердых горных породах, вопросы армирования коронок алмазами пониженного качества с приданием им повышенной прочности и выбора их оптимальной зернистости, а также технологического процесса прессования и термообработки матриц раскрыты не полностью. Исследования остаточных напряжений и структурных характеристик композиционных матриц после термообработки и особенности релаксации материала матриц проведены не достаточно полно, что не позволяет оптимизировать процесс криогенной обработки коронок. Важным остается вопрос выбора и совершенствования режимов бурения на базе проведения стендовых и производственных испытаний алмазного породоразрушающего инструмента. Выполненные по вышеуказанным вопросам исследования позволили сформулировать следующие основные защищаемые положения.

Первое защищаемое научное положение. Применение аппаратов вихревого слоя ферромагнитных частиц обеспечивает дробление, овализацию и упрочнение всей обрабатываемой массы алмазов вследствие создания большой частоты удара при малой величине силы удара.

Известно, что технические алмазы высокого качества применяются в буровых коронках без предварительной обработки, а технические алмазы пониженного качества обязательно подвергаются предварительной обработке с целью разделения по размерам и форме, а также для выделения алмазов с более высокими прочностными свойствами. Исследования по предварительной обработке алмазов проводились на специальных аппаратах институтами: ВИТРОм, ВНИИАЛМАЗом, НИИЭМАЛЬХИММАШ, ИСМ АН УССР. Указанными институтами проводились исследования преимущественно в области обработки синтетических алмазов. Но более широко и системно эти работы осуществлялись в АО «Тульское НИГП» с применением стандартного аппарата вихревого слоя АВСП-100, главным образом, с природными алмазами. Анализ проведенных исследований интенсивности диспергирования алмазов показал, что наиболее перспективно для овализации и избирательного дробления алмазов применение аппарата вихревого слоя. Нами рассмотрены энергетические зависимости разрушения твёрдого тела и с учётом формулы проф. Л.А. Шрейнера, определяющей влияние масштабного фактора на прочность твёрдого тела, найдено выражение для определения скорости частицы необходимой для её разрушения при столкновении с преградой.

$$V_p \geq \left(\sigma_p + \frac{a}{l} \right) \sqrt{\frac{1}{E\gamma}}, \quad (1)$$

где V_p - скорость частицы, необходимая для её разрушения, м/с;

a - опытный коэффициент, МПа·м; (определяется по методике Л.А. Шрейнера);

l - длина частицы, м;

σ_p - предел прочности материала частицы при сжатии, МПа.

E - модуль упругости материала частицы, МПа;

γ - плотность материала частицы, кг/м³;

Из анализа формулы (1) следует, что разрушение частиц материала в результате свободного удара в вихревом слое практически не возможно, так как не достигается необходимая скорость разрушения. По данным американских

исследователей (патент США № 369 1130) необходимая скорость разрушения составляет, например, для кварцевого песка – 34 м/с.

Однако скорость движения ферромагнитного элемента, обуславливающего и скорость движения частицы материала в вихревом слое, как показали исследования Мирошниченко В.Ф. и Семенюка Н.И., составляет только несколько метров в секунду. Поэтому в вихревом слое разрушение за счёт только свободного удара маловероятно.

Для оценки возможности эффективного разрушения алмазов в аппарате вихревого слоя АВСП-100 нами было предварительно изучено измельчение кварцевого песка. В табл. 1 приведён гранулометрический состав кварцевого песка (р. Упа), измельчённого в вихревом слое в течение различного времени. Исходный размер частиц песка + 630 мкм.

Таблица 1. Гранулометрический состав кварцевого песка (р.Упа) измельчённого в вихревом слое.

Размер фракций, мкм	Количество песка по фракциям, г/%, при различной продолжительности измельчения, мин.				
	2	4	6	8	10
+630	<u>25</u> 5	<u>15</u> 3	<u>12</u> 2	<u>9</u> 2	<u>7</u> 1,0
+500	<u>73</u> 15	<u>50</u> 10	<u>34</u> 7	<u>38</u> 8	<u>40</u> 8
+400	<u>125</u> 25	<u>74</u> 15	<u>44</u> 9	<u>30</u> 6	<u>28</u> 6
+250	<u>176</u> 35	<u>136</u> 27	<u>119</u> 24	<u>170</u> 34	<u>180</u> 36
-250	<u>101</u> 20	<u>225</u> 45	<u>291</u> 58	<u>253</u> 50	<u>245</u> 49
Всего, г/%	500/100	500/100	500/100	500/100	500/100

Как видно из табл. 1 несмотря на недостаточно высокие скорости движения ферромагнитных элементов в вихревом слое в нём интенсивно идёт измельчение при различной его продолжительности: количество песка в крупных фракциях уменьшается, а в мелких фракциях возрастает.

Следовательно, измельчение идёт не только за счёт свободного, но и за счёт стеснённого удара, то есть между двумя соударяющимися ферромагнитными элементами.

При ударе, случайное положение точки удара относительно оси симметрии сталкивающихся ферромагнитных элементов и малые поверхности контакта способствуют тому, что даже при небольших скоростях столкновения развиваются большие усилия, обуславливающие разрушение материала. В вихревом слое движение ферромагнитных элементов возможно только до определенной степени заполнения рабочей зоны реакционной камеры аппарата этими элементами, при которой все элементы одновременно прекращают движение, образуя ряд параллельно расположенных дисков. Для оценки условий прекращения движения ферромагнитных элементов в аппарате АВСП-100 в «НИИЭМАЛЬХИММАШе» и АО «Тульское НИГП» предложен критический коэффициент заполнения рабочего объема камеры этими элементами, который определяется из выражения

$$K_{кр} = V_1 / V_2, \quad (2)$$

где $K_{кр}$ - критический коэффициент заполнения рабочего объема камеры ферромагнитными элементами;

V_1 - суммарный объем всех ферромагнитных элементов, при котором они прекращают движение, $м^3$;

V_2 - внутренний объем камеры, находящейся в зоне действия вращающегося магнитного поля, $м^3$.

Было экспериментально исследовано влияние на интенсивность диспергирования материалов коэффициента загрузки в рабочую камеру аппарата АВСП-100 ферромагнитных элементов, определяемого нами как часть от критического коэффициента заполнения рабочего объема камеры ферромагнитными элементами.

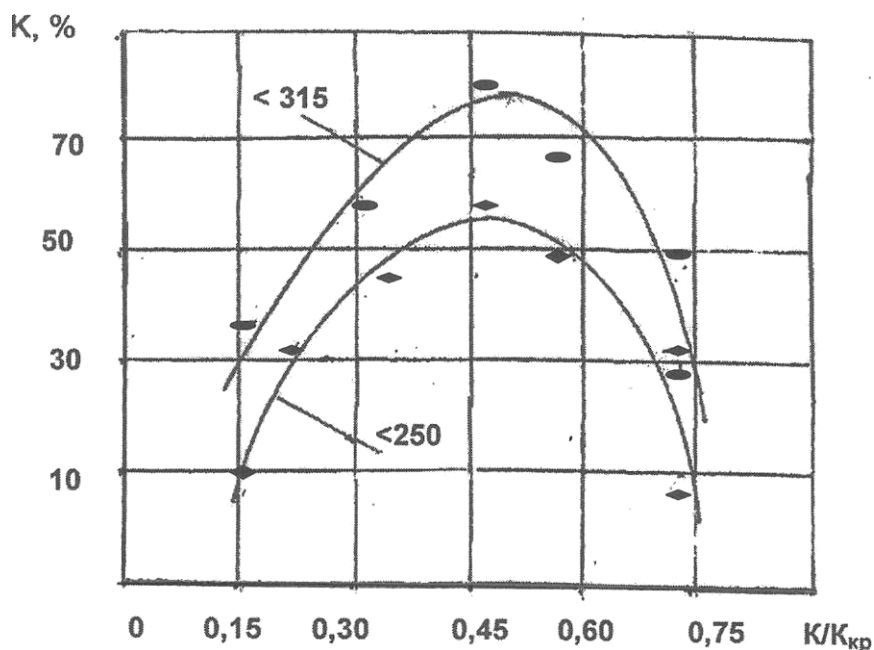


Рис. 1 Влияние коэффициента загрузки ферромагнитных элементов на интенсивность диспергирования кварцевого песка
(время - 4 мин., диаметр элементов - 1,4 мм, $Q=0,5 Q_{кр}$, числа 250 и 315 берутся со знаком минус)

Как видно из рис. 1 интервал оптимальных значений величины загрузки рабочей камеры ферромагнитными элементами, полученный при диспергировании кварцевого песка, составляет $(K=0,35-0,55)K_{кр}$.

Важной для нормального протекания процесса измельчения материалов в аппаратах вихревого слоя является зависимость износа ферромагнитных частиц от времени обработки алмазного сырья.

В результате проведённых исследований нами установлено, что наибольшей износостойкостью обладают ферромагнитные элементы, выполненные из углеродистой стали по ГОСТ 9389-75, которые выбраны нами для проведения исследований с природными алмазами.

Также было определено, что ферромагнитные элементы имеют форму удлинённых цилиндров, изогнутых по кривой, описываемой уравнением

$$Y = \sqrt{x} + \sqrt{4-y}, \quad (3)$$

где x - абсцисса в прямоугольных координатах;

y – ордината в прямоугольных координатах.

Было исследовано распределение алмазов по размерности при дроблении в аппарате вихревого слоя АВСП-100 и с учётом зависимости (3) был предложен новый способ избирательного дробления алмазов, согласно которому неравноосные ферромагнитные элементы выбраны по уравнению (3), а смесь ферромагнитных элементов и алмазов заполняет цилиндрическую камеру на 0,10-0,20 её объёма.

Известно, что качество порошков алмазов оценивается по степени измельчения, а также возможностью улучшения однородности формы и размеров частиц алмаза. С целью оценки однородности размеров зёрен применяется коэффициент изометричности $K_{из}$, равный отношению двух наибольших взаимно перпендикулярных размеров. Нами совместно с сотрудниками АО «Тульское НИГП» были проведены исследования по дроблению природных алмазов в аппарате вихревого слоя АВСП-100. Зависимость коэффициента изометричности дроблённого природного алмаза по классификатору К-47-01-96 (стандарт SITV) от времени обработки для различных зернистостей показана на графиках рис.2.

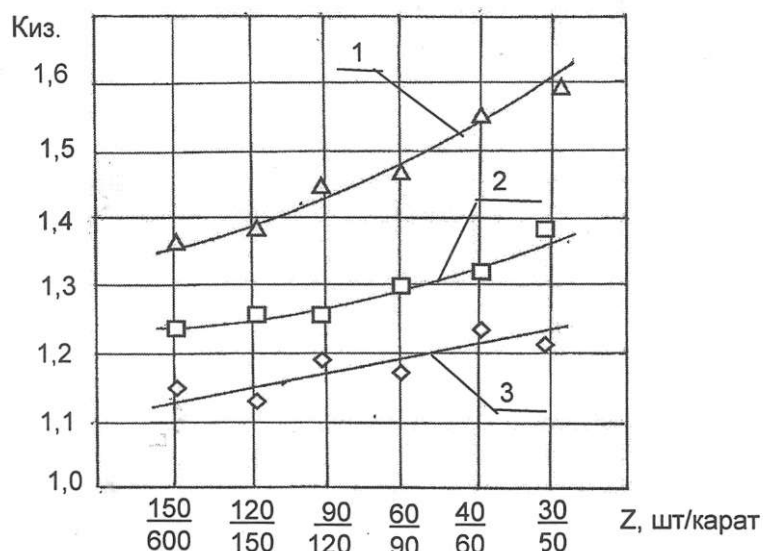


Рис. 2. Изменение коэффициента изометричности (Киз) порошка природного алмаза различной зернистости (Z) от времени обработки

1- исходного порошка;
2- после 3 мин. обработки;
3- после 6 мин. обработки

Из рис. 2 следует, что с увеличением времени обработки коэффициент изометричности порошка природных алмазов уменьшается, а однородность формы зерна увеличивается.

В табл. 2 приведён гранулометрический состав порошка природных технических алмазов, обработанных в аппарате вихревого слоя АВСП-100 по новому способу и способу-аналогу по патенту СССР № 325988.

Таблица 2. Распределение природных алмазов по размерности

Условный ситовой класс	Распределение алмазов по размерности, штук/карат в %			
	50-30	60-40	150-90	600-200
<i>до обработки</i>				
-4+3	75,0	22,0	2,0	1,0
<i>после обработки по новому способу</i>				
-4+3	27,0	60,0	10,0	3,0
<i>после обработки по способу - аналогу</i>				
-4+3	42,0	48,0	6,0	4,0

Из таблицы 2 видно, что после обработки алмазов в вихревом слое магнитных полей количество алмазов крупной размерности значительно уменьшилось, а количество алмазов мелких размерностей увеличилось по новому способу и по способу-аналогу.

Однако по новому способу дробления выход мелких размерностей (60-40 шт/ карат) более прочных алмазов увеличился на 12% и возросла степень овализации алмазов.

Данные, характеризующие среднюю прочность природных алмазных зерен разных размерностей до и после обработки по новому способу дробления в вихревом слое магнитных полей, приведены в табл. 3

Таблица 3. Средняя прочность природных алмазов

Размерность (штук/карат)	Прочность до обработки в магнитных полях, Дан	Прочность после обработки в магнитных полях, Дан	Повышение показателя, %
50-30	1,30	2,15	65
60-40	1,35	1,95	44
150-90	1,21	1,51	25
600-200	1,16	1,38	36

Анализ данных табл. 3 показывает, что прочность зерен природных алмазов, обработанных в вихревом слое магнитных полей, превышает прочность не обработанных зерен природных алмазов на 25-65%.

Таким образом, в результате проведённых исследований установлено, что при обработке природных алмазов в вихревом слое магнитных полей в аппарате АВСП-100 происходит значительное повышение прочности алмазов и их овализация с притуплением острых углов и вершин зерен.

В результате проведённых нами исследований усовершенствован способ избирательного дробления алмазов, принятый АО «Тульское НИГП», что послужило основой для разработки безотходного технологического процесса избирательного дробления алмазов, представляющего собой комплекс операций: сортировка по степени трещиноватости; дробление; ситовая классификация; очистка от металлической пыли; промывка; просушка; отделение на вибростоле некондиционных (по форме) зерён алмазов; взвешивание; упаковка. Полученные по этому технологическому процессу все фракции алмазного сырья полностью используются при изготовлении породоразрушающего инструмента.

Второе защищаемое научное положение. Учёт развития релаксации напряжений в матрице алмазного породоразрушающего инструмента после термического удара позволяет повысить эффективность его термообработки, что выражается в увеличении износостойкости алмазных коронок.

Композиционный материал матриц алмазного инструмента, получаемый методом пропитки структурного каркаса жидкой связкой, имеет микроструктуру, которую можно отнести к категории матричной или статической. В этих структурах фазовые составляющие композиционного материала можно представлять как отдельные частицы, окруженные со всех сторон веществом связки. В такой ситуации основным механизмом формирования остаточных напряжений при термоударе, возникающем при криогенной обработке алмазных коронок, будет создание напряженного состояния на границе раздела «отдельная фазовая частица - окружающая ее связка».

Используя подобный физический механизм, рассмотрим расчет максимально возможного уровня остаточных напряжений, создаваемых в композиционном материале с матричной структурой при термоударе от некоторой начальной температуры T_n до конечной T_k на величину $\Delta T = T_n - T_k$. Определение напряжений проведено на основе решения упругой задачи Ламе. В окончательном виде расчетное значение остаточных напряжений σ может быть представлено по формуле В.И. Спирина, Д.М. Левина следующим образом:

$$\sigma = - \frac{(\alpha_m - \alpha_b)(T_n - T_k)}{\frac{1 - 2\nu_b}{E_b} + \frac{[1 + (\alpha_m - \alpha_b)(T_n - T_k)](1 + \nu_m)}{2E_m}}, \quad (4)$$

где E , ν и α - модуль нормальной упругости, коэффициент Пуассона и среднее значение термического коэффициента линейного расширения в диапазоне температур от T_n до T_k соответственно; индексы b и m обозначают включение и матрицу соответственно.

Анализ этой формулы позволяет заключить, что основное влияние на уровень формирующихся напряжений оказывает, в первую очередь, разность начальной и конечной температур, характеризующих термоудар, то есть величина ΔT , а не собственно значения начальной T_n и конечной T_k температур. Это обстоятельство дает принципиальную возможность рассматривать термоудар как операцию, которую возможно проводить в любом температурном диапазоне, как в области криогенных температур, так и при температурах выше комнатных. Главное условие, обеспечивающее результативность термоудара, - достаточная величина температурного интервала ΔT .

Однако в соответствии с принципом Ле-Шателье, любые внешние воздействия, приводящие к упрочнению материала, вызывают развитие

процессов, препятствующих этому упрочнению, стимулирующих разупрочнение материала. Они относятся к категории процессов релаксации, которая определяется как изменение напряжений во времени в деформированном теле. За счёт развития процессов релаксации в медно-никелевой связке при температуре T_K и последующем нагреве до комнатной температуры уровень остаточных напряжений понижается по сравнению с результатами расчёта в упругом приближении по формуле (4).

Поэтому для оценки материалов при подборе композиционных матриц нами проведен анализ зависимостей механики деформированного твердого тела и выведена формула для определения ожидаемого уровня остаточного напряжения.

$$\sigma_0 = \sigma \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (5)$$

где σ_0 – ожидаемый уровень остаточных напряжений в матрице после криогенной обработки, МПа;

σ - расчётное напряжение, создаваемое в матрице после криогенной обработки, МПа (определяется по (формуле 4));

t - время воздействия силы, с;

τ - время релаксации, с.

Когда $t = \tau$, напряжение σ_0 ослабеет в e , т. е. в 2,72 раза. Это время называется временем релаксации. Чем более вязким и менее упругим является тело, тем больше время его релаксации.

С целью определения времени релаксации (τ) произведем логорифмирование выражения (5) и после преобразования имеем

$$\tau = \frac{t}{\ln \sigma - \ln \sigma_0} \quad (6)$$

Зная время релаксации (τ) можно определить текущее время изменения начальных напряжений, при которых необходимо проводить повторную криогенную обработку алмазного инструмента, а по формуле (5) можно определить ожидаемый уровень остаточных напряжений при $\tau = t$. Если расчетное напряжение, создаваемое в матрице после криогенной обработки составляет, например, 700, 600 и 500 МПа, то ожидаемый уровень остаточных напряжений в матрице, с учетом релаксации по формуле (5), соответственно составит 257,35; 220,6; 183,8 МПа.

С учётом проведённых исследований с использованием формулы (5), разработан «Способ изготовления породоразрушающего инструмента» (заявка № 2013144361/02(068369, Спирин В.И., Будюков Ю.Е., Кубасов В.В.). При этом способе формирование композиционной матрицы в графитовой форме осуществляют с учётом ожидаемого уровня остаточных напряжений в инструменте после криогенной обработки по зависимости (5).

Для определения рационального времени криогенной обработки алмазных коронок в ОАО «Тульское НИГП» была изготовлена опытная партия коронок 02ИЗ-36 в количестве 5 штук, армированных природными алмазами зернистостью А (120 – 150 шт./кар.), и проведены стендовые испытания их при бурении по блоку окварцованного гранита ($P_{ш} = 5400$ МПа), табл. 4.

Таблица 4. Показатели бурения алмазными коронками 02ИЗ-36

Порода	Время криообработки, мин.	Номера коронок (числитель), углубление за 1 об/мин, мм				
Гранит	0	1/0,01				
	20		2/0,03			
	30			3/0,031		
	40				4/0,031	
	50					5/0,032

Как следует из табл. 4 применение опытных коронок эффективнее по углублению за 1 об/мин использования коронки 1 (база сравнения без термообработки): коронки 2 (обработка -20 мин.) - в 3,0 раза, коронки 3 (обработка -30 мин.)- в 3,1раза, коронка 4 (обработка-40мин) – в 3,1раза коронки 5 (обработка -50мин)- в 3,2 раза. Также нами, в ходе проведения бурения на стенде, был прослежен характер изменения в течение рейса при бурении по окварцованному граниту – диаметра коронки (D) и износа торца (J) для опытной коронки (время криогенной обработки 30 минут) и стандартной коронки (без криогенной обработки). Это показано на рис. 3. .

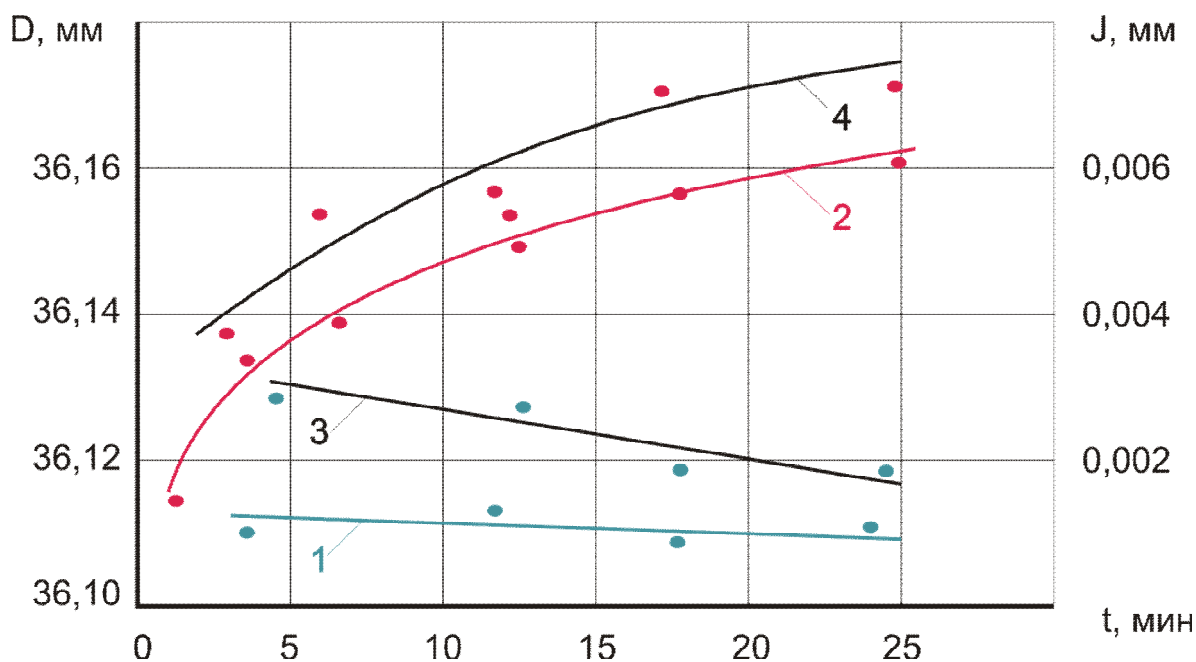


Рис. 3. Изменение в течение рейса при бурении по окварцованному граниту диаметра коронки (D) и износа торца (J): 1,3 – наружный диаметр коронки соответственно опытной к стандартной; 2,4 – торцовый износ коронок соответственно опытной и стандартной

Как видно из рис.3 применение для бурения опытной коронки по сравнению со стандартной коронкой эффективнее: по уменьшению износа по торцу на 21%. при значительном (на 0,01мм) уменьшении износа по диаметру.

Проведённые исследования позволяют установить тенденцию уменьшения износа коронок при бурении и повышения углубки за один оборот при увеличении времени выдержки инструмента при криообработке, что позволяет рекомендовать (для условий аналогичных данному эксперименту- времени выдержки в жидком азоте 20-50 минут) время выдержки при термообработке инструмента, до 30 минут.

Рябчиков С.Я. установил, по результатам отработки в ПГО «Запсибгеология» большого количества алмазных коронок К-31С, обработанных в жидком азоте с выдержкой по времени от 10 до 20 минут, аналогичную тенденцию роста эксплуатационного показателя (ресурса) коронок с увеличением времени выдержки их при криообработке.

Третье защищаемое научное положение. Применение алмазных коронок, модернизированных на основе анализа распределения работы

трения с учётом динамической составляющей нагрузки вдоль радиуса коронки, выбора состава матрицы и повышения её прочности при криогенной обработке и установления рационального диаметра алмазного зерна в объёмном слое, обеспечивает при бурении формирование и поддержание высокого уровня механической скорости бурения и повышение эксплуатационной стойкости инструмента.

Наиболее общими факторами, определяющими характер изнашивания алмазных коронок, является работа трения и условия её реализации. При этом особо важное значение имеет значение характера распределения осевого усилия между алмазами при модернизации алмазного породоразрушающего инструмента.

Известно, что большое значение этому вопросу придавали многие научно-исследовательские организации и исследователи:

СПГИ (С.Н. Тараканов), ВИТР (В.П. Оницин, П.П. Пономарев, Н.Е. Тихонов), ВНИИБТ (Е.И. Королько, Р.М. Эйгелес, Г.С. Геворков, А.М. Владимирский), РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, (Е.В.Бучковский), ИСМ (И.Ф. Вовчановский).

Ближе к теоретическому решению этого вопроса подошли исследователи АО «Тульское НИГП» (Ю.Е. Будюков, В.И. Власюк, В.И. Спирин), которые получили выражение распределения нормального давления вдоль радиуса алмазной коронки.

$$q_i = \frac{Q \cdot d_i (1 + y_i'^2)^{-\frac{1}{2}}}{\sum_1^n K_i \cdot d_i (1 + y_i'^2)^{-1}}, \quad (7)$$

где q_i - нормальное давление Н;

Q - осевая нагрузка Н;

d_i - диаметр i -го алмазного зерна, м;

y_i' - первая производная функция кривой $y = f(R)$, описывающей профиль коронки (R - текущий радиус коронки, м);

n - количество рядов алмазов на коронке, шт;

K_i - количество алмазов в i -м ряду, шт.

Эта зависимость является в какой – то мере универсальной, так как позволяет определить нормальное давление для любой алмазной коронки, у которой образующая рабочий поверхности представляет непрерывную кривую $y = f(R)$, где R - текущий радиус коронки.

При этом количество алмазов, находящихся в контакте с забоем, может рассматриваться как некоторая функция времени и изменяться по величине от общего количества объёмных алмазов в инструменте до весьма незначительного. Влияние продольных вибраций коронки на износ алмазов можно учесть, если в формуле (7) наряду со статической (Q_{CT}), будет учтена динамическая (Q_{DM}) составляющая нагрузки на коронку

$$Q_{CT} + Q_D = K \cdot Q_{CT}, \quad (8)$$

K - коэффициент пропорциональности (определяется по методике В.Е. Копылова, $K=1,1 \div 1,5$).

Тогда выражение (7) можно записать (если принять $Q = Q_{CT}$) в следующем виде:

$$q_i = \frac{KQ \cdot d_i (1 + y_i'^2)^{-\frac{1}{2}}}{\sum_1^n K_i \cdot d_i (1 + y_i'^2)^{-1}}, \quad (9)$$

Выражение для удельной работы трения A_T за один оборот алмазной коронки при бурении из её определения, может быть представлено в виде

$$A_T = 2\pi f q_i R, \quad (10)$$

где f - коэффициент трения.

подставив значение q_i из (9) в формулу (10), будем иметь

$$A_T = \frac{2\pi f R K Q \cdot d_i \cdot V_t}{\sum_1^n K_i \cdot d_i \cdot V_i^2}, \quad (11)$$

$$\text{где } V_1 = (1 + y_i'^2)^{-\frac{1}{2}},$$

Выполнен расчёт работы трения и распределение нормального давления с учётом зависимостей (9), (10), (11) по заданному уравнению кривой наиболее удовлетворительно описывающей профиль алмазной коронки (коронки-разбурника) для бурения скважин со съёмными керноприёмниками и ОС

$$y_1 = a(R_i - R_0)^2, \quad y' = 2a(R_i - R_0), \quad (12)$$

Диссертантом совместно с сотрудниками АО «Тульское НИГП» была составлена программа CrownBit, которая предназначена для определения максимальных значений работы трения как функции текущего радиуса коронки и распределения нормального давления вдоль радиуса алмазной коронки по формулам (9) и (11).

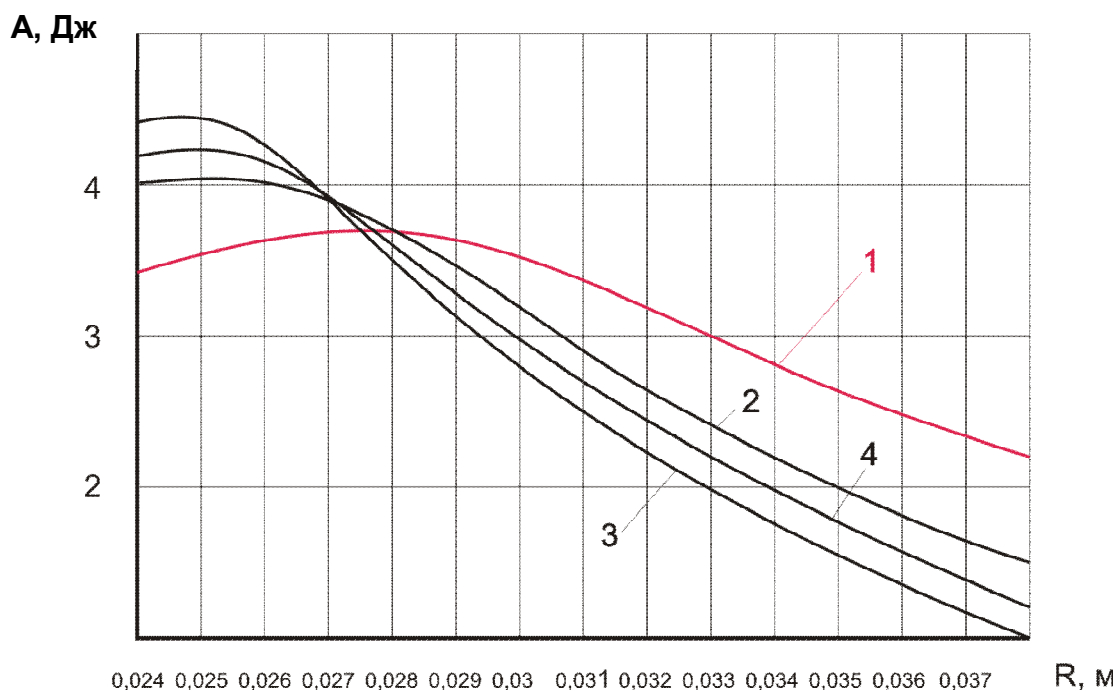


Рис. 4 Распределение работы трения вдоль радиуса коронки для различных значений параметра a уравнения профиля коронки.

1 – $a=30$; 2 – $a=40$; 3 – $a=50$; 4 – $a=45$

Данные расчётов приведены на рис. 4 в виде графика, из которых следует, что:

1) максимальное значение работы трения при бурении коронкой наблюдается для графиков 2,3,4 на отрезке радиуса 0,024-0,025, а для графика 1 на отрезке радиуса 0,027-0,028.

2) чем меньше абсолютное значение параметра a , тем равномернее распределение работы трения вдоль радиуса коронки, а, следовательно, должен быть меньше её износ.

На основе теоретического рассмотрения разрушения горной породы с использованием формулы АО «Тульское НИГП» найдена зависимость для определения рационального диаметра алмазного зерна в объёмном слое коронки.

$$d = \frac{F}{\pi \cdot P_o K K_1 \cdot h} + h, \quad (13)$$

где d - диаметр алмазного зерна, м;

F - разрушающая нагрузка на алмаз, Н;

P_o - предел текучести породы по штампу, МПа;

K - коэффициент сопротивления движению алмазного резца ($K=1,05 \div 1,15$);

K_1 - коэффициент формы алмаза ($K_1=1$ для дроблённого алмаза, $K_1=1,2$ для овализованного алмаза);

h - глубина внедрения алмаза, м,

Это техническое решение защищено авторским патентом на полезную модель № RU 138 678 U1.

Совместно с АО «Тульское НИГП» проведены экспериментальные исследования по выбору состава матриц алмазных коронок и установлена зависимость твёрдости материала образцов от давления прессования, которая определяется экспериментальной формулой

$$T = a + bP \quad (14)$$

где

T - твёрдость материала матрицы, HRC;

a и b – параметры, зависящие от условий опыта (с размерностью HRC и HRC/МПа соответственно);

P - давление прессования, МПа.

Задаваясь составом материала матриц и режимами их прессования, можно подбирать матрицы алмазных коронок необходимой твёрдости по составу материала - в пределах 15,1 до 49,2 HRC и по давлению прессования - от 15,1 до 52,2 HRC. При этом расчёт проектной твёрдости производится по формуле (14).

На основании результатов проведённых исследований созданы модернизированные алмазные коронки К-41СВМ и Р1-93РМ

Коронки К-41СВМ могут изготавливаться с 4-мя типами матриц: мягкая - 2(15-20 HRC) - бурение плотных малоабразивных пород; нормальная - 3 (20-25 HRC) – бурение в плотных среднеабразивных породах; твёрдая - 4 (30-35 HRC) бурение в среднеабразивных, трещиноватых породах; очень твёрдая -5 (40-50 HRC) – бурение в очень твёрдых трещиноватых породах.

Результаты отработки алмазного инструмента в производственных условиях показывает, что применение опытных коронок К-41-3СВМ вместо стандартных коронок К-41 эффективнее: по стойкости на 95 %, по механической скорости на 28 %, по расходу алмазов на 68 %, по выходу керна на 2%, применение коронок - разбурников Р1-93РМ (по базе сравнения – самое эффективное при разбуривании скважин шарошечное долото В93-К) эффективнее: по стойкости на 149 %, по механической скорости на 19 %, по расходу истирающих на 78 %.

Применение модернизированного инструмента наряду с высокой производительностью, качеством работ позволяет производить импорто-замещение инструмента зарубежных фирм, а так же получить экономический эффект от применения одной коронки

К-41-3СВМ - 10 791,0 руб., от внедрения одной коронки - разбурника Р1-93РМ – 14 639,0 руб.

Основные выводы и рекомендации.

1. Разработана математическая модель износа рабочего торца алмазной коронки, с применением которой по специально составленной компьютерной программы CrownBit было проведено исследование динамики износа коронки и установлено, что наибольшее значение работы трения при бурении ступенчатыми коронками наблюдается на периферии ступенчатой части матрицы, чем меньше значение параметра «а» коронки, тем равномернее распределение работы трения вдоль радиуса коронки Q_T , следовательно, должен быть меньше её износ.

2. Установлена зависимость диаметра алмазного зерна в объёмном слое матрицы от действующего усилия и параметров физико-механических свойств горных пород, с учётом которой возможен подбор алмазных коронок в соответствии с конкретными горными породами буримого разреза.

3. Уточнена зависимость для определения остаточных напряжений в материале матрицы, с учётом развития процессов релаксации на основании расчётов, по которой можно определить момент повторной криогенной обработки алмазных коронок.

4. Найдено аналитическое выражение для определения, с учётом разрушающегося напряжения и масштабного фактора, скорости частицы дробимого материала, необходимой для её разрушения и определено, что измельчение идёт не только за счёт свободного, но и за счёт стеснённого удара.

5. Установлена зависимость коэффициента изометричности дроблённого природного алмаза от времени обработки для различных зернистостей: с увеличением времени обработки коэффициент изометричности порошка природных алмазов уменьшается, а однородность формы зерна увеличивается.

6. Разработан способ избирательного дробления низкосортных и трещиноватых природных алмазов пониженного качества в вихревом слое аппарата АВСП-100.

7. Разработаны два типа модернизированных алмазных коронок и рекомендации по технологии бурения разведочных скважин с применением этого породоразрушающего инструмента.

8. Для дальнейшего совершенствования алмазного пороодо-разрушающего инструмента, предназначенного для бурения ССК (КССК) и ОС, рекомендуется:

- совершенствование способов повышения прочностных свойств алмазов, в том числе синтетических и алмазосодержащих матриц инструмента;
- разработка новых методов исследований механизма разрушения горных пород единичным алмазным резцом и инструментом в целом;
- разработка компьютерных технологий проектирования, и изготовления алмазного породоразрушающего инструмента.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в следующих работах.

В 22 печатных работах, из которых основные 13 представлены ниже, в том числе работы 2,4,8,11,12 опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК.

1. Спирин В.И., Будюков Ю.Е, Кубасов В.В. «Анализ результатов работы алмазных коронок, подвергнутых криогенной обработке». Научно-технический журнал «Инженер-нефтяник», № 2, М. 2013 с.16-21.

2. Ососов И.А, Спирин В.И, Будюков Ю.Е., Власюк В.И, Кубасов В.В. «Комплексное использование низкосортного технического алмазного сырья». Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент - техника и технология его изготовления и применения: Сборник научных трудов – Вып.16 – Киев: ИСМ, НАН Украины, 2013.

3. Спирин В.И, Будюков Ю.Е., Кубасов В.В. «Алмазный инструмент для бурения скважин предельно малого диаметра на нефть и газ». Научно-технический журнал «Инженер-нефтяник», № 4, 2013.

4. Кубасов В.В., Будюков Ю.Е, Спирин В.И. «Выбор матричных композиций для алмазного породоразрушающего инструмента». Инновационные наукоёмкие технологии: тезисы докладов междунар. науч.-технич. конференции под общ. ред. В.М. Панарина. – Тула: Изд-во «Инновационные технологии», 2014г. с. 11-16.

5. Спирин В.И., Будюков Ю.Е., Кубасов В.В. Особенности технологии бурения глубоких разведочных скважин в Норильском рудном районе. Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент - техника и технология его изготовления и применения: Сборник научных трудов – Вып.17 – Киев: ИСМ, НАН Украины, 2014, 32-36.

6. Кубасов В.В., Спирин В.И., Будюков Ю.Е. «Новый способ изготовления породоразрушающего инструмента». Приоритетные направления развития науки и технологий: тезисы докладов XVI международной научн. – техн. конф.; под общ. ред. В.М. Панарина. - Тула: Изд-во «Инновационные технологии», 2014 г.с.76-81.

7. Кубасов В.В. «Новые технологии повышения эффективности работы алмазного породоразрушающего инструмента». Горный информационно-аналитический бюллетень, 2014г. № 10 с. 383-387.

8. Кубасов В.В., Будюков Ю.Е., Спирин В.И., «Повышение эффективности бурения разведочных скважин путём применения коронок с модернизированной алмазосодержащей матрицей». XII Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле» в период с 08 по 10 апреля 2015г. Москва, МГРИ-РГГРУ.

9. Спирин В.И., Будюков Ю.Е., Кубасов В.В. «Интенсификация технологических процессов в аппарате с вихревым слоем при производстве алмазного породоразрушающего инструмента». XII Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле» в период с 08 по 10 апреля 2015г., Москва, МГРИ-РГГРУ.

10. Кубасов В.В. Релаксация остаточных напряжений в матрице алмазной коронки. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) -2015. - № 4(специальный выпуск12). –М.:Издательство «Горная книга», с. 3-6.

11. Кубасов В.В. Исследование износа алмазных коронок. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) -2015. - № 4 (специальный выпуск12). –М.: Издательство «Горная книга», с.6-11.

Патенты на полезные модели.

12.Кубасов В.В.,Спирин В.И, Будюков Ю.Е. «Алмазная импрегнированная буровая коронка». Патент РФ на полезную модель № 138678 БИ. № 8, 2014г.

13.Спирин В.И., Будюков Ю.Е., Нескормных В.В., Петенев П.Г, Пушмин П.С., Кубасов В.В. Патент RU № 148 333 БИ № 34, 2014г. на полезную модель «Алмазная коронка для бурения».