

Министерство образования и науки Донецкой Народной Республики
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Донецкий национальный технический университет»
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Сибирский федеральный университет»

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Каракозов Артур Аркадьевич

Красноярск – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|-----|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК КОНСТРУКЦИЙ ОДНОСЛОЙНОГО АЛМАЗНОГО ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ БУРЕНИЯ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН..... | 10 |
| 1.1 Современное состояние исследований взаимодействия алмазов коронки с породой..... | 14 |
| 1.2 Анализ исследования температурных режимов работы алмазной коронки при взаимодействии с забоем скважины..... | 28 |
| 1.3 Объект, цели и задачи исследований..... | 35 |
| Выводы по главе 1..... | 36 |
| ГЛАВА 2 РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАБОТЫ ОДНОСЛОЙНЫХ АЛМАЗНЫХ КОРОНОК НА ЗАБОЕ СКВАЖИН..... | 38 |
| 2.1 Разработка уточненной математической модели взаимодействия с забоем алмазных резцов однослойной коронки..... | 39 |
| 2.1.1 Определение толщины слоя породы, срезаемого каждым алмазом коронки при движении по линии резания, в процессе бурения.. | 39 |
| 2.1.2 Определение влияния конструктивных параметров алмазной однослойной коронки на характер взаимодействия алмазов с горной породой на забое скважины..... | 50 |
| 2.2 Определение механических напряжений в элементах однослойной алмазной коронки при бурении скважин..... | 67 |
| 2.3 Математическое моделирование температурного режима работы однослойной алмазной коронки с учетом гидравлических процессов, происходящих на забое скважины..... | 71 |
| 2.4 Рекомендации по выбору геометрических параметров и схем раскладок алмазов для однослойных коронок..... | 98 |
| Выводы по главе 2..... | 111 |

| | |
|---|------------|
| ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АЛМАЗНОЙ ОДНОСЛОЙНОЙ КОРОНКИ С ЗАБОЕМ СКВАЖИНЫ В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ..... | 113 |
| 3.1 Цели экспериментальных работ, состав экспериментальных стендов..... | 113 |
| 3.2 Анализ результатов экспериментальных исследований. Подтверждение адекватности теоретических моделей..... | 119 |
| Выводы по главе 3..... | 123 |
| ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ВНЕДРЕНИЕ ОДНОСЛОЙНОЙ АЛМАЗНОЙ КОРОНКИ, АРМИРОВАННОЙ СИНТЕТИЧЕСКИМИ АЛМАЗНЫМИ МОНОКРИСТАЛЛАМИ С ПОВЫШЕННОЙ ТЕРМОСТОЙКОСТЬЮ..... | 124 |
| 4.1 Разработка конструкции однослойной алмазной коронки, армированной синтетическими алмазными монокристаллами с повышенной термостойкостью..... | 124 |
| 4.2 Цель и методика производственных испытаний..... | 125 |
| 4.3 Результаты производственных испытаний образцов однослойной коронки..... | 128 |
| Выводы по главе 4..... | 129 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 130 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 132 |
| Приложение А Руководство к пользованию и основные принципы действия программного пакета моделирования движения алмазов однослойной коронки по забою..... | 144 |
| Приложение Б Акт производственных испытаний результатов диссертационной работы..... | 151 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации

Эффективное разрушение твердых горных пород при бурении геологоразведочных скважин достигается при использовании алмазного породоразрушающего инструмента. Весьма твердые 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 пород подбирается из имеющегося с учетом геологических условий, технических и технологических возможностей.

Над производственными проблемами алмазного бурения работали такие ученые как Башкатов Д. Н., Блинов Г. А., Богданов Р. К., Владиславлев В. С., Власюк В. И., Воздвиженский Б. И., Гореликов В. Г., Горшков Л. К., Исаев М. И., Калинин А. Г., Киселев А. Т., Ключанский Г. В., Козловский Е. А., Корнилов Н. И., Кудряшов Б. Б., Марамзин А. В., Нескоромных В. В., Онищин В. П., Осецкий А. Н., Остроушко И. А., Пономарев П. В., Соловьев Н. В., Спирин В. И., Сулакшин С. С., Цыпин Н. В., Шамшев Ф. А., Чихоткин В. Ф., Эйгелес Р. М. и многие другие.

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), Ш-103-11 номер госрегистрации №0111U000630 (в соответствии с договором о сотрудничестве ДС – 1/2012).

Цель работы – обоснование геометрических 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.

Основные задачи работы:

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.

Методология и 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.

Научная новизна полученных результатов

1. Получена зависимость максимальной толщины слоя породы, срезаемого алмазом от количества и характера расположения алмазов на торце коронки с учетом взаимного влияния всех линий резания коронки.

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

3. 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.

Защищаемые научные положения:

1. Максимально термостойкие объемные алмазы следует располагать во втором радиальном ряду сектора, при этом чем больше отношение расстояния в линии резания между первыми алмазами сектора и последними алмазами впередиидущего сектора к расстоянию между алмазами внутри сектора, тем больше должна быть прочность объемных алмазов первых двух радиальных рядов по отношению к прочности алмазов других радиальных рядов сектора коронки.

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 четырех радиальных рядов объемных алмазов, при этом предпочтительны следующие геометрические размеры матрицы по наружному диаметру:

- длина промывочного канала равна расстоянию между рядами объемных алмазов в секторе;
- длина сектора составляет три длины промывочного канала;
- сумма длин сектора и промывочного канала находится в пределах не более 5-5,5 диаметров объемных алмазов.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций определяется современным уровнем аналитических и достаточным объемом экспериментальных исследований, высокой степенью сходимости результатов и воспроизводимостью полученных данных. 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.

Практическая и теоретическая значимость работы:

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

2. Разработано программное обеспечение, позволяющее 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.

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 алмазов.

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 и XXII международных конференциях «Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения» ИСМ (2011 – 2013, 2019 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, XX и XXII Международном симпозиуме им. академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, (2014, 2016 и 2018 гг, Томский политехнический университет); Международной научно-практической конференции «Бурение в осложненных условиях» (Санкт-Петербург, 4-6 октября 2016). Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, были доложены на первой международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Технологии будущего нефтегазодобывающих регионов» г. Сургут, 2018г; прошли апробацию

на Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы недропользования» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова (30 ноября 2018 г., г. Новочеркасск Ростовской области). 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 27 статьях научных журналов, из них 9 в профессиональных изданиях из списка ВАК Украины, 3 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 98 наименований и 2 приложений. Полный объем диссертации составляет 152 страницы, из них 143 страницы основного текста. Работа содержит 27 таблиц и 82 иллюстрации.

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.

Автор выражает 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 старшего преподавателя каф. ТТБС ДонНТУ Парфенюка С. Н. за методическую помощь и консультации в области компьютерного моделирования.

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

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК КОНСТРУКЦИЙ ОДНОСЛОЙНОГО АЛМАЗНОГО ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ БУРЕНИЯ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН

Перспективным в плане повышения технико-экономических показателей бурения горных пород средней твердости с пропластками твердых, а также твердых горных пород является алмазный породоразрушающий инструмент (ПРИ). Разработка новых конструкций алмазного ПРИ позволяет обеспечивать более интенсивное разрушение пород на забое и увеличение механической скорости бурения.

Следует отметить, что в последние годы вопросу разработки однослойного алмазного инструмента уделялось мало внимания, поскольку интенсивно разрабатывались импрегнированные коронки для бурения в более твердых породах. Поэтому также замедлилось развитие теоретических разработок, являющихся основой проектирования новых конструкций однослойных коронок. Существующие рекомендации и расчётные модели, используемые при проектировании однослойных алмазных коронок, были разработаны достаточно давно и в ряде случаев имеют приближённый характер.

Одним из факторов, сдерживающих работу в направлении разработки алмазного инструмента, являлась ограниченная прочность и термостойкость алмазного сырья. Современные технологии позволяют добиваться успехов в области синтеза алмазных монокристаллов. В Институте сверхтвёрдых материалов им. В. Н. Бакуля Национальной академии наук Украины осуществлен синтез алмазных монокристаллов зернистостью 1600/1250 мкм с повышенной термостойкостью (рисунок 1.1). Такие алмазы выдерживают температуру до 1150 °С, что дает возможность использовать их в качестве резцов однослойных алмазных коронок для бурения скважин в породах V-VIII с пропластками до IX категории по буримости.



Рисунок 1.1 – Синтетические алмазные монокристаллы зернистостью 1600/1250 мкм с повышенной термостойкостью

При изготовлении однослойных алмазных коронок известны следующие схемы размещения алмазов: в шахматном порядке, по цепочкам (спиральная), по радиальным линиям и по концентрическим окружностям [1]. Ранее проведенными исследованиями [1-5, 42] установлено, что для однослойных алмазных коронок наиболее эффективной является радиальная раскладка алмазов. При этом предпочтительнее коронки с заданным выпуском алмазов, что обеспечивает их одновременное нагружение и ввод в работу. Коронки с алмазами, имеющими заданную величину выпуска, всегда будут иметь большую насыщенность, чем коронки, армированные алмазами без заданной величины выпуска [2].

П. Н. Курочкиным была предложена схема размещения алмазов по торцу коронки, где основная часть алмазов расположена по концентрическим окружностям и в то же время по радиусам (рисунок 1.2) или спирали. Через три ряда алмазов (считая по радиусам) ставится четвертый для среза гребешков породы, образующихся между двумя соседними концентрически расположенными рядами алмазов.

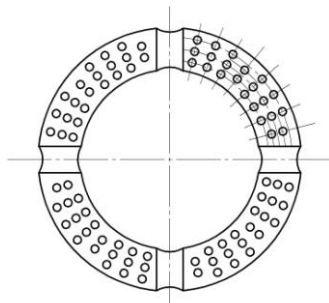


Рисунок 1.2 – Схема раскладки алмазов в коронке для бурения пород средней твердости

Такая раскладка, по мнению П. Н. Курочкина является наиболее продуктивной при разрушении пород средней твердости [3], поскольку в первых трех рядах каждый алмаз будет снимать объем породы больший, чем объем породы, снимаемой алмазом в существующих коронках.

Однако, если рассмотреть движение алмазов по линии резания, наиболее нагруженным может оказаться первый алмаз, т.к. второй и третий алмазы будут двигаться по разрушенной первым алмазом канавке, что может привести к неравномерному износу коронки.

Для коронок с радиальной раскладкой алмазов на рабочем торце Н. В. Цыпиным разработана методика, позволяющая определять геометрические параметры раскладки алмазов в секторе. По мнению Н. В. Цыпина [4] для эффективного разрушения горной породы необходимо размещать алмазы с учетом перекрытия зон работы каждого из них. Он предложил радиальную раскладку крупных алмазов (рисунок 1.3), где число концентрических окружностей – линий резания, на которых размещаются алмазы, можно определить в зависимости от коэффициента перекрытия:

$$n_n = \frac{D_H - D_B - 2f_{\Pi}d_a}{2d_a(1 - f_{\Pi})}, \quad (1.1)$$

где f_{Π} – коэффициента перекрытия $f_{\Pi} = 1 - 2\sqrt{z(1-z)}$, где z – коэффициент, показывающий, на какую часть своей величины алмаз выступает над матрицей.

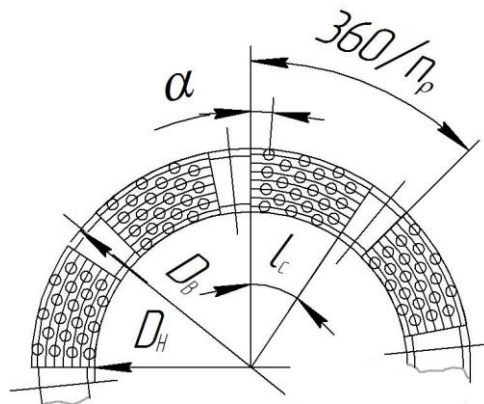


Рисунок 1.3 – Схема размещения алмазов в коронках АКВ [4]

А количество радиальных рядов алмазов в секторе :

$$n_p = \frac{2,9k(D_H + D_B)(D_H - D_B)}{1000S_a n_c n_l}, \quad (1.2)$$

где k – относительная концентрация алмазов, %; S_a – площадь диаметрального сечения алмаза.

Угол между радиальными рядами:

$$\alpha_p = \frac{\alpha_c}{(n_p + 1)}, \quad (1.3)$$

Расстояние между линиями резания:

$$l = \frac{(D_H - D_B) - 2d_a}{2(n_l - 1)}. \quad (1.4)$$

Немаловажную роль в разрушении породы и распределении нагрузки в породоразрушающем инструменте играет форма его торца. Известна следующая разновидность торцов алмазных коронок: плоский, двухступенчатый, многоступенчатый, пилот, гребешковый, врубовый, прямой полукупол, обратный полукупол, полусфера, усеченная полусфера.

В. П. Онициным было доказано, что оптимальным является сечение торца коронки в виде полусферы. Такая форма позволяет равномерно распределить нагрузку по всей площади торца сектора коронки, при этом износ коронки по нормали к поверхности торца пропорционален удельной (отнесенной к площади) работе сил трения [3, стр. 141]. Форма торца в виде полусферы нашла успешное применение в конструкциях современных однослойных (01А3, 01А4, 07А3, 14А3, 16А3-СВ и др.) и импрегнированных алмазных коронок (02ИЗГ, 20И2Г, 21МЗГ, БС04, БС05, БС06, БС20, БС33 и др.). Большие объемы выполненных буровых работ подтвердили оптимальность данной формы торца для алмазных геологоразведочных коронок.

Еще одним важным элементом коронки, который влияет на эффективность бурения, является промывочное окно. Большую работу по определению влияния конструкции промывочного окна на разрушение горной породы проделал

В. Ф. Чихоткин. Установлено, что на работу коронки оказывают влияние число и форма промывочных окон [5].

В результате аналитических и экспериментальных исследований работы коронки с различным углом наклона набегающей части секторов коронки оказалось, что наиболее оптимальным значением наклона является угол в 30° , что повышает гидродинамическое давление, способствует разрушению горной породы на забое скважины. При этом обеспечивается эффективная очистка забоя от шлама.

Таким образом, дальнейшую разработку породоразрушающего инструмента для бурения в условиях пород V-VIII с пропластками до IX категории по буримости следует ориентировать на однослойные алмазные коронки с радиальной раскладкой алмазов по торцу полусферической формы с промывочной системой, обеспечивающей эффективную очистку забоя от шлама.

1.1 Современное состояние исследований взаимодействия алмазов коронки с породой

Исследование работы алмазов в составе бурового инструмента началось еще 50-е годы XX века. Алмазный буровой инструмент в странах СНГ получил широкое распространение после того, как была разработана промышленная технология производства синтетических алмазов. Над производственными проблемами алмазного бурения работали такие ученые как Башкатов Д. Н., Блинов Г. А., Богданов Р. К., Владиславлев В. С., Власюк В. И., Воздвиженский Б. И., Гореликов В. Г., Горшков Л. К., Исаев М. И., Калинин А. Г., Киселев А. Т., Ключанский Г. В., Козловский Е. А., Корнилов Н. И., Кудряшов Б. Б., Марамзин А. В., Нескоромных В. В., Онищин В. П., Осецкий А. Н., Остроушко И. А., Пономарев П. В., Соловьев Н. В., Спирин В. И., Сулакшин С. С., Цыпин Н. В., Шамшев Ф. А., Чихоткин В. Ф., Эйгелес Р. М. и многие другие [1-86]. Так как взаимодействие алмазного породоразрушающего инструмента с горной породой во время бурения является многогранным и сложным процессом, наиболее часто исследуемыми являются геометрические параметры коронки,

взаимодействие элементов коронки с породой, гидравлические и температурные режимы работы коронки на забое скважины.

Имеется два принципиально разных подхода к исследованию механизма работы алмазных резцов на забое:

1. изучение взаимодействия единичного резца с породой;
2. взаимодействия группы резцов с породой.

Изучение взаимодействия единичного резца с породой

В 1952 году Л. А. Шрейнер привел схему взаимодействия индентора с породой при постепенном нарастании нагрузки. Предложенная схема послужила основой для многих исследований работы алмазного ПРИ на забое.

И. А. Остроушко предложил модель вдавливания в породу алмаза шарообразной формы [54]. Согласно схеме разрушения породы таким алмазом (рисунок 1.4) толщина слоя снимаемой породы или, как обозначает эту величину автор, глубина разрушения h определяется по формуле:

$$h = \frac{d}{2} \operatorname{tg} \alpha_0, \quad (1.5)$$

где d – диаметр проекции поверхности соприкосновения алмаза с породой:

$$d = 1,144 \sqrt{P_y R \left[\frac{4}{E_1} (1 - \mu_1^2) + \frac{4}{E_2} (1 - \mu_2^2) \right]}, \quad (1.6)$$

где R – радиус рабочей поверхности алмаза; E_1 и E_2 – модули упругости на сжатие алмаза и породы; μ_1 и μ_2 – постоянные Пуассона алмаза и породы; P_y – осевое давление [54].

И. А. Остроушко удалось увязать разрушающее усилие (P_y), количество алмазов в коронке, глубину разрушения (h) и скорость бурения во взаимосвязанную систему. Однако, судя по предложенной модели, все алмазы работают абсолютно одинаково, не взаимодействуя между собой и с другими факторами, что вызывает сомнение в возможности использования модели при исследовании процессов, протекающих при бурении скважины

коронки и т.д. Авторами была предпринята попытка исследования температуры матрицы алмазных коронок [7] в зависимости от количества подаваемой на забой жидкости, однако при этом были слабо учтены теплофизические характеристики инструмента и геометрия коронки.

Н. И. Корнилов, рассмотрев внешние признаки процесса разрушения породы единичным алмазом, полученные экспериментальным путем и сравнив с параметрами внедренной части алмаза, привел модель взаимодействия единичного алмаза с породой. Согласно этой модели глубина разрушения горной породы алмазной коронкой (мм) при воздействии на нее осевой нагрузки P (даН) [2]:

$$h_{p(m)} = \frac{10P_{oc}k_p k_a}{\pi p_{u} D_3 m}, \quad (1.7)$$

где D_3 – диаметр алмаза, мм; k_p – коэффициент разрушения горной породы, зависящий от ее упруго-пластичных свойств; k_a – коэффициент, учитывающий форму алмаза, m – число алмазов на торце коронки; p_u – твердость породы по Шрейнеру, МПа.

Механическая скорость бурения алмазной коронкой [2]:

$$v_m = \frac{10Pn k_p k_a}{\pi p_u D_3 m}, \quad (1.8)$$

где n – частота вращения коронки, об/с.

Автор устанавливает область использования этих формул для частот вращения коронки диаметром 59 мм не более 25 об/с (1500 об/мин) и осевой нагрузки в пределах 600–1500 даН (6–15 кН).

Эта модель носит много допущений. Коэффициенты находятся экспериментальным путем и варьируются в широких пределах. Также по этим моделям сложно судить о нагруженности каждого алмаза коронки.

Сотрудниками ФГУНИГП «Тульское НИГП», на основе работ Г. Р. Герца и З. М. Эйгелеса, была предложена модель взаимодействия алмазного ПРИ с породой (рисунок 1.6) [11], согласно которой единичный алмаз при вдавливании в горную породу производит ее упругую деформацию без разрушения, создавая диаметр отпечатка в горной породе размером d_0 , м, определяемого по формуле:

$$d_0 = \sqrt[3]{a^3 \cdot F_H \cdot R \cdot \left[\frac{4}{E_1} \cdot (1 - n_1^2) + \frac{4}{E_2} \cdot (1 - n_2^2) \right]}, \quad (1.9)$$

где R – радиус сферы индентора, м; a – постоянная, равная 1,144; E_1, E_2 – модуль упругости соответственно породы и алмаза; n_1, n_2 – коэффициент поперечного сжатия соответственно материала и инструмента.

F_H – нагрузка на алмазное зерно, даН, определяется из выражения:

$$F_H = 0,79^2 \cdot h^2 P_o^2 \cdot 2R(2R - h), \quad (1.10)$$

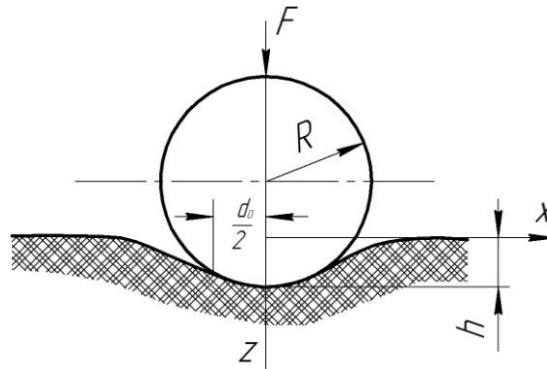


Рисунок 1.6 – Схема взаимодействия алмазного зерна с горной породой

Таким образом, чтобы определить глубину внедрения алмаза в породу h (рисунок 1.6) необходимо совершить ряд преобразований выражения (1.10) типа:

$$(0,79^2 \cdot P_o^2 \cdot 4R^2)h^2 - (0,79 \cdot P_o^2 \cdot 2R)h^3 - F_H = 0.$$

На первом этапе преобразования видно, что применение данной модели – сложный способ определения значения глубины внедрения алмаза в породу.

Перечисленные модели, безусловно, внесли большой вклад в развитие исследования характера взаимодействия алмазного ПРИ с забоем скважины. Однако, все они основываются на изучении единичного алмаза шарообразной формы и как правило в статическом состоянии, что не отвечает действительности разрушения породы в процессе бурения скважин.

Взаимодействие группы алмазных резцов с породой

С тех пор как Д. Н. Башкатов впервые применил системный подход для исследования процесса алмазного бурения (на основании которого установлена зависимость величины выпуска алмазов от размера алмазов, их качества и

свойств горной породы), было выдвинуто ряд теорий и построено моделей взаимодействия алмазов коронки с породой.

Большой вклад в исследование взаимодействия резцов алмазной коронки с горной породой внесла группа исследователей под руководством Г. А. Блинова [13, 14, 15]. При этом взаимодействие алмазов с породой рассматривалось следующим образом (рисунок 1.7) [13]: часть алмазов 1 работает в режиме внешнего трения, т. е. деформирует горную породу упруго, без хрупкого разрушения; часть алмазов 2 деформирует породу с хрупким разрушением, часть алмазов 3 скользит по разрушенному предыдущим алмазом слою породы; часть алмазов 4 скалывает ослабленную в результате растягивающих напряжений горную породу.

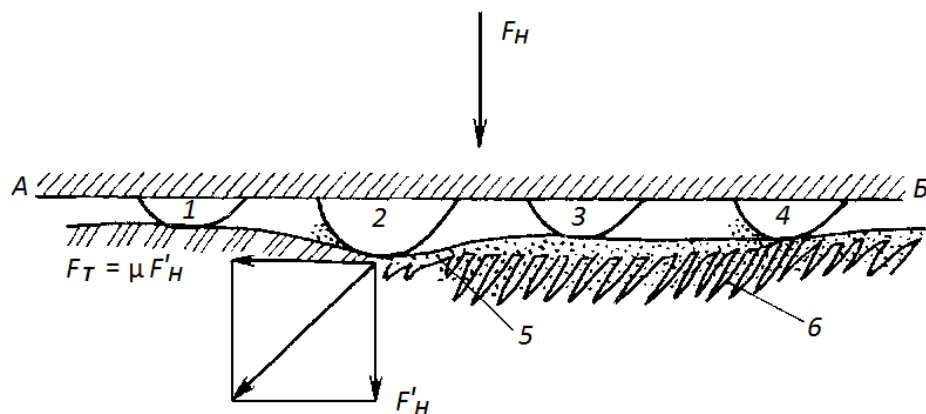


Рисунок 1.7 – Схема взаимодействия резцов алмазной коронки с горной породой по Блинову Г. А.: 5 – зона разрушения; 6 – зона предразрушения

На износ алмазной коронки при нормальном течении процесса бурения большое влияние оказывает относительное сближение ($\varepsilon = h_{max}/R_{max}$ – отношение глубины внедрения алмазов h_{max} в горную породу к радиусу R_{max} наибольшего выступа алмаза в данной линии резания) контактирующих поверхностей. В зависимости от этой величины изменяется глубина внедрения алмазов и микронеровностей матрицы. Так как процесс связан с интенсивным теплообразованием, а количество выделяемого тепла зависит от площади соприкосновения, то при определенном заглублении инденторов количество отдаваемого породе

тепла будет меньше вновь образуемого. В результате износ алмаза начнет увеличиваться и при переходе через какой-то нормированный уровень наступит стадия повышенного износа алмазов [13].

Данная модель рассматривает работу лишь одной линии резания, причем без учета наличия промывочных окон, диаметра ПРИ и влияния на теплообмен циркуляции очистного агента. К тому же при разном выпуске алмазов характер работы существенно меняется.

А. Ф. Кичигин, С. Н. Игнатов, Ю. И. Климов, В. Д. Ярема [14] рассматривают алмазные зерна как шарики радиусом r . При расчете толщины стружки, снимаемой одним зерном, был учтен ряд геометрических параметров коронки и получена формула:

$$h_a = 8,4 \left[\frac{v_{\Pi}}{(R_n + R_{вн})K C_1 n_6} \right]^{1/2}, \quad (1.11)$$

где R_n , $R_{вн}$ – соответственно, наружный и внутренний радиусы рабочего кольца коронки, м; K – концентрация алмазов в коронке; v_{Π} – скорость подачи инструмента; C_1 – коэффициент, учитывающий прерывистость рабочей поверхности, $C_1 = 1 - \frac{l_{\Pi}}{l_c + l_{\Pi}}$, l_c , l_{Π} – соответственно длина алмазосодержащего сегмента и промывочных окон между ними; n_6 – частота вращения [14].

Однако такой подход можно применять лишь к импрегнированным коронкам, т.к. в явном виде до начала проведения расчетов количество алмазов в секторе неизвестно (n_c). Авторы теории выдвигают допущение, что при неизменных режимах работы коронки величина ее заглубления a_k и толщина стружки, приходящейся на каждое зерно, с течением времени не изменяются и величина h_a не является функцией угла поворота коронки φ , что с учетом других исследований ставит под сомнение адекватность такой модели.

Р. К. Богданов, А. П. Загора, А. М. Исонкин в своих работах использовали модель взаимодействия алмазов ПРИ с забоем скважины показанную на рисунке 1.8 [3].

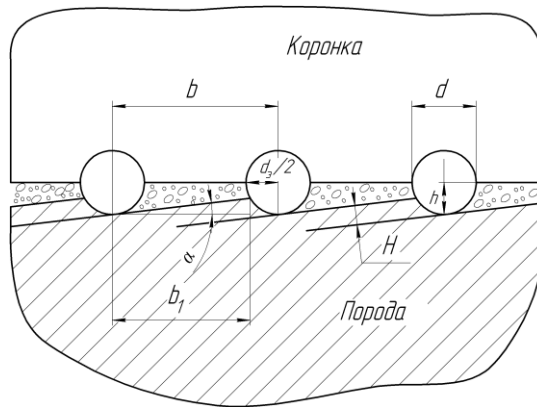


Рисунок 1.8 – Схема работы алмазов в буровой коронке (ИСМ)

Используя эту модель, авторы, с учетом разрушения или выпадения части зерен в процессе работы, а также длины промывочных каналов, рассчитали среднее расстояние между соседними рабочими зернами в линии резания и вывели зависимость определения углубления за оборот [3]:

$$P < \frac{h}{\frac{K_p}{Qn_c(1 - \frac{K\beta}{400})} + \frac{1}{m_l\beta(\pi D_1 - n_c L)}}, \quad (1.12)$$

где h – средняя высота выступающего зерна; K_p – коэффициент разрыхления шлама породы; Q – коэффициент заполнения, равный отношению объема, занимаемого разрушенными частицами породы, к свободному объему между поверхностями матрицы коронки и забоя; n_c – количество секторов; β – коэффициент использования алмазных зерен; m_l – расчетное количество зерен в линии резания, шт/см; D_1 – средний диаметр коронки; L – длина промывочного канала.

Полученные результаты показывают работу одной линии резания. При этом наличие шлама между матрицей коронки и забоем учитывается как для импрегнированных коронок.

В исследованиях под руководством А. А. Бугаева также используется схема работы алмазных резцов (рисунок 1.9), расположенных на одной линии резания [45].

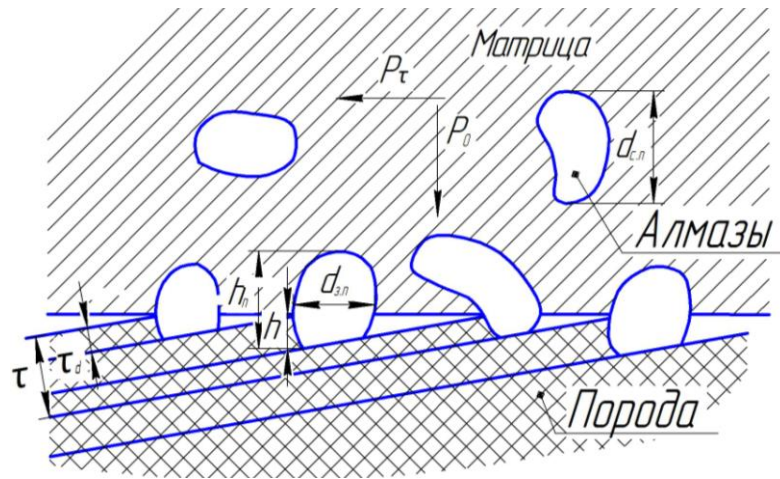


Рисунок 1.9 – Схема работы алмазных зерен

Согласно данной модели при большом количестве алмазов, расположенных на линии резания и вступающих в контакт с породой, каждый из них разрушает небольшой слой породы, толщина которого зависит от подачи τ_a на алмаз. Были получены зависимости подачи от механической скорости и формула определения величины выступания алмазов h :

$$\tau_a = \frac{v_{\text{мех}}}{nm_K}, \quad (1.13)$$

$$h = \frac{aA_n v_{\text{мех}}}{A_m nm_K}, \quad (1.14)$$

где A_n – абразивная способность частиц шлама, которая определяется как весовой износ штабика из эталонного материала при трении о шлам горной породы; A_m – износостойкость матрицы, которая определяется как весовой износ штабика из матрицы при трении по эталонному абразиву; a – безразмерный коэффициент [16].

Несмотря на то, что представленная модель рассматривается для импрегнированных коронок, при задании определенных данных, ее можно использовать для исследования работы однослойных коронок, но лишь одной линии резания. Однако представленная формула (1.13) не только не позволяет определять зависимость подачи от нагрузки на коронку, но и для практического использования требует знания реальных характеристик пород на забое скважины.

Схемы работы алмазной коронки, показанные на рисунках 1.8 и 1.9, позволяют исследовать работу лишь одной линии резания, не учитывая влияния других линий резания. При этом все алмазы рассматриваются как равнонагруженные.

Имеется ряд работ по исследованию взаимодействия алмазов коронки с забоем, в которых рассматривается неравномерное нагружение алмазов даже одной линии резания.

Сотрудниками ПГО «Кировгеология» [43, стр.169] была предложена модель взаимодействия алмазной коронки с забоем в процессе бурения, основанная на схеме представленной на рисунке 1.10. Ими отмечено, что лидирующие алмазы линии резания из-за наличия промывочного канала подвергаются более интенсивному механическому износу. Различия нагрузок на алмазы зависит от конструктивных особенностей коронок и определяется расчетным путем.

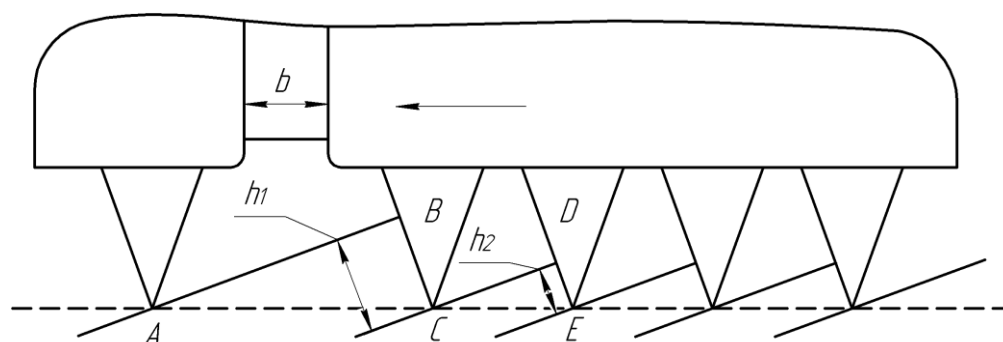


Рисунок 1.10 – Схема работы алмазной коронки в начальный период эксплуатации

В качестве основных величин, описывающих конструкцию и тип алмазной коронки принимаются: насыщенность алмазов, диаметр алмазов, ширина промывочного паза; количество секторов матрицы.

В результате аналитически были получены формулы определения глубин внедрения лидирующих h_1 и следующих за ними h_2 алмазов:

$$h_1 = \frac{V_{\text{мех}}}{0,06\pi D_c} \left(b + d_a \left(\frac{0,25K}{100} \right)^{-\frac{2}{3}} \right), \quad (1.15)$$

$$h_2 = \frac{V_{\text{мех}}}{0,06\pi D_c} \cdot d_a \left(\frac{0,25K}{100} \right)^{-\frac{2}{3}}, \quad (1.16)$$

где $V_{\text{мех}}$ – механическая скорость бурения, м/ч; D_c – средняя окружность матрицы коронки, мм [46, 47].

Данная модель применима лишь в том случае, когда все линии резания коронки работают в одинаковых условиях и происходит синхронное разрушение породы алмазами разных секторов. Методика привязана к заданной механической скорости бурения (скорость подачи) и не показывает зависимости от осевой нагрузки на коронку, что значительно ограничивает область ее применения.

В. Ф. Казика [17] показал, что в коронках алмазы первого ряда, установленного в начале сектора, будут внедряться в породу на большую величину, чем все остальные алмазы последующих рядов сектора (рисунок 1.11).

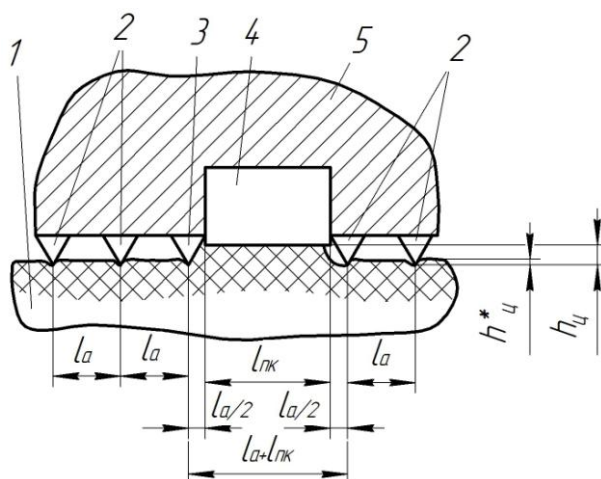


Рисунок 1.11 – Схема работы секторной коронки в процессе бурения:

1 – горная порода; 2 – группа последующих алмазов; 3 – группа набегающих алмазов; 4 – промывочный канал; 5 – матрица коронки

При этом величина углубки алмазов определялась по заданной механической скорости бурения:

$$h_1 = \frac{V_{\text{мех}}}{60 \cdot n} \cdot 10^3, \text{ м} \quad (1.17)$$

Это в явном виде не позволяет определить зависимость углубки от осевой нагрузки.

Отношение глубин внедрения алмазов первого и последующего рядов в

порядку (λ) определялось отношением длины промывочного канала (l_n) к расстоянию между алмазами в линии резания (l_a), а количество циклов разрушения ξ рассчитывается по формуле:

$$\xi = \frac{\pi d_1}{l_a + l_n}, \quad (1.18)$$

где d_1 – диаметр окружности внутренней линии резания.

Углубка за один цикл составит:

$$h_u = \frac{h_1}{\xi} \quad (1.19)$$

Данные выводы являются не точными, потому что в коронках с радиальной раскладкой алмазы первого и последнего радиальных рядов сектора могут располагаться либо на разных линиях резания (рисунок 1.12 а) либо на одних линиях резания (рисунок 1.12 б).



Рисунок 1.12 – Расстояние между алмазами коронок с возможными вариантами радиальных раскладок алмазов

Если для коронок, тип раскладки которых приведен на рисунке 1.12 б, верны зависимости [17], то для коронок, тип раскладки которых соответствует схеме представленной на рисунке 1.12 а, расстояние между алмазами в линии резания различно, а максимальное может достигать значения $1,5l_a$ (рисунок 1.12), отсюда выражение (1.18) примет вид:

$$\xi = \frac{\pi d_1}{1,5l_a + l_n}, \quad (1.20)$$

Поэтому предложенные в работе [17] зависимости имеют ограниченную область применения и требуют уточнения в случае анализа реальных схем

однослойных коронок. К тому же модель Казики В.Ф. и представленные выше другие модели не учитывают характер траектории движения углубки алмазов.

Разработанная в ВИТРе модель «циклической» углубки скважины при неравномерном распределении алмазов в линии резания (что наиболее характерно для современных конструкций алмазных однослойных коронок, принимая во внимание наличие торцевых промывочных окон), учитывает тот факт, что алмазы внедряются в породу по винтовой линии [59] (рисунок 1.13). При этом алмаз 2 является «лидирующим» и внедряется в породу на максимально возможную для всех алмазов линии резания глубину h_{a2} :

$$h_{a2} = \frac{h}{N} \cdot \frac{L}{l}, \quad (1.21)$$

где N – количество алмазов в одной линии резания; h – углубка коронки за один оборот; L – расстояние между двумя неравномерно расположенными алмазами; l – расстояние между двумя соседними равномерно расположенными алмазами в линии резания.

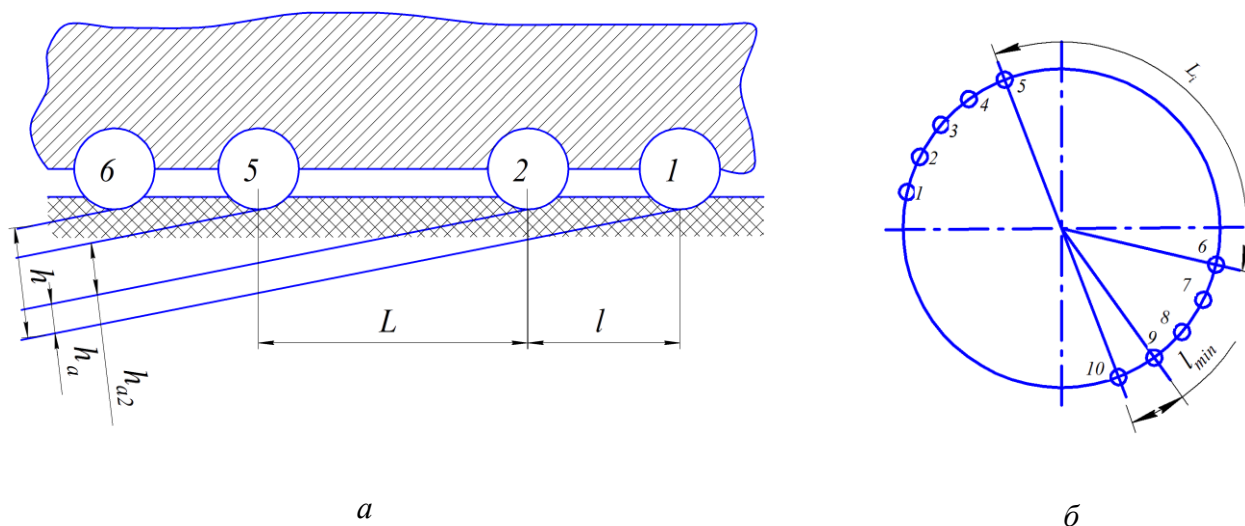


Рисунок 1.13 – Модель ВИТР:

а – схема «винтовой углубки»; *б* – неравномерная раскладка алмазов по окружности резания коронки

Учитывая влияние двух смежных линий резания, авторами выведена формула углубки коронки за один оборот:

$$h = 2 \sum_{i=1}^n h_{ai}, \quad (1.22)$$

где h_{ai} – углубление i -того алмаза в породе; n – число внедрений алмазов в горную породу за $\frac{1}{2}$ оборота коронки (при этом $h_{a1} > h_{a2} > \dots > h_{an}$).

Данная модель наиболее прогрессивная, однако, работа коронки рассматривается так, как будто алмазы располагаются одинаково на всех ее линиях резания. Если рассмотреть хотя бы приведенные выше раскладки алмазов на торце коронки (рис. 1.2, 1.3), то можно заметить, что расстояние между соседними алмазами (l и L) не одинаково даже для двух смежных линий резания, а учитывая разнообразие схем раскладок алмазов, данный вывод о значениях h и h_{a2} может оказаться не точным.

Анализ существующих моделей работы алмазного породоразрушающего инструмента при бурении скважин показал, что в основном использовался узконаправленный подход к изучению данного процесса. При исследовании разрушения породы единичным алмазом выделяются следующие применяемые подходы: изучение геометрии забоя в процессе бурения; изучение особенностей движения алмаза шарообразной формы. При использовании группового подхода многие авторы исследуют либо одну линию резания, либо переносят результаты исследования одного индентора на работу всей коронки в целом, либо базируются в основном только на экспериментальных данных. Существующие модели не учитывают, что на характер нагрузок, которые испытывают алмазы коронки в процессе бурения, влияет несколько факторов одновременно, а именно: свойства перебуриваемых пород; работа других алмазов коронки; количество алмазов в секторе и схема их раскладки; геометрические размеры элементов коронки (длина сектора, длина промывочного канала, расстояние между алмазами внутри сектора); режимы бурения, которые в свою очередь могут меняться в процессе бурения. Кроме того известные модели взаимодействия алмазом коронки с горной породой не учитывают взаимное влияние работы как отдельных алмазов, так и их групп в системе нескольких (более двух) линий резания коронки.

Для более полного и достоверного изучения работы алмазной коронки на

забое необходимо рассмотрение взаимодействия с горной породой каждого алмаза коронки как элемента единой и взаимосвязанной системы с учетом термических и гидродинамических процессов.

1.2 Анализ исследования температурных режимов работы алмазной коронки при взаимодействии с забоем скважины

Результаты широко известных исследований показали [19, 20], что основная часть механической энергии на забое переходит в тепло. В связи с этим исследование теплового состояния алмазов в процессе бурения коронкой – очень сложная задача, т.к. коронка состоит из различных по теплофизическим свойствам частей, при вращении инструмента происходит продвижение коронки вглубь холодной породы, постоянная циркуляция очистного агента (теплофизические свойства которого могут отличаться) – все это вносит свои коррективы в процесс бурения.

Активное изучение влияния температуры на работу алмазного породоразрушающего инструмента было связано с широким введением в практику бурения с высокой частотой вращения (1000 об/мин и более), особенно с применением пен, аэрированных жидкостей и воздуха, которые не позволяли обеспечить интенсивный теплоотвод.

Решение задачи о температурном режиме алмазного бурового инструмента впервые было получено Б. Б. Кудряшовым и Ю. А. Оношко [18]. Буровая коронка была представлена в виде составного тела (рисунок 1.14), на торце которого задавался источник тепла. Осредненная температура торца инструмента определялась по формуле:

$$t_T = \frac{2 \cdot k_p \cdot N}{\pi \sqrt{\lambda_k (\alpha_1 D_H + \alpha_2 D_2) (D_H^2 - D_B^2)}} + \frac{k_p \cdot N}{2 \cdot G \cdot c_p} + t_0, \quad (1.23)$$

где k_p – коэффициент распределения потока тепла между породой и инструментом; N – мощность затрачиваемая коронкой на забое, Вт; λ_k – коэффициент теплопроводности материала коронки, Вт/м·°С; α_1 , α_2 –

коэффициенты конвективной теплоотдачи от внутренней и внешней поверхности цилиндра к жидкости, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$; G – массовый расход промывочной жидкости, $\text{кг}/\text{с}$; c_p – коэффициент теплоемкости промывочной жидкости, $\text{Дж}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}$; t_0 – температура промывочной жидкости в исходящем потоке над коронкой ($^\circ\text{С}$).

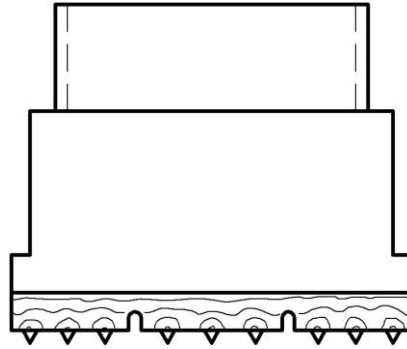


Рисунок 1.14 – Схема к расчету тепловых полей в буровой коронке по методу Кудряшова Б. Б. и Оношко Ю. А.

Данная методика изучения несколько упрощена и не рассматривает влияние на теплообмен изменения количества и раскладки алмазов, возможности использования в одной коронке различных по свойствам алмазов. Малая роль уделяется теплообмену с промывочной жидкостью на торце коронки.

Такой подход оказался достаточно продуктивным и стал основой для дальнейшего развития методов теоретического прогнозирования температурного режима в работах Л. К. Горшкова (рисунок 1.15 а), Б. Б. Кудряшова, А. А. Яковлева (рисунок 1.14 б) [9, 19, 18, 21, 22, 23, 28, 43].

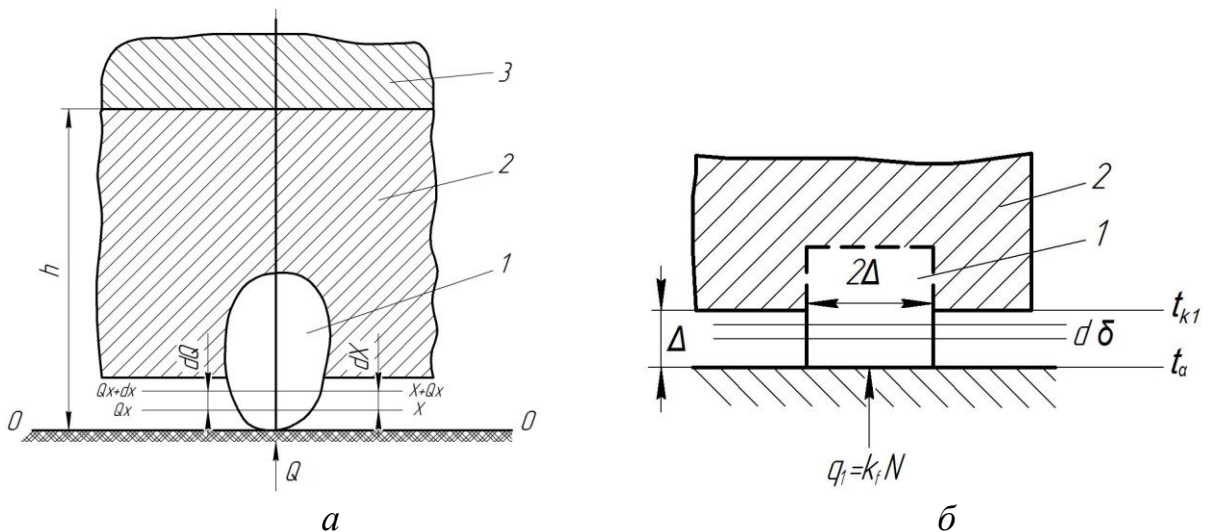


Рисунок 1.15 – Схема к расчету:
 а – температуры нагрева режущих граней алмазов по Горшкову Л. К. [54];
 б – теплового потока по Кудряшову Б. Б. и Яковлеву А. А.

Для расчета нагрева режущих граней алмазов Л. К. Горшков [9, 28, 43, 54] предложил использовать формулу:

$$t_a = \frac{kp \cdot N \cdot \left(1 - \frac{F_a}{F_m} \frac{2M_k \cdot \frac{\lambda_k \cdot F_k}{\lambda_m \cdot F_m} + 2 \cdot M_m \cdot e^{M_m \cdot l} - M_m (e^{M_m \cdot (l-l_a)} + e^{-M_m \cdot (l-l_a)})}{2M_k \cdot \frac{\lambda_k \cdot F_k}{\lambda_m \cdot F_m} + M_m (e^{M_m \cdot (l-l_a)} - e^{-M_m \cdot (l-l_a)})}\right)}{\lambda_a \cdot F_a \cdot M_a} + \frac{kp \cdot N}{2G \cdot c_p} + t_0, \quad (1.24)$$

где $M_a = \sqrt{\frac{\alpha \Pi_a}{\lambda_a \cdot F_a}}$; $M_m = \sqrt{\frac{\alpha \Pi_m}{\lambda_m \cdot F_m}}$; $M_k = \sqrt{\frac{\alpha \Pi_k}{\lambda_k \cdot F_k}}$; α – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/м²·°С; Π_a , Π_m , Π_k – периметры охлаждаемых поверхностей алмазов, матрицы и корпуса соответственно, м; λ_a , λ_m , λ_k , F_a , F_m , F_k – коэффициенты теплопроводности (Вт/м·°С) и площади поперечного сечения (м²) соответствующих участков; l – высота инструмента, м; l_a – выход алмазов из матрицы.

В дальнейшем Б. Б. Кудряшов и А. А. Яковлев [18] предложили различать коэффициент конвективной теплоотдачи для каждого из участков и определять температуру режущих граней алмазов по формуле:

$$t_a = \frac{(AB - n_1 n_3) \cdot sh 2m_1 l_a - 2n_2 A}{2 \cdot sh^2 m_1 l_a \cdot (AB - n_1 n_3) n_1} kp \cdot N + \frac{kp \cdot N}{2 \cdot G \cdot c_p} + t_0, \quad (1.25)$$

где $n_1 \lambda_a F_a m_1$; $n_2 = \lambda_m F_m m_m$; $n_3 = \lambda_k F_k m_3$; $A = (n_3 \cdot cth m_2 \cdot l_m + n_2 \cdot cth m_3 \cdot l_k) sh^2 m_2 l m$;

$$B = n_2 \cdot cth m_1 \cdot l_a + n_1 \cdot cth m_2 \cdot l_m; \quad m_1 = \sqrt{\frac{\alpha_a \Pi_a}{\lambda_a \cdot F_a}}; \quad m_2 = \sqrt{\frac{\alpha_1 \Pi_1 + \alpha_2 \Pi_2 + \alpha_3 \Pi_3}{\lambda_m \cdot F_m}};$$

$m_3 = \sqrt{\frac{\alpha_4 \Pi_4 + \alpha_5 \Pi_5}{\lambda_k \cdot F_k}}$; α_a – коэффициент теплоотдачи с боковой поверхности объемных алмазов, Вт/м²·°С; F_a – суммарная площадь поперечного сечения объемных алмазов, м²; Π_a – суммарный периметр объемных алмазов, м; α_1 , α_2 – коэффициент теплоотдачи в зазорах соответственно между матрицей и керном и между матрицей и стенками скважины; α_3 – коэффициент теплоотдачи в промывочных каналах, Вт/м²·°С; Π_1 , Π_2 – периметры внутренней и наружной поверхностей матрицы без учета промывочных каналов, м; Π_3 – периметр боковых поверхностей промывочных каналов, м; α_4 , α_5 – коэффициенты теплоотдачи в зазорах между корпусом и керном и корпусом и стенкой скважины,

$\text{Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$; P_4 , P_5 – периметры внутренней и наружной поверхностей корпуса коронки, м.

Несмотря на детализацию последних моделей, они имеют значительные недостатки: результаты расчета не всегда согласовываются с экспериментальными данными, а за основу теоретических исследований взята работа единичного алмаза.

Проведено много экспериментов, позволяющих изучать температурный режим алмазных коронок в процессе бурения. В ВИТР экспериментальным путем методом термопар измерили температуру единичного алмаза, в горной породе и в матрице в отдельности. Этот же метод применялся в своих научно-исследовательских работах ИСМ. Нужно отметить, что на сегодняшний день данный метод менее затратный и самый распространенный в сфере исследований температурных процессов. Однако, термопара требует фиксации, в основном это делается путем сверления отверстия чаще в матрице, что не дает полной картины распределения температуры. Используя данный метод сложно судить о изменении температуры на контакте алмаза с породой, алмаза с промывочной жидкостью, наблюдать за изменением температуры в процессе бурения.

В ФГУНИГП «Тюльское НИГП» Ю. Е. Будюков, В. И. Власюк, В. И. Спирин провели работу по моделированию температурного режима работы алмазной коронки и установили, что на температуру буровых алмазов основное влияние оказывает мощность и вывели зависимость изменения температуры по высоте матрицы коронки от частоты вращения [11]. Их аналитическое определение контактной температуры при бурении имеет эмпирические коэффициенты и не учитывает возможные геометрические особенности конструкции коронки в целом. Работа подтверждает, что одним из способов повышения термостойкости алмазных буровых коронок является конструктивное изменение ее составляющих.

Большой вклад в изучение влияния гидравлических и температурных факторов на эффективность бурения алмазным ПРИ внесли исследователи ДГИ-НГУ.

Опираясь на работы Б. Б. Кудряшова, Ю. А. Оношко, Л. К. Горшкова и

А. А. Яковлева [19], была построена математическая модель для теплового расчета (схема представлена на рисунке 1.16).

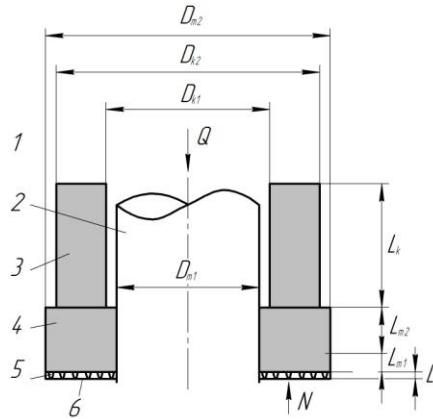


Рисунок 1.16 – Схема к модели нагрева коронки (по ДГИ-НГУ):

1 – стенка скважины; 2 – керн; 3 – корпус; 4 – матрица; 5 – алмазы; 6 – забой скважины

Ими составлена система дифференциальных уравнений второго порядка, которая описывает одномерную модель стационарного температурного поля по высоте коронки:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 t_1}{dx^2} = 0, 0 < x < l_1 \\ \frac{d^2 t_2}{dx^2} + M_2^2 \cdot t_2 = M_2^2 \cdot t_{ж}, l_1 < x < l_2 \\ \frac{d^2 t_3}{dx^2} + M_3^2 \cdot t_3 = M_3^2 \cdot t_{ж}, l_2 < x < l_3 \\ \frac{d^2 t_4}{dx^2} + M_4^2 \cdot t_4 = M_4^2 \cdot t_{ж}, l_3 < x < L \end{array} \right., \quad (1.26)$$

где t_1, t_2, t_3, t_4 – температура алмазов, первого и второго участка матрицы, корпуса коронки соответственно; $l_1=l_w, l_2=l_1+l_{m1}, l_3=l_2+l_{m2}, L=l_3+l_k$ – границы соответствующих участков.

При решении системы уравнения было получено следующее выражение для расчета температуры режущих граней алмазов:

$$t_a = t_{ж} + k_p \cdot N \left(\frac{l_1}{\lambda_a F_1} - \frac{1}{\lambda_m F_2 M_2} \cdot \frac{e^{M_2 l_1} - \Xi \cdot e^{-M_2 l_1}}{e^{M_2 l_1} + \Xi \cdot e^{-M_2 l_1}} \right), \quad (1.27)$$

где λ_a – коэффициент теплопроводности алмазов, Вт/м·°С; F_1 – суммарная площадь сечения алмазов, м²; $t_{ж}$ – температура промывочной жидкости; k_p – коэффициент нагрева коронки, который позволяет уточнить фактическое количество тепла

поступающего в тело коронки; Ξ определяется по формуле:

$$\Xi = e^{2M_2l_2} \frac{\lambda_m F_3 M_3 - \xi(\lambda_m F_2 M_2 + \alpha_2 F_T)}{\lambda_m F_3 M_3 + \xi(\lambda_m F_2 M_2 - \alpha_2 F_T)}, \quad (1.28)$$

где F_T – площадь теплоотдающей поверхности, m^2 ; $\xi = \frac{e^{2M_3l_2} - \frac{1-\Lambda}{1+\Lambda} e^{M_3(2l_3-l_2)}}{e^{2M_3l_2} + \frac{1-\Lambda}{1+\Lambda} e^{M_3(2l_3-l_2)}}$ и

$$\Lambda = \frac{\lambda_m F_3 M_3}{\lambda_k F_4 M_4} \cdot \frac{e^{M_4l_3} + e^{M_4(2L-l_3)}}{e^{M_4l_3} - e^{M_4(2L-l_3)}}.$$

При составлении данной математической модели были допущены упрощения, значительно снижающие достоверность получаемых результатов. В модели не учтен теплоотвод жидкостью, поступающей в зазор между торцом матрицы и породой, что является важным фактором. Течением жидкости в этом пространстве авторы пренебрегают, исследуя лишь течение жидкости в пределах торцевого и бокового промывочных каналов.

Подобные упрощения связаны с громоздкостью и трудоемкостью вычислений при использовании более детальных моделей, невозможностью получения более точных аналитических решений. Альтернативой аналитических способов являются экспериментальные исследования или математическое моделирование с помощью программного обеспечения.

Экспериментальное исследование температурного режима бурения затруднено технически и материально. В то время как математическое моделирование признается перспективным в настоящее время.

Уже были предприняты попытки математического программирования взаимодействия алмазного ПРИ с породой. Так, в работах [26, 27] разработаны двумерные математические модели процесса резанья породы. А. Ортега предложил математическое определение температуры на контакте бурового инструмента и породы, но при этом использовал лишь единичный элемент ПРИ [24].

А. М. Абдуладзе и И. К. Аббасов [25] посредством компьютерного моделирования рассчитали основные геометрические характеристики коронок,

однако, предложенная методика не учитывает теплофизические свойства элементов коронки.

А. А. Кожевников и А. Ю. Дреус, используя общепринятую схему, смоделировали процесс нагрева единичного алмаза и получили температурное поле (рисунок 1.17) в алмазе, породе и коронки [28]. Данная работа позволила детально рассмотреть распространение температуры от контакта алмаза с породой.

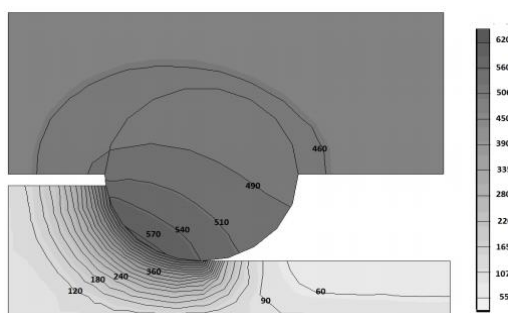


Рисунок 1.17 – Температурное поле бурового алмаза и породы через 0,17 с после контакта

Однако, модель не учитывает истинной картины работы коронки на забое: моделируется взаимодействие единичного алмаза с породой в статике без учета циркуляции промывочной жидкости и взаимодействия с другими алмазами коронки.

Опыт научных исследований работы алмазного инструмента на забое скважины открывает широкий спектр факторов влияющих на процесс бурения. Все приведенные научные достижения ценны и нуждаются в своем развитии. Однако, для получения более точных и достоверных результатов необходимо учитывать все основные аспекты многофакторного процесса бурения скважин алмазным инструментом. Поэтому необходим системный, комплексный подход, базирующийся на аналитическом и экспериментальном исследовании сложного процесса разрушения горных пород алмазным инструментом. Реализовать такой подход позволяет компьютерное моделирование, которое существенно повышает уровень изучения работы бурового инструмента на забое скважины.

1.3 Объект, цели и задачи исследований

Приведенный выше обзор и анализ научной и технической литературы показал, что вопрос разработки новых алмазных коронок остается актуальным. Это обусловило выбор темы и направления исследований диссертационной работы.

Учитывая опыт ранее проведенных работ, в качестве *объекта* исследования приняты алмазные однослойные коронки с радиальной раскладкой алмазов с сечением торца в виде полусферы.

Разработку новых алмазных коронок необходимо производить на основании *комплекса исследований*, позволяющих определить:

1. Нагрузки, действующие на каждый алмаз коронки при взаимодействии ее с горной породой на забое;
2. Механические напряжения в алмазах, матрице и корпусе коронки с учётом действующей осевой нагрузки, крутящего момента и характера распределения нагрузки на отдельные алмазы;
3. Поле скоростей жидкости под торцом коронки (включая зазор между поверхностью сектора и горной породой) при промывке забоя с учётом вращения коронки;
4. Температуру на контакте алмазов с породой и температурное поле в элементах коронки с учётом циркуляции промывочной жидкости на забое скважины, в том числе под торцом коронки.

При этом каждый алмаз коронки при взаимодействии с горной породой должен рассматриваться как отдельный элемент единой системы, в которой происходят взаимосвязанные механические, тепловые и гидравлические процессы.

Цель работы – обоснование геометрических 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 эффективность их работы при бурении геологоразведочных скважин.

Выводы по главе 1

1. Наиболее оптимальной с точки зрения исследования работы и равномерного распределения нагрузки является конструкция однослойной алмазной коронки с радиальной раскладкой алмазов по торцу полусферической формы с промывочной системой, обеспечивающей эффективную очистку забоя от шлама.

2. Существующие модели исследования работы алмазного однослойного породоразрушающего инструмента из-за сложности экспериментальных работ и громоздкости аналитических вычислений носят упрощенный характер, что не позволяет получить достоверные результаты.

3. Разработку новых алмазных коронок необходимо производить на основании комплексного подхода к исследованию работы коронки на забое, причем особое внимание необходимо уделять температурному и гидравлическому режиму

бурения.

4. Одним из способов повышения термостойкости алмазных буровых коронок является конструктивное изменение ее составляющих.

5. Экспериментальное исследование температурного режима бурения затруднено технически и материально, альтернатива эксперименту – математическое моделирование.

6. Компьютерное моделирование позволяет учитывать все нюансы процесса и сложность геометрии. Однако результаты расчетов существующих моделей упрощены и не всегда совпадают с экспериментальными данными. Что указывает на необходимость применения последних достижений математического программирования в области исследования особенностей работы породоразрушающего инструмента при разрушении породы на забое.

ГЛАВА 2 РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАБОТЫ ОДНОСЛОЙНЫХ АЛМАЗНЫХ КОРОНОК НА ЗАБОЕ СКВАЖИНЫ

Для решения поставленных задач необходимо увязать все параметры работы алмазной однослойной коронки на забое скважины в одну схему. С этой целью предложена следующая последовательность этапов исследования:

1. *На основе анализа процесса работы инструмента выделяются наиболее весомые факторы, использующиеся как исходные данные для исследования.*

Учитывая изучаемую область, принимаются наиболее важные для исследования исходные данные, влияющие на результат. Такими данными выступают: тип раскладки алмазов на торце коронки, прочность алмаза и матрицы, зернистость алмаза, используемого в армировании коронки.

2. *Уточняется существенность влияния выделенных факторов на геометрические параметры бурового инструмента и ограничения режимов бурения.*

Перечисленные исходные данные влияют на изменение геометрии торца однослойной алмазной коронки (длины сектора и промывочного окна), к тому же от прочности алмазного сырья и матрицы будет зависеть предельно допустимое значение осевой нагрузки.

3. *Определяется взаимное влияние выбранных факторов на исследуемые параметры.*

Длина сектора и осевая нагрузка на коронку определяют величину толщины слоя породы, срезаемого алмазами (или, если рассматривать этот вопрос во времени, углубку за оборот). Зная слой срезаемой породы и частоту вращения можно определить механическую скорость бурения. Температура нагрева алмаза в процессе бурения будет зависеть от подачи промывочной жидкости и механической скорости бурения.

4. *Определяется величина выходных параметров, характеризующих процесс бурения для конкретных условий эксплуатации бурового инструмента.*

Определяется температура нагрева алмаза в процессе бурения, что является решающим фактором в работоспособности коронки.

Таким образом, дальнейшие исследования должны основываться на выстроенной схеме взаимодействия параметров, показанной на рисунке 2.1 [88].

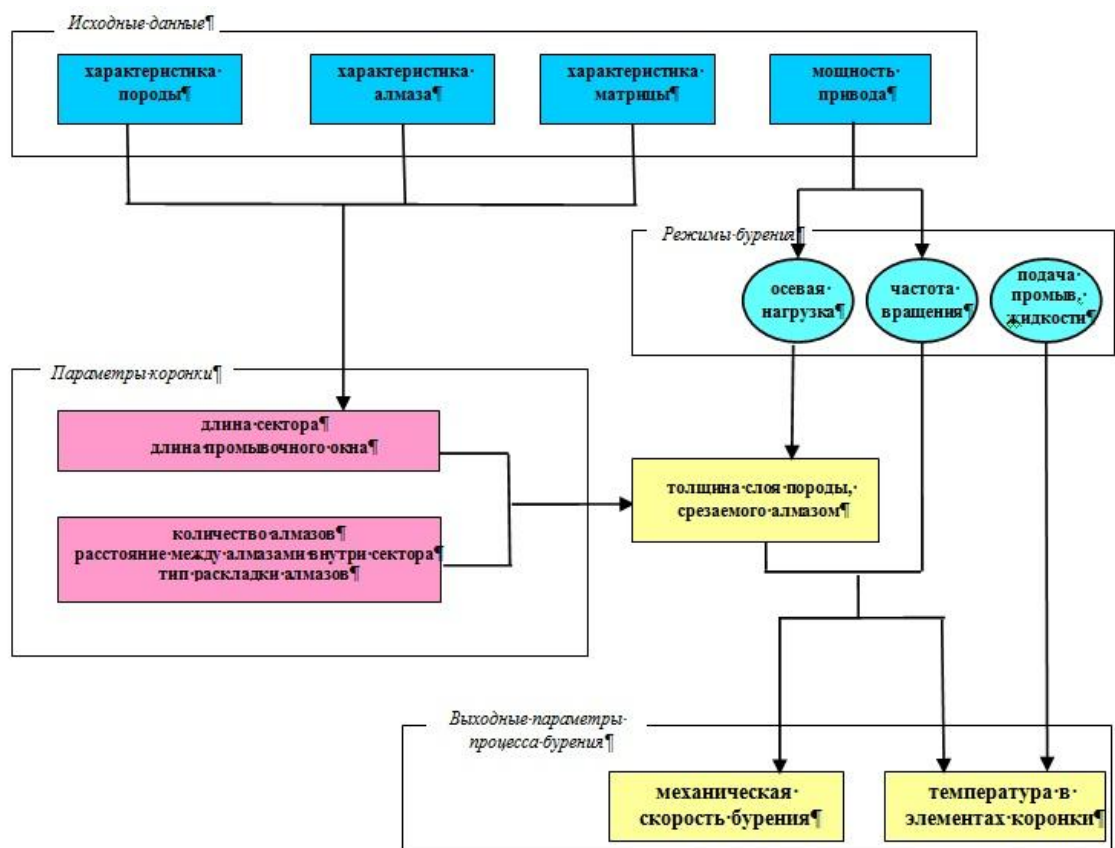


Рисунок 2.1 – Структурная схема взаимодействия параметров исследования

2.1 Разработка уточненной математической модели взаимодействия с забоем алмазных резцов однослойной коронки

2.1.1 Определение толщины слоя породы, срезаемого каждым алмазом коронки при движении по линии резания в процессе бурения

При прочих равных условиях опасность для алмазного резца представляют напряжения, величина которых зависит от глубины внедрения алмаза в горную породу. Рассмотрим случай, когда алмазы разных линий резания не перекрывают

друг друга, что характерно радиальной раскладке алмазов по concentрическим окружностям (рисунок 2.2).

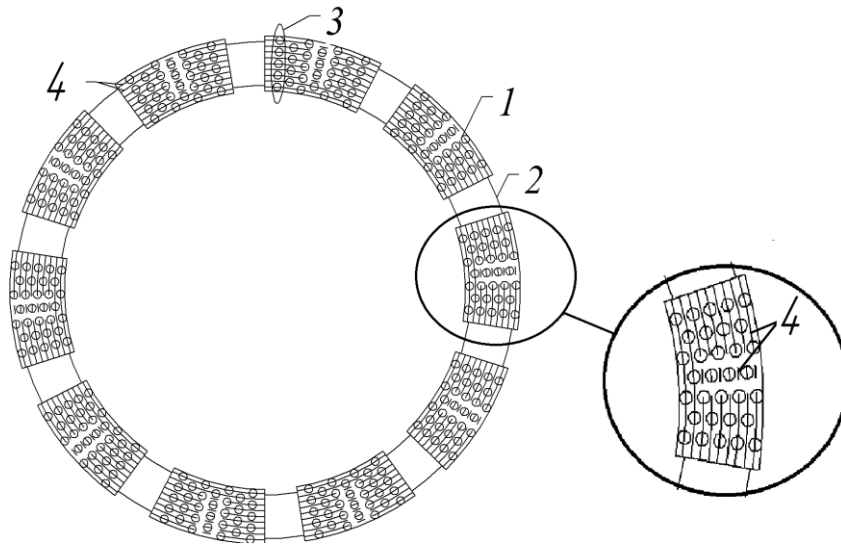


Рисунок 2.2 – Торце однослойной коронки:

1 – сектор; 2 – промывочный канал; 3 – радиальный ряд; 4 – линии резания

Пусть нагрузка на сектора распределяется симметрично. На один сектор действует усилие:

$$P_c = \frac{P_{oc}}{N_c}, \quad (2.1)$$

где P_{oc} – осевая нагрузка на коронку; N_c – количество секторов.

Тогда на один алмаз в секторе будет действовать усилие:

$$P_a = \frac{P_c}{n_a} = \frac{P_{oc}}{N_c n_a}, \quad (2.2)$$

где n_a – количество алмазов в одном секторе.

Под действием усилия P_a все алмазы внедрятся на одинаковую величину:

$$h_a = \frac{P_a}{P_{ум} \pi R} = \frac{P_c}{P_{ум} \pi R n_a}, \quad (2.3)$$

где h_a – глубина внедрения алмаза в породу; $P_{ум}$ – твердость породы по штампу; R – радиус алмаза.

При этом глубина разрушения породы h_p может превышать величину h_a и, согласно работе [2], может быть определена по формуле:

$$h_p = \frac{k_p k_a P_a}{P_{um} \pi R} = k_p k_a h_a, \quad (2.4)$$

где k_p и k_a – коэффициенты разрушения горной породы и формы алмаза [2].

Однако эта модель не учитывает особенностей работы алмазных резцов при движении коронки на забое как единой системы, что может оказать влияние на их взаимодействие с забоем.

В однослойных коронках алмазы по торцу матрицы располагаются в один слой по определенной схеме. Схема размещения торцевых алмазов выбирается в зависимости от размеров используемых алмазов, конфигурации промывочных окон, выбранной насыщенности и т.д. Учитывая опыт существующих исследований, рассмотрим коронки с радиальным расположением алмазов по торцу матрицы (рисунок 2.3), схема размещения которых рассчитывается по методике Н.В. Цыпина [5]. При этом рассмотрим режим работы, когда области, описываемые зонами внедрения алмазов разных линий резания, не перекрывают друг друга, в крайнем случае, только лишь соприкасаются. Это типичная ситуация при работе алмазной коронки, подтверждаемая экспериментальными данными приведенными Н.И. Корниловым в работе [2].

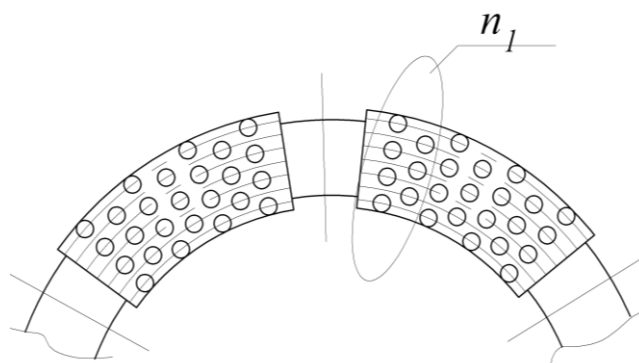


Рисунок 2.3 – Схема размещения алмазов в матрице: n_1 – количество алмазов в первых двух радиальных рядах (первый рабочий ряд)

При рассмотрении работы коронки будем использовать понятие рабочего ряда алмазов – минимальной совокупности радиальных рядов, считая от переднего торца сектора, алмазы в которых перекрывают все линии резания. Например, для схемы на рисунке 2.3 первый рабочий ряд – это 1-й и 2-й радиальные ряды, второй рабочий ряд – это 3-й и 4-й радиальные ряды и т.д.

На рисунке 2.4 показана схема взаимодействия алмазов периферической линии резания с горной породой (основанная на научном опыте ВИТР). При начале движения (рисунок 2.4 а), обусловленного вращением коронки, алмазы под действием осевой нагрузки внедрятся в породу на величину h_a , определяемую по формуле (2.3).

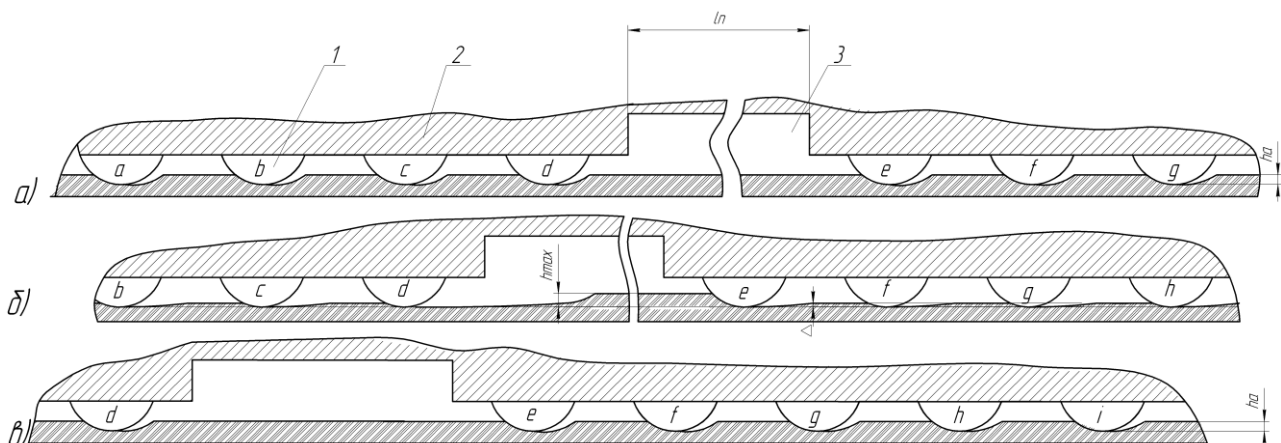


Рисунок 2.4 – Схема взаимодействия алмазов с горной породой:

1 – алмаз; 2 – матрица; 3 – промывочное окно; l_n – длина промывочного окна

Когда коронка повернётся на угол, при котором второй и последующие алмазы в линии резания переместятся на место предыдущих, то лобовое сопротивление с алмазов (кроме первого и второго радиальных рядов в секторе) снимется (рисунок 2.4 б). Это означает, что фактически происходит перераспределение сил сопротивления, действующих на алмазы. Тогда под действием осевой нагрузки произойдет углубка всех алмазов на величину Δ , которую можно найти из условия неизменности площади внедрения всех алмазов в породу, обусловленного постоянством осевой нагрузки на забой:

$$\pi R(h_a + \Delta)n_1 + \pi R\Delta(n_a - n_1) = \pi Rn_a h_a, \quad (2.5)$$

где n_1 – количество алмазов в первом рабочем ряду (равно количеству алмазов в первом и втором радиальном рядах, см. рис. 2.3).

Преобразуя (2.5), получим

$$h_a n_1 + \Delta n_1 + \Delta n_a - \Delta n_1 = n_a h_a,$$

откуда

$$\Delta = \left(1 - \frac{n_1}{n_a}\right) h_a, \quad (2.6)$$

или

$$\Delta = (1 - k_n) h_a, \quad (2.7)$$

где $k_n = n_1/n_a$ – отношение количества алмазов в первом рабочем ряду к общему количеству алмазов в секторе.

При этом алмазы первого рабочего ряда внедрятся на максимально возможную для алмаза величину h_{\max} (рисунок 2.4 б):

$$h_{\max} = h_a + \Delta = h_a + \frac{n_a - n_1}{n_a} h_a$$

$$h_{\max} = h_a \left(\frac{n_a - n_1}{n_a} + 1 \right) = h_a \left(1 - \frac{n_1}{n_a} + 1 \right).$$

Отсюда

$$h_{\max} = h_a \left(2 - \frac{n_1}{n_a} \right) = h_a (2 - k_n). \quad (2.8)$$

Из формулы (2.8) видно, что величина h_{\max} может значительно превышать величину h_a , рассчитанную по формуле (2.3), при этом, чем меньше алмазов в первом рабочем ряду, тем больше максимальная глубина внедрения алмазов. [92]

Алмазы первого рабочего ряда остаются внедрёнными в породу на величину h_{\max} , которая не меняется при прохождении ими области, находящейся в начальный момент под промывочными окнами, т.е. пока алмаз e не переместится на место, которое в начальном положении занимал алмаз d (см. рисунок 2.4 а). После этого сопротивление горной породы по передней поверхности алмазов выравнивается, и они все опять углубятся в породу на глубину h_a (рисунок 2.4 в).

Описанный случай справедлив для коронки, у которой количество алмазов в первом радиальном ряду сектора (n_{1l}) больше, чем в последнем.

Однако в коронках может использоваться схема раскладки алмазов, в которой количество алмазов в первом радиальном ряду сектора равно количеству

алмазов в последнем ряду (рисунок 2.5). При этом алмазы второго радиального ряда (их количество – n_{12}), проходя через область промывочных окон, в нагруженном состоянии преодолевают расстояние большее, чем алмазы первого радиального ряда ($l_2 > l_1$), поэтому в определенный момент времени они будут нагружены больше остальных.

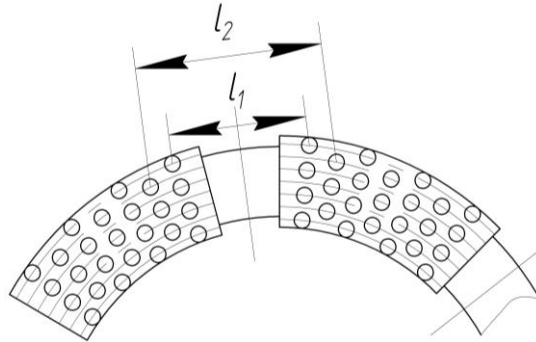


Рисунок 2.5 – Вид торца коронки с одинаковым количеством алмазов в первом и последнем радиальных рядах

Рассмотрим схему работы алмазов в этом случае (рисунок 2.6).

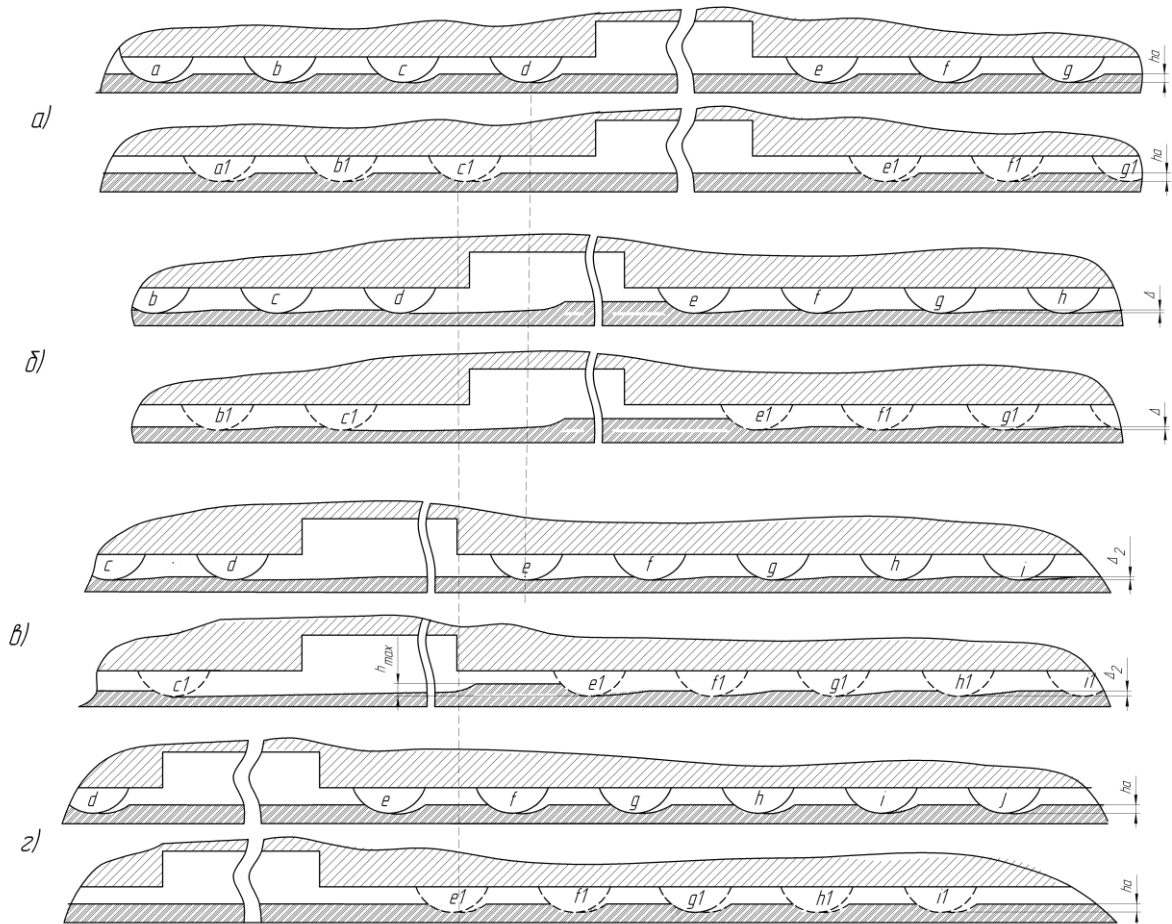


Рисунок 2.6 – Схема взаимодействия алмазов с горной породой (количество алмазов в первом и последнем радиальных рядах сектора равны)

В начальный момент движения коронки алмазы первой (a, b, c, d, e, f и т.д.) и второй ($a_1, b_1, c_1, d_1, e_1, f_1$ и т.д.) линий резания, как и в предыдущем случае, углубятся на одинаковую величину h_a (рисунок 2.6 а). В момент, когда алмазы третьего и последующих радиальных рядов переместятся на место впереди идущих, сопротивление их движению уменьшится, и все алмазы дополнительно углубятся в породу на глубину Δ . Однако, при этом силы сопротивления движению увеличатся на первые два радиальных ряда (см. рис. 2.5 б, алмазы e и e_1). Так будет продолжаться до тех пор, пока алмаз e не переместится на первоначальное место алмаза d . Сопротивление алмазам первого радиального ряда уменьшится, и все алмазы снова смогут углубиться на величину Δ_2 , при этом алмаз e_1 , как и все алмазы второго радиального ряда, будет испытывать максимальное сопротивление, а глубина его внедрения в породу будет составлять h_{\max} (рисунок 2.6 в). Когда алмаз e_1 станет на место алмаза c_1 , сопротивление на всех алмазах уменьшится, и они снова углубятся на величину h_a (рисунок 2.6 г).

В этом случае:

$$\pi R \Delta_2 n_{11} + \pi R (h_a + \Delta + \Delta_2) n_{12} + \pi R (\Delta + \Delta_2) (n_a - n_{12} - n_{11}) = \pi R n_a h_a$$

или

$$n_{12} h_a + n_a \Delta - n_{11} \Delta + n_a \Delta_2 = n_a h_a.$$

Отсюда

$$\Delta_2 = \frac{h_a (n_a - n_{12}) - \Delta (n_a - n_{11})}{n_a}, \quad (2.9)$$

где величины n_{11} и n_{12} определяются в зависимости от числа линий резания: при чётном количестве линий резания $n_{11} = n_{12} = n_l / 2$, а при нечётном количестве — $n_{11} = (n_l + 1) / 2$ и $n_{12} = (n_l - 1) / 2$.

Таким образом, исследуемые схемы раскладки, подразделяются на два типа по характеру расположения алмазов первого и последнего радиальных рядов сектора: I тип – алмазы находятся на разных линиях резания; II тип – алмазы находятся на одних линиях резания (рис. 2.7).

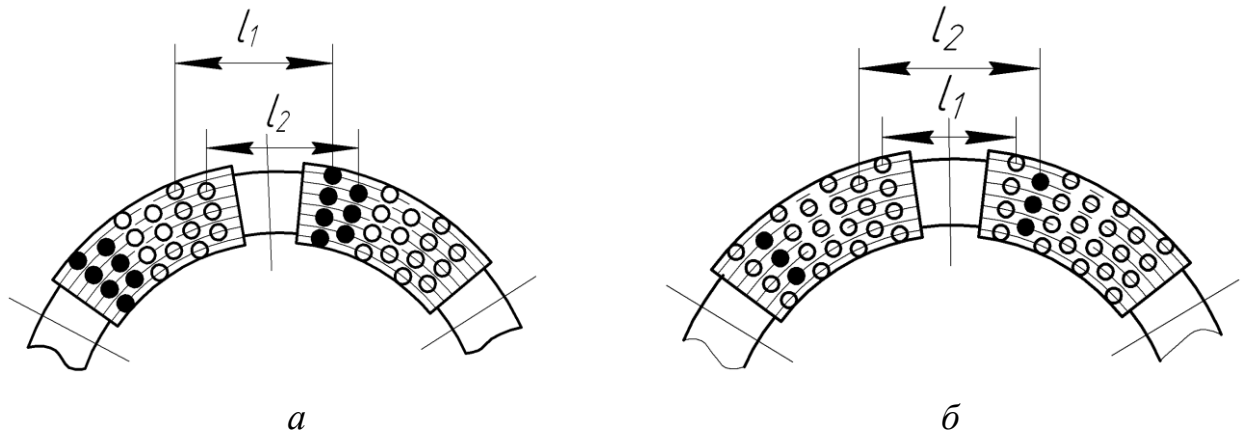


Рисунок 2.7 – Схема размещения алмазов в матрице:

a – вид торца коронки с неравным количеством алмазов в первом и последнем радиальных рядах; *б* – вид торца с одинаковым количеством алмазов; ● – наиболее заглубленные в породе алмазы в секторе

Наиболее нагруженными являются алмазы первого рабочего ряда сектора.

Максимальная толщина слоя породы, срезанного алмазом, может значительно превышать величину внедрения алмаза в породу при статическом вдавливании при этом, чем меньше алмазов в первом рабочем ряду, тем больше это превышение [94].

От того, какой тип раскладки выбран в конструкции коронки, будет зависеть распределение нагрузки в коронке в процессе бурения скважины.

Учитывая различную толщину слоя породы, срезаемую алмазами, можно предположить, что коронки I и II типа раскладки будут иметь неодинаковую механическую скорость бурения [93].

Снизить сопротивление породы, действующее на алмазы первого рабочего ряда, возможно с изменением раскладки алмазов на торце сектора.

Рассмотрим случай, когда в первом рабочем ряду используются более крупные алмазы (рисунок 2.8). Тогда глубина внедрения алмазов в этом случае h_{a1} может быть найдена из условия:

$$\pi R_1 h_{a1} n_1 + \pi R h_{a1} (n_a - n_1) = \pi R h_a n_a, \quad (2.10)$$

где R_1 – радиус алмазов, находящихся в первом и втором радиальных рядах ($R_1 > R$); R – радиус алмазов последующих рядов.

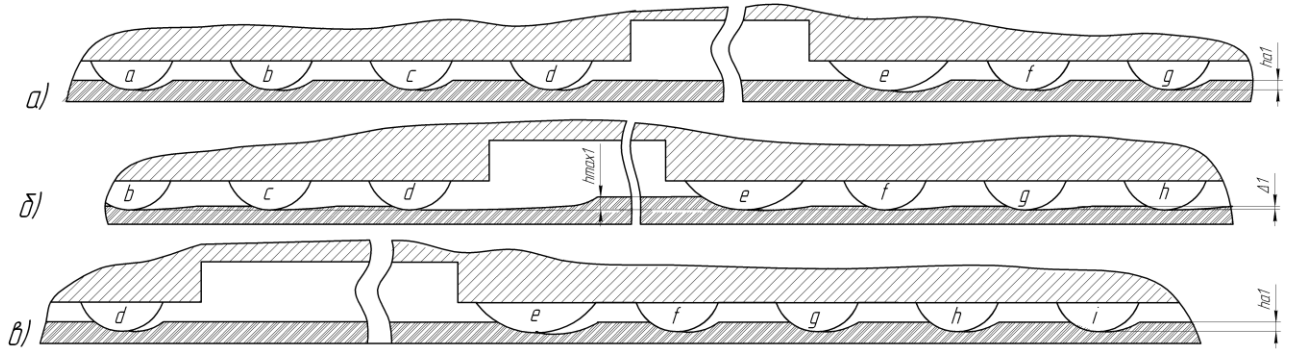


Рисунок 2.8 – Схема взаимодействия алмазов с горной породой в случае, если в первом рабочем ряду используются алмазы большего диаметра

Преобразуя, получим:

$$h_{a1} = h_a \frac{n_a}{n_a + n_1 (R_1/R - 1)} \quad (2.11)$$

$$h_{a1} = h_a \frac{n_a}{n_a + n_1 (k_R - 1)} \quad (2.12)$$

$$h_{a1} = \frac{h_a}{1 + k_n (k_R - 1)} \quad (2.13)$$

$$h_{a1} = h_a / k_h \quad (2.14)$$

где $k_R = R_1/R$

$$k_h = 1 + k_n (k_R - 1)$$

При движении коронки наступит момент, когда силы сопротивления, действующие на алмазы, следующие за первым рабочим рядом, уменьшатся (рисунок 2.8 б). Под действием осевой нагрузки произойдет углубка всех алмазов на величину Δ_1 . Из условия неизменности площади внедрения алмазов имеем:

$$\pi R_1 (h_{a1} + \Delta_1) n_1 + \pi R \Delta_1 (n_a - n_1) = \pi R n_a h_a.$$

Отсюда

$$\Delta_1 = h_a \frac{n_a - n_1 k_R k_h}{n_a + n_1 (k_R - 1)}. \quad (2.15)$$

Также, как и в рассмотренном ранее случае, алмазы первого и второго радиальных рядов секторов коронки внедрятся в породу на глубину $h_{\max 1}$ (рисунок 2.8 б):

$$h_{\max 1} = h_{a1} + \Delta_1 = h_a k_h + h_a \frac{n_a - n_1 k_R k_h}{n_a + n_1 (k_R - 1)} = h_a \left(k_h + \frac{n_a - n_1 k_R k_h}{n_a + n_1 (k_R - 1)} \right) \text{ или}$$

$$h_{\max 1} = h_a \frac{2n_a - n_1 k_R k_h}{n_a + n_1 (k_R - 1)} \quad (2.16)$$

В формулах (2.15) и (2.16) $k_R > 1$ и $k_h > 1$. Следовательно, глубина внедрения в породу алмазов первого рабочего ряда будет меньше, чем при использовании одинаковых алмазов. Кроме того, более крупные алмазы при прочих равных условиях будут более прочными, что позволяет оптимизировать раскладку алмазов с точки зрения действующих на них нагрузок.

Следует заметить, что при $k_R = 1$ и $k_h = 1$ формулы (2.15) и (2.16) преобразуются в соотношения (2.7) и (2.8) соответственно.

Рассмотрим второй случай, когда алмазы первого рабочего ряда имеют меньший выпуск из матрицы по сравнению с остальными на величину x (рисунок 2.9).

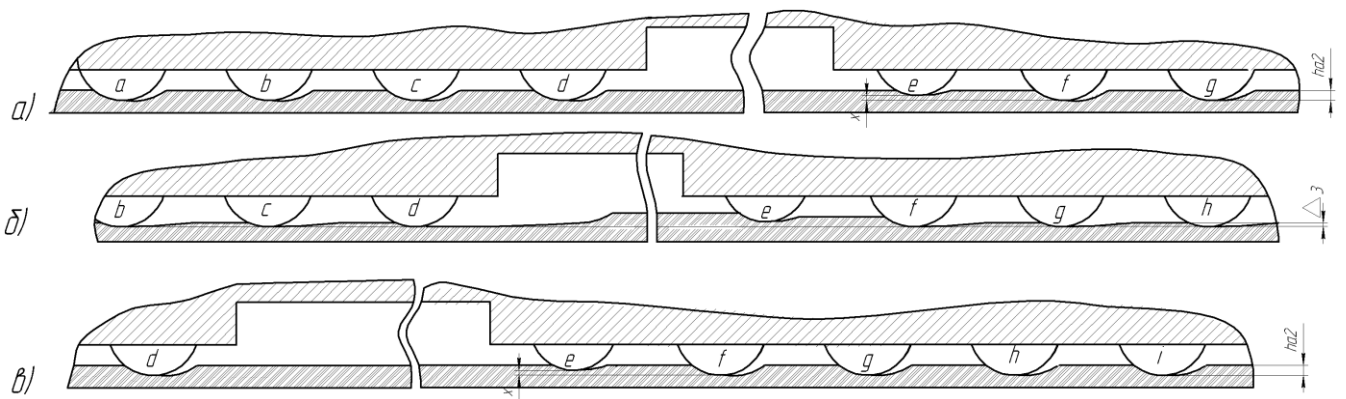


Рисунок 2.9 – Схема взаимодействия алмазов с горной породой при использовании в первом рабочем ряду сектора алмазов с меньшим выпуском

Тогда глубина внедрения алмазов h_{a2} может быть найдена из условия:

$$\pi R(h_{a2} - x)n_1 + \pi R h_{a2}(n_a - n_1) = \pi R h_a n_a. \quad (2.17)$$

Преобразуя, получим:

$$h_{a2} = h_a + \frac{n_1}{n_a} x = h_a + k_n x. \quad (2.18)$$

Когда коронка провернётся таким образом, что алмазы второго и следующих рабочих рядов окажутся на месте предыдущих рядов, то сопротивление алмазам третьего и последующих рабочих рядов резко уменьшится. Поэтому под действием осевой нагрузки произойдет дополнительная углубка всех алмазов на величину Δ_3 . В результате алмазы второго рабочего ряда углубятся на величину $x + \Delta_3$, в то время как алмазы первого рабочего ряда будут иметь углубку равную $h_{a2} - x + \Delta_3$. Величину Δ_3 также можно найти из условия неизменности площади внедрения алмазов:

$$\pi R(h_{a2} - x + \Delta_3)n_1 + \pi R(x + \Delta_3)n_2 + \pi R\Delta_3(n_a - n_1 - n_2) = \pi R h_a n_a,$$

где n_2 – количество алмазов во втором рабочем ряду.

Отсюда

$$\Delta_3 = \frac{h_a n_a - n_1 h_{a2} + n_1 x - n_2 x}{n_a}. \quad (2.19)$$

Учитывая, что $n_1 = n_2$ получим:

$$\Delta_3 = \frac{h_a n_a - n_1 h_{a2}}{n_a}. \quad (2.20)$$

или

$$\Delta_3 = h_a - \frac{n_1}{n_a} h_{a2} = h_a - k_n h_{a2}. \quad (2.21)$$

По полученным формулам были произведены расчёты для одинаковых коронок с алмазами крупностью 32 шт/карат (1,5 мм в диаметре). Более крупные алмазы первого рабочего ряда принимались диаметром 1,8 мм ($R_I=0,0009$; $k_R=1,2$). Величина x условно принималась в пределах 0,17-0,33 мм. Результаты расчётов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчёта глубины внедрения алмазов в породу для модифицированных раскладок алмазов

| Диаметр коронки, мм | Количество секторов коронки | Количество алмазов в секторе | Количество алмазов в рабочем ряду, n_1 | Категория пород по буримости | Нагрузка на алмаз P_a , Н | $h_{max1}, 10^{-5}$ м (рис. 2.8) | $x, 10^{-5}$ м (рис. 2.9) | $h_{a2}, 10^{-5}$ м (рис. 2.9) | Δ_3 (рис. 2.9) |
|---------------------|-----------------------------|------------------------------|--|------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| 59 | 6 | 25 | 7 | VI | 33,3 | 1,62 | 0,33 | 1,11 | 0,7 |
| | | | | IX | 53,3 | 0,95 | 0,2 | 0,65 | 0,41 |
| 76 | 8 | 28 | 6 | VI | 26 | 1,3 | 0,27 | 0,89 | 0,62 |
| | | | | IX | 53,6 | 0,95 | 0,2 | 0,65 | 0,48 |
| 93 | 10 | 32 | 8 | VI | 25 | 1,21 | 0,25 | 0,83 | 0,55 |
| | | | | IX | 46,8 | 0,83 | 0,17 | 0,57 | 0,38 |

Результаты расчёта показывают, что максимальная углубка алмазов первого, а для последнего случая, и второго, рабочих рядов для модифицированных коронок будет меньше (не менее чем на 30%), чем для исходной коронки. Таким образом, изменение раскладки алмазов даже в первых радиальных рядах секторов коронки, может привести к изменению качества работы коронки в целом.

2.1.2 Определение влияния конструктивных параметров алмазной однослойной коронки на характер взаимодействия алмазов с горной породой на забое скважины

Для детальной оценки влияния раскладки алмазов на ожидаемую механическую скорость бурения и толщину слоя породы, срезаемую конкретным алмазом, разработана расчётная модель, позволяющая определять углубку коронки при её движении по забою, а также силы сопротивления породы, действующие на каждый алмаз, в зависимости от раскладки алмазов и её конструктивных параметров.

Суть модели состоит в следующем. Считаем, что на коронку действует осевая нагрузка P_{oc} . В исходном (статическом) положении эта нагрузка 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 (рисунок 2.10). Тогда толщина слоя породы, срезанная алмазом в конкретной точке забоя при определенном положении коронки, будет равна (рисунок 2.10 б):

$$h_i = z - y_i, \quad (2.22)$$

где y_i – координата поверхности забоя перед конкретным алмазом.

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

$$\sum_{i=1}^{n_a} h_i = n_k h_a, \quad (2.23)$$

где значение h_a может рассчитываться по уточненным Н. И. Корниловым формулам с учетом коэффициентов разрушения горной породы (k_p) и формы алмаза (k_a) [2].

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

$$\sum_{i=1}^{n_a} (z - y_i + \Delta) = n_k h_a, \quad (2.24)$$

где Δ – приращение углубки коронки на каждом акте внедрения в породу.

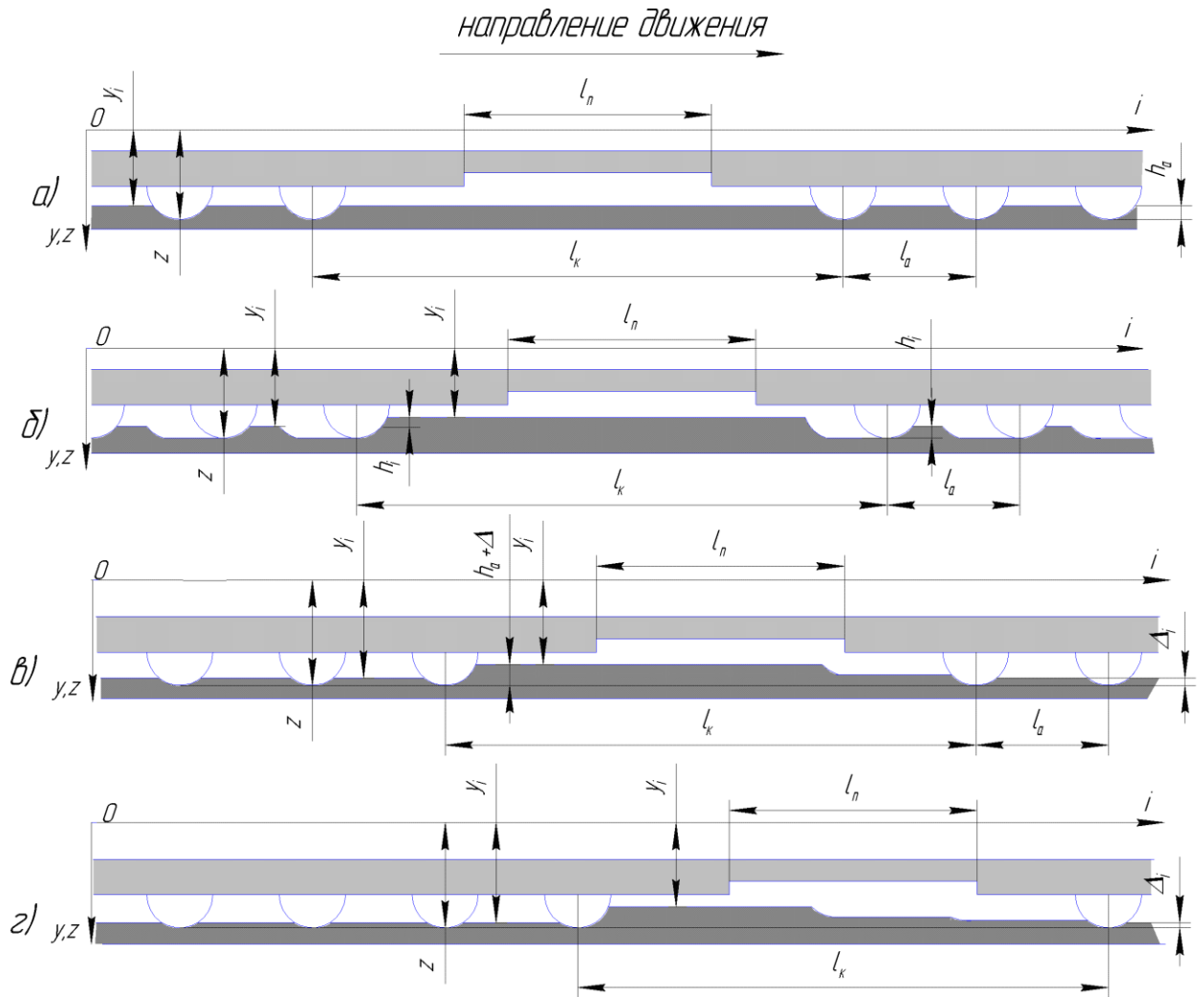


Рисунок 2.10 – Схема взаимодействия алмазов коронки одной линии резания с забоем скважины (на основе разработанной схемы ВИТР). Углубка алмазов в породе: а) первоначальная; б) при прохождении меньшего расстояния, чем расстояние между алмазами на одной линии резания (l_a); в) после прохождения расстояния l_a ; г) после прохождения расстояния $2l_a$

Из уравнения (2.24) можно найти значение Δ , соответствующее определенному положению коронки на забое.

$$\Delta = \frac{n_k h_a - \sum_{i=1}^{n_k} (z - y_i)}{n_k} = h_a - \frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^{n_k} (z - y_i). \quad (2.25)$$

Моделируя движение коронки на забое, для каждого момента времени можно получить значение приращения её углубки Δ , координату нижнего торца коронки z и координаты поверхности забоя $y(\varphi)$ в любой точке. Для определения этих параметров, используя соотношение (2.25), был разработан алгоритм и

составлена программа, позволяющая определять значение толщины слоя породы h_i , срезаемого различными алмазами в конкретной точке забоя при вращении коронки, и отображать графически (рисунок 2.11) траекторию движения алмазов по забою. Руководство к пользованию и основные принципы действия программы представлены в приложении А.

Это дает возможность оценить механическую скорость бурения в зависимости от конструктивных особенностей коронки.

Таким образом исследовано большое количество конструкций однослойных алмазных коронок. Габариты исследуемых коронок были приняты согласно геологоразведочного сортамента. Изменению подвергались лишь количество секторов и радиальных рядов в одном секторе. Некоторые результаты исследования взаимодействия алмазов с породой в процессе бурения и конструктивные особенности исследуемых коронок приведены в таблице 2.

Моделирование показывает, что *толщина снимаемого слоя породы достигает максимума при неустановившемся режиме разрушения (в начале работы), а затем снижается до практически постоянной величины (если не учитывать притупление алмазных резцов).*

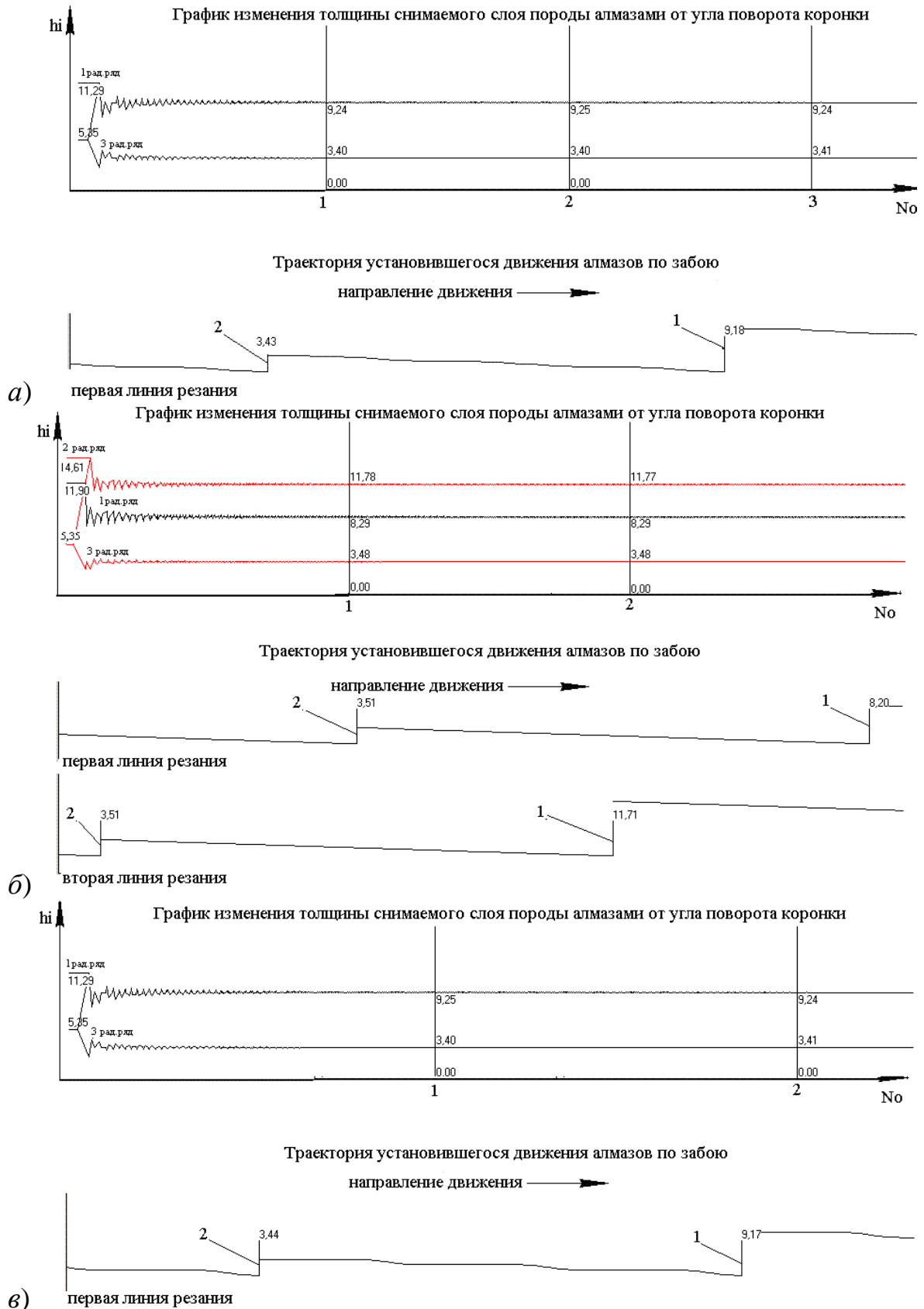


Рисунок 2.11 – Пример результатов моделирования движения алмазов по забою скважины: а) коронки $\varnothing 59$ мм с раскладкой I типа; б) коронки $\varnothing 76$ мм с раскладкой II типа; в) коронки $\varnothing 93$ мм с раскладкой I типа (1 – первый алмаз линии резания сектора; 2 – второй алмаз линии резания сектора; N_0 – номер оборота)

Таблица 2 – Некоторые результаты исследования взаимодействия алмазов различных конструкций коронок с породой в процессе бурения

| Конструктивные особенности коронки | | | | | $(l_c+l_n)/l_a$ | К | l_a мм | l_c/l_a | l_c/l_n | l_n/l_a | h_{max} мм 10^{-6} | Толщина слоя породы, срезаемого алмазом соответствующего радиального ряда (установившееся движение), мм | | | | | | h_{max}/h_a | | | h/h_a | | | H_o/H_a | | |
|------------------------------------|-----|--------------|--------------|------------------|-----------------|-----|-------------|-----------|-----------|-----------|------------------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|------|------|---------|--------------|----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Диаметр мм | тип | К-во сект | К-во алм. | К-во пр в сек | | | | | | | | h_a | h_1 | h_2 | h_3 | h_4 | h_5 | 1 п. | 2 п. | 1 п. | 2 п. | 3 и сл. п | h_1/h_2 (h_2/h_1) | | h_1/h_3 | h_2/h_3 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 59 | I | 8 | 168 | 6 | 0,75 | 17 | 4,8 | 2,66 | 3 | 1,16 | 0,0142 | 0,0067 | 0,009 | 0,009 | 0,0043 | 0,0043 | 0,0043 | 2,11 | 1,71 | 1,71 | 0,64 | 1 | 2,09 | 2,09 | 24 | |
| | | 12 | 168 | 4 | 0,5 | 10 | 3 | 4 | 1 | 1,5 | 0,0125 | 0,0067 | 0,01 | 0,01 | 0,0026 | 0,0026 | - | 1,87 | 1,6 | 1,6 | 0,4 | 1 | 4 | 4 | 24 | |
| | | 24 | 168 | 2 | 0,75 | 5 | - | 1 | 0,03 | 0,25 | 0,0067 | 0,0067 | 0,0067 | - | - | - | 1 | 1 | 1 | - | 1 | - | - | 24 | | |
| | | 24 | 168 | 2 | 0,75 | 5 | - | 1 | 0,03 | 0,25 | 0,0169 | 0,0169 | 0,0169 | - | - | - | 1 | 1 | 1 | - | 1 | - | - | 24 | | |
| | II | 6 | 150 | 7 | 0,75 | 20 | 5,6 | 2,33 | 1,97 | 1,33 | 0,0182 | 0,0067 | 0,01 | 0,014 | 0,0043 | 0,0043 | 0,0043 | 2,2 | 2,73 | 1,53 | 2,18 | 0,65 | (1,4) | 2,33 | 3,25 | 21 |
| | | 10 | 180 | 5 | 0,5 | 13 | 3 | 4 | 1 | 3 | 0,0167 | 0,0067 | 0,0111 | 0,013 | 0,0027 | 0,0027 | 0,0027 | 2,17 | 2,5 | 1,66 | 2,08 | 0,41 | (1,18) | 4,07 | 4,81 | 25 |
| 76 | I | 14 | 224 | 4 | 0,75 | 12 | 5,01 | 2,33 | 3 | 0,83 | 0,0117 | 0,0067 | 0,0093 | 0,0093 | 0,0039 | 0,0039 | - | 1,75 | 1,39 | 1,39 | 0,59 | 1 | 2,38 | 2,38 | 28 | |
| | | 26 | 208 | 2 | 0,75 | 6 | - | 1 | 2,99 | 0,25 | 0,0067 | 0,0067 | 0,0067 | - | - | - | 1 | 1 | 1 | - | 1 | - | - | 26 | | |
| | | 28 | 224 | 2 | 0,75 | 5,5 | - | 1 | 3 | 0,9 | 0,0126 | 0,0126 | 0,0126 | - | - | - | 1 | 1 | 1 | - | 1 | - | - | 28 | | |
| | II | 8 | 224 | 7 | 0,75 | 20 | 3,98 | 4,35 | 3 | 1,33 | - | 0,0126 | 0,0261 | 0,0322 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | - | 2,07 | 2,55 | 0,47 | (1,23) | 4,35 | 5,36 | | |
| | | 8 | 224 | 7 | 0,75 | 20 | 5,5 | 2,33 | 3 | 1,33 | 0,0182 | 0,0067 | 0,0102 | 0,0146 | 0,0043 | 0,0043 | 0,0043 | 2,22 | 2,73 | 1,53 | 2,18 | 0,65 | (1,43) | 2,37 | 3,39 | 28 |
| | | 10 | 200 | 5 | 0,6 | 15 | 4,68 | 3 | 1,5 | 2 | 0,0158 | 0,0067 | 0,0099 | 0,0134 | 0,0033 | 0,0033 | 0,0033 | 1,96 | 2,37 | 1,49 | 2 | 0,5 | (1,34) | 2,9 | 4,01 | 25 |
| 93 | I | 8 | 288 | 8 | 0,58 | 24 | 4,6 | 4 | 1,4 | 2,5 | 0,0174 | 0,0067 | 0,0134 | 0,0134 | 0,0032 | 0,0032 | 0,0032 | 2,6 | 2 | 2 | 0,49 | 1 | 4,18 | 4,18 | 24 | |
| | | 12 | 324 | 6 | 0,75 | 15 | 5,13 | 2,66 | 3 | 1,16 | - | 0,0087 | 0,022 | 0,022 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | - | 1,72 | 1,72 | 0,63 | 1 | 2,72 | 2,72 | 36 | |
| | | 12 | 324 | 6 | 0,75 | 16 | 5,13 | 2,66 | 3 | 1,16 | 0,0141 | 0,0067 | 0,0114 | 0,0114 | 0,0042 | 0,0042 | 0,0042 | 2,11 | 1,71 | 1,71 | 0,64 | 1 | 2,7 | 2,7 | 36 | |
| | | 12 | 324 | 6 | 0,5 | 17 | 3,4 | 5 | 1 | 3,5 | 0,0174 | 0,0067 | 0,1433 | 0,1433 | 0,0028 | 0,0028 | 0,0028 | 2,6 | 2,14 | 2,14 | 0,42 | 1 | 5 | 5 | 36 | |
| | | 18 | 324 | 4 | 0,75 | 11 | 4,79 | 2,33 | 3 | 0,83 | 0,0093 | 0,00534 | 0,0074 | 0,0074 | 0,0031 | 0,0031 | - | 1,74 | 1,38 | 1,38 | 0,58 | 1 | 2,38 | 2,38 | 36 | |
| | | 12 | 216 | 4 | 0,63 | 10 | 6,11 | 2,92 | 1,7 | 1,45 | 0,0093 | 0,00534 | 0,008 | 0,008 | 0,0026 | 0,0026 | - | 1,7 | 1,49 | 1,49 | 0,48 | 1 | 3,07 | 3,07 | 24 | |
| | | 38 | 342 | 2 | 0,75 | 5 | - | 1 | - | - | 0,0082 | 0,00827 | 0,0082 | 0,0082 | - | - | - | 1 | 1 | 1 | - | 1 | - | - | 38 | |
| | | 36 | 324 | 2 | 0,75 | 5 | - | 1 | - | - | 0,0087 | 0,0087 | 0,0087 | 0,0087 | - | - | - | 1 | 1 | 1 | - | 1 | - | - | 36 | |
| | II | 10 | 320 | 7 | 0,75 | 20 | 5,4 | 2,33 | 2,99 | 1,33 | 0,024 | 0,0088 | 0,0135 | 0,019 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 2,22 | 2,73 | 1,53 | 2,1 | 0,65 | (1,4) | 2,33 | 3,33 | 35 |
| | | 14 | 322 | 5 | 0,75 | 14 | 5,13 | 2 | 3 | 1 | 0,014 | 0,0067 | 0,0083 | 0,0125 | 0,0041 | 0,0041 | 0,0041 | 1,6 | 2,16 | 1,25 | 1,87 | 0,62 | (1,5) | 2 | 3 | 36 |
| | | 28 | 392 | 3 | 0,75 | 10 | 3,84 | - | - | - | 0,0087 | 0,0113 | 0,013 | 0,0017 | - | - | - | - | 1,3 | 1,5 | 0,195 | (1,18) | 6,64 | 7,64 | 42 | |

Примечание. l_c, l_n – длина по наружной окружности коронки соответственно сектора и промывочного окна; $K=(l_c+l_n)/d_a$; $H_o, H_o/h_a$ – соответственно, углубка за оборот и относительная углубка за оборот.

На характер работы коронки с раскладкой алмазов I типа влияет отношение расстояния в линии резания между первыми алмазами сектора и последними алмазами впередиидущего сектора (l_k) к расстоянию между алмазами внутри сектора (l_a) (рисунок 2.12). Выразим значение этого отношения через коэффициент k ($k=l_k/l_a$) [87].

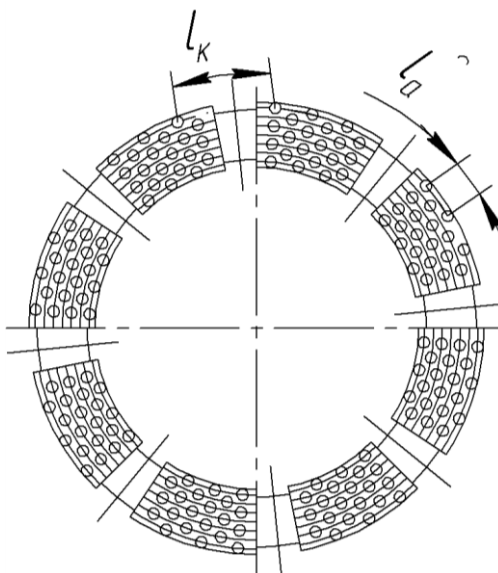


Рисунок 2.12 – Схема торца алмазной коронки

Согласно приведенной модели взаимодействия алмазов с горной породой, если k – целое число, траектория движения коронки по забою приобретает выраженный *ступенчатый характер* (рисунок 2.11 б), если k – дробное число (что наблюдается в большинстве случаев), то траектория движения приобретает *винтовой характер* (рисунок 2.11 а, в), что подтверждается исследованиями, произведенными учеными ВИТР [59].

Для коронок с раскладкой алмазов I типа при неустановившемся режиме работы, каждая i -тая величина углубки в цикле разрушения при прохождении расстояния l_k может быть найдена по формуле:

$$\Delta_i = h_a(1 - k_n)^i, \quad (2.26)$$

где h_a – углубка алмазов в породе при статическом вдавливании; $k_n = n_1/n_a$, n_1 – количество алмазов в первом рабочем ряду сектора, n_a – количество алмазов в секторе; i – номер углубки в цикле.

Максимальная толщина слоя породы, срезаемая алмазом (h_{max}) зависит от количества углубок, совершенных коронкой за угол, при котором алмазы в линии резания переместятся на расстояние l_k . Т. е. h_{max} можно найти из выражения:

$$h_{max} = h_a + \sum \Delta_i, \quad (2.27)$$

Подставив выражение (2.26) в (2.27) получим, что максимальная толщина слоя породы, срезаемая алмазом для коронок с раскладкой I типа равна:

$$h_{max} = h_a \left[1 + \sum_{i=1}^m (1 - \kappa_n)^i \right], \quad (2.28)$$

где $m = (l_k / l_a) - 1$, для целого значения k , если значение k дробное, то m принимается равной целой части результата (без округления).

В процессе бурения зона разрушения горной породы алмазом будет значительно больше глубины его внедрения. В процессе бурения на работу алмазного резца оказывают действие осевые и тангенциальные усилия, в результате воздействия которых в горной породе создается напряженно-деформированное состояние. В зависимости от линейной скорости перемещения алмаза и коэффициента трения его о породу, под алмазным резцом образуется ядро сжатия (рисунок 2.13 [84]). Трещина отрыва породы формируется от вершины этого ядра в направлении поверхности забоя. От формы и расположения ядра сжатия во многом будет зависеть эффективность работы породоразрушающего инструмента [84].

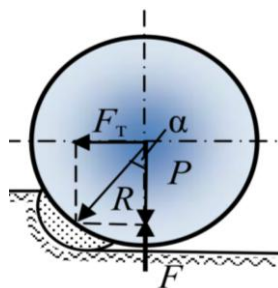


Рисунок 2.13 – Схема взаимодействия с породой овалитованного алмазного зерна

Согласно работе [59], при винтовой траектории движения алмазов по забою скважины под углом α (рисунок 2.14), алмазы 2 будут снимать максимально возможную толщину слоя породы (h_{max}), равную:

$$h_{max} = h_{min} \frac{L}{l} \quad (2.29)$$

где h_{min} – толщина слоя породы срезаемая алмазами 1, 3, 4 (рисунок 2.14).

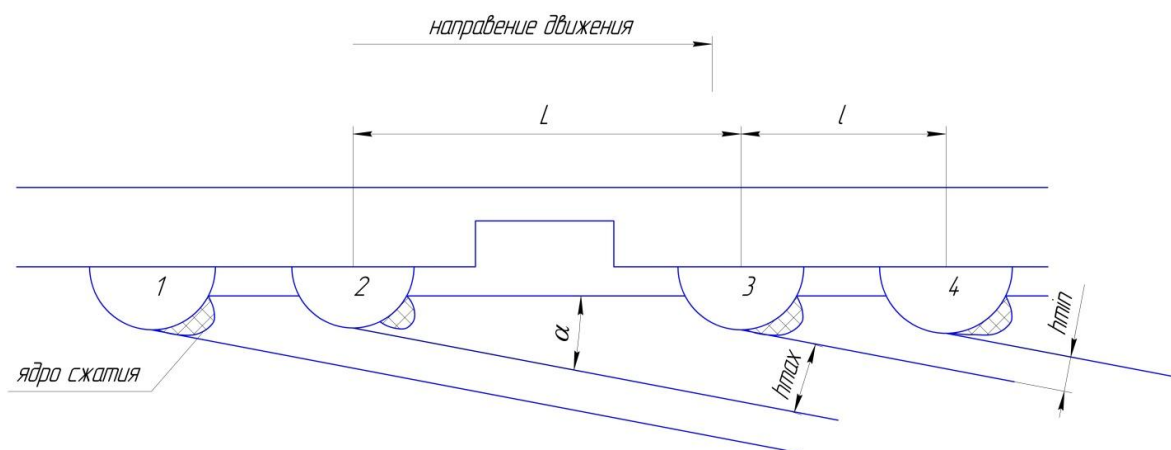


Рисунок 2.14 – Схема взаимодействия алмазов одной линии резания при винтовой траектории движения

Согласно расчетной схеме (рисунок 2.15) и теории [59, стр.22], алмазом 2 снимается слой породы, зависящий от значения расстояния от алмаза 2 до впередиидущего алмаза 3 (L) и длины пути (S), пройденного этим алмазом.

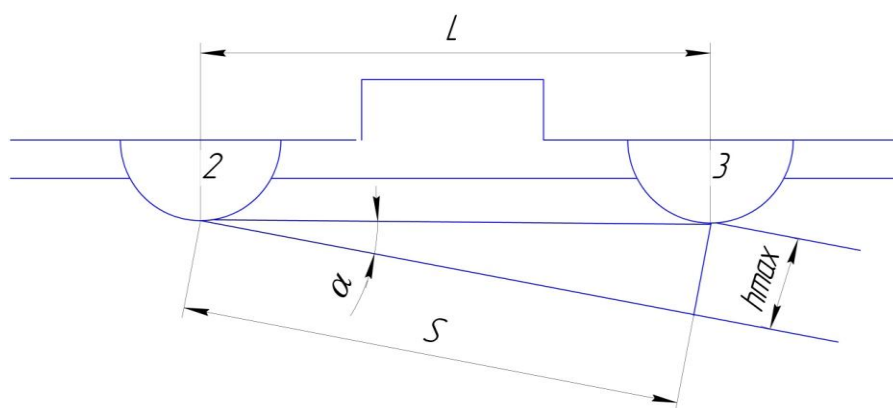


Рисунок 2.15 – Схема взаимодействия крайнего алмаза сектора с горной породой: α – угол наклона винтовой линии; S – длина пути алмаза 2

За один оборот алмазом 2 снимется толщина слоя породы равная:

$$h_{\max} = \sqrt{L^2 - \left(\frac{\pi(R_k - r_k)}{\cos \alpha}\right)^2}, \quad (2.30)$$

где R_k , r_k – соответственно наружный и внутренний радиусы коронки по резцам.

Приведенные модели взаимодействия алмазных монокристаллов с горной породой в процессе бурения (рисунки 2.14, 2.15) показывают, что при неравномерном расположении резцов по линии резания наибольшая нагрузка приходится на крайние по набегающей части алмазные резцы. Это связано с тем, что за один оборот такие резцы снимают наибольший слой породы. Толщина слоя породы, снимаемого крайними алмазами зависит от расстояния до следующего в линии резания алмаза, угла наклона траектории его движения и осевой нагрузки.

Таким образом, крайние по набегающей части алмазные резцы будут испытывать большее сопротивление горной породы чем остальные алмазы коронки, в связи с чем ядро сжатия под такими алмазами будет смещено вверх. При чрезмерном увеличении осевой нагрузки, тангенциальное усилие, действующее на крайние алмазные резцы будут значительно больше, чем, действующие на остальные резцы бурового инструмента. Такое повышение сопротивления может привести к чрезмерному смещению ядра сжатия вверх и как следствие снижению глубины борозды разрушения крайними алмазами.

При изучении взаимодействия с забоем коронок с раскладкой II типа необходимо учитывать взаимодействие алмазов двух смежных линий резания. В этом случае расстояние l_k для двух смежных линий резания различное: большее значение (l_{k2}) для алмазов второго радиального ряда и меньшее – для первого (l_{k1}) ($l_{k1}=l_1$, $l_{k2}=l_2$ рисунок 2.7 б). Пока алмазы проходят расстояние l_1 , то i -тая величина углубки в цикле разрушения также определяется по формуле (2.26), а суммарная углубка (Δ_n) на отрезке l_1-l_2 определяется в зависимости от величины соотношения l_{k2}/l_a .

Полученные величины Δ_n и рассчитанные значения h_{max} для коронок с раскладкой II типа приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Определение величин Δ_n и h_{max} для коронки с раскладкой II типа

| Величина $l_{\kappa 2}/l_a$ | Δ_n | h_{max} |
|--------------------------------|--|--|
| $l_{\kappa 2}/l_a \leq 2$ | $\Delta_n = h_a \left(1 - \frac{n_1 + n_{12}}{n_a} + \kappa_n^2\right)$ | $h_{max} = h_a \left(3 - \frac{2n_1 + n_{12}}{n_a} + \kappa_n^2\right)$ |
| $2 < l_{\kappa 2}/l_a \leq 3$ | $\Delta_n = h_a \left(1 - \frac{2n_1 + n_{12}}{n_a} + 3\kappa_n^2 - \kappa_n^3\right)$ | $h_{max} = h_a \left(4 - \frac{5n_1 + n_{12}}{n_a} + 4\kappa_n^2 - \kappa_n^3\right)$ |
| $3 < l_{\kappa 2}/l_a \leq 4$ | $\Delta_n = h_a \left(1 - \frac{3n_1 + n_{12}}{n_a} + 6\kappa_n^2 - 4\kappa_n^3 + \kappa_n^4\right)$ | $h_{max} = h_a \left(5 - \frac{9n_1 + n_{12}}{n_a} + 10\kappa_n^2 - 5\kappa_n^3 - \kappa_n^4\right)$ |

С использованием представленной модели была проведена сравнительная оценка однослойных коронок диаметром 59, 76 и 93 мм с различными раскладками алмазов по радиальным линиям, геометрические параметры которых определялись по методике [4] с учётом ограничения длины сектора (l_c) 15–20 диаметрами алмаза (d_a) для исключения зашламования забоя. Рассматривались коронки, раскладка алмазов в которых определялась с учетом возможности различного соотношения длины сектора и промывочной канавки (l_n), т. е. варьировались величины $l_c/(l_c+l_n)$ и $K=(l_c+l_n)/d_a$. При этом рассматривались коронки, в которых расстояние в одной линии резания между первыми алмазами сектора и последними алмазами предыдущего сектора (l_k) было кратно или не кратно расстоянию между алмазами в пределах сектора (l_a).

Результаты обработки данных моделирования и полученная на этой основе сравнительная характеристика коронок с различными конструктивными параметрами приведены в таблице 4. При моделировании осевая нагрузка на коронки принималась таким образом, чтобы нагрузка на единичный алмаз была всегда одинаковой (для приведенного в таблице 4 случая она равна $P_a=47,6$ Н).

Таблица 4 – Результаты обработки данных, полученных при моделировании

| Диаметр коронки, мм | Тип схемы расклевки | $l_c/(l_c+l_n)$ | К | Кол-во секторов коронки | Кол-во алмазов в линиях резания | l_k/l_a | l_c/l_n | l_k/l_a | h_{max}/h_a | | h_i/h_a | | | h_i/h_3 | | H_o/h_a |
|---------------------|---------------------|-----------------|------|-------------------------|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|---------------|------------|------------|------------|--------------------|------------|------------|-----------|
| | | | | | | | | | 1 рад. ряд | 2 рад. ряд | 1 рад. ряд | 2 рад. ряд | 3 и следующие ряды | 1 рад. ряд | 2 рад. ряд | |
| 59 | I | 0,75 | 17 | 8 | 3 | 2,66 | 3 | 1,16 | 2,11 | 1,71 | 0,64 | 2,66 | 24 | | | |
| | | 0,5 | 10 | 12 | 2 | 4 | 1 | 1,5 | 1,87 | 1,6 | 0,4 | 4 | 24 | | | |
| | | 0,75 | 5 | 24 | 1 | 1 | 0,03 | 0,25 | 1 | 1 | - | - | 24 | | | |
| | | 0,63 | 15 | 8 | 2 | 3 | 1,64 | 2,5 | 1,74 | 1,49 | 0,49 | 3 | 16 | | | |
| | II | 0,75 | 20 | 6 | 4/3 | 2,33 | 1,97 | 1,33 | 2,22 | 2,73 | 1,53 | 2,18 | 0,65 | 2,33 | 3,33 | 21 |
| | | 0,5 | 13 | 10 | 3/2 | 4 | 1 | 3 | 2,17 | 2,5 | 1,66 | 2,08 | 0,41 | 3,99 | 4,99 | 25 |
| 76 | I | 0,75 | 12 | 14 | 2 | 2,33 | 3 | 0,83 | 1,75 | 1,396 | 0,59 | 2,34 | 28 | | | |
| | | 0,75 | 6 | 26 | 1 | 1 | 2,99 | 0,25 | 1 | 1 | - | - | 26 | | | |
| | | 0,63 | 15,6 | 10 | 2 | 3 | 1,66 | 1,5 | 1,75 | 1,499 | 0,499 | 3,003 | 20 | | | |
| | II | 0,75 | 20 | 8 | 4/3 | 2,33 | 3 | 1,33 | 2,22 | 2,73 | 1,53 | 2,18 | 0,65 | 2,33 | 3,33 | 28 |
| | | 0,6 | 15 | 10 | 3/2 | 3 | 1,5 | 2 | 1,96 | 2,37 | 1,49 | 2 | 0,499 | 3 | 3,77 | 25 |
| | | 0,72 | 13,7 | 10 | 3/2 | 2 | 2,5 | 1 | 1,6 | 2,16 | 1,25 | 1,87 | 0,62 | 2 | 3 | 25 |
| 93 | I | 0,75 | 16 | 12 | 3 | 2,66 | 3 | 1,16 | 2,11 | 1,71 | 0,64 | 2,66 | 36 | | | |
| | | 0,5 | 17 | 12 | 3 | 5 | 1 | 3,5 | 2,6 | 2,14 | 0,42 | 5 | 36 | | | |
| | | 0,75 | 5 | 38 | 1 | 1 | 3 | 0,25 | 1 | 1 | - | - | 38 | | | |
| | | 0,58 | 24 | 8 | 3 | 4 | 1,4 | 2,5 | 2,6 | 2 | 0,49 | 4 | 24 | | | |
| | II | 0,75 | 20 | 10 | 4/3 | 2,33 | 2,99 | 1,33 | 2,22 | 2,73 | 1,53 | 2,18 | 0,65 | 2,33 | 3,33 | 35 |
| | | 0,75 | 14 | 14 | 3/2 | 2 | 3 | 1 | 1,6 | 2,16 | 1,25 | 1,87 | 0,62 | 2 | 3 | 36 |
| 0,67 | 24 | 8 | 4/3 | 3 | 2 | 2 | 2,22 | 2,73 | 1,64 | 2,26 | 0,61 | 2,66 | 3,66 | 28 | | |

Анализ данных таблиц 2 и 4 показывает, что нагрузка на алмазы первого рабочего ряда сектора может превышать нагрузку на последующие ряды сектора более чем в 2 раза, что зависит от соотношения $k=l_k/l_a$. Чем больше коэффициент k , тем больше будет нагружен второй радиальный ряд сектора по сравнению с алмазами третьего и последующих рядов. Согласно графику на рисунке 2.16 зависимость $h_{1(2)}/h_3$ от l_k/l_a линейная и прямопропорциональная [93].

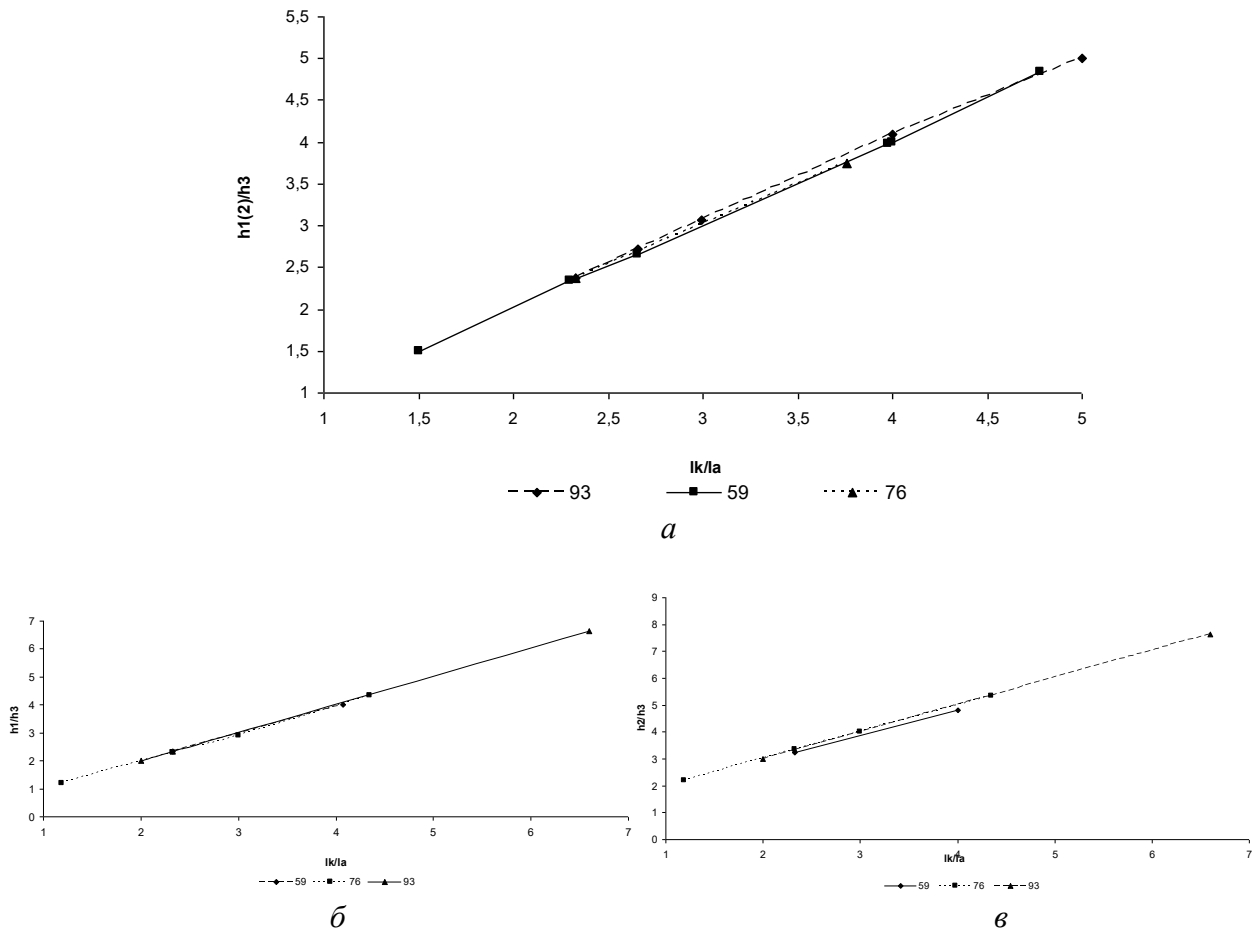


Рисунок 2.16 – График зависимости превышения нагрузки на алмазы первого (или второго) радиального ряда сектора ($h_{1(2)}$) над нагрузкой третьего (h_3) и последующих рядов сектора от отношения расстояния в линии резания между первыми алмазами сектора и последними алмазами впередиидущего сектора (l_k) к расстоянию между алмазами внутри сектора (l_a) коронок диаметром 93 мм, 59 мм и 76 мм: а – I типа раскладки; б, в – II типа раскладки

Равномерная нагрузка на все алмазы сектора наблюдается только в случае размещения в нем *одного рабочего ряда* (двух радиальных рядов, смещенных относительно друг друга так, чтобы алмазы перекрывали все линии резания). В этом случае $l_k/l_a=1$. Толщина снимаемого слоя породы любым алмазом в таких коронках всегда равна h_a ($h_a=h_{max}=h_1$). Таким образом, эти коронки имеют значительный резерв увеличения осевой нагрузки, что дает возможность существенно повысить механическую скорость бурения.

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 %).

Предложенная В.П. Цыпиным [4] коронка АКВ-93 (рисунок 1.3) относится к коронкам II типа раскладки алмазов и имеет 7 радиальных рядов в секторе. По сравнению с ней алмазная коронка с 4 радиальными рядами в секторе позволит обеспечить равномерную нагрузку на алмазы первых двух радиальных рядов, снизить превышение нагрузки на алмазы первых двух радиальных рядов сектора по сравнению с алмазами третьего и последующих рядов до 25% (таблица 5).

Таблица 5 – Результаты аналитического исследования взаимодействия алмазов коронки с породой в процессе бурения

| Количество радиальных рядов в секторе | Кол-во секторов | Всего алмазов в коронке | Расстояние м/д алм. в линии резания (l_a), мм | Относительная толщина слоя породы, срезаемая алмазами соответствующего радиального ряда | | | | h_2/h_1 | h_2/h_3 | h_1/h_3 |
|---------------------------------------|-----------------|-------------------------|---|---|-------|--------|-------|-----------|-----------|-----------|
| | | | | h_1 | h_2 | h_3 | h_4 | | | |
| 7 | 10 | 320 | 5,4 | 1,55 | 2,21 | 0,57 | 0,57 | 1,42 | 3,86 | 2,7 |
| 4 | 12 | 216 | 6,11 | 1,49 | 1,49 | 0,0026 | 0,48 | 1 | 3,08 | 3,08 |

При этом углубка за оборот для коронок с раскладкой I типа равна:

$$H_o = N_c \cdot n_L \cdot h_a, \quad (2.31)$$

где N_c – количество секторов коронки; n_L – количество алмазов на одной линии резания сектора.

Следует отметить, что формула (2.31) аналогична известной формуле для твердосплавных коронок [35]. Поэтому точный прогноз углубки за оборот и механической скорости бурения для коронок этого типа зависит от точности определения величины h_a .

Для коронки с раскладкой II типа углубка за оборот составляет:

$$H_o = N_c \cdot n_L^* \cdot h_a, \quad (2.32)$$

где n_L^* – среднее число алмазов на двух смежных линиях резания.

$$n_L^* = (n_{L1} + n_{L2}) / 2 = [n_{L1} + (n_{L1} - 1)] / 2 = n_{L1} - 0,5,$$

где n_{L1} – наибольшее количество алмазов на одной из двух смежных линий резания, n_{L2} – количество алмазов на второй из двух смежных линии резания, для этих коронок $n_{L2} = n_{L1} - 1$.

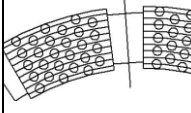
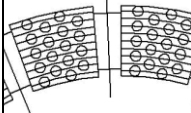
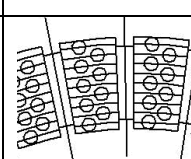
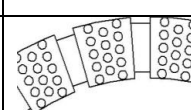
Отсюда

$$H_o = N_c \cdot (n_{L1} - 0,5) \cdot h_a \quad (2.33)$$

Для более детального исследования влияния раскладки на распределение механической нагрузки на торце сектора были выбраны коронки одного диаметра с одинаковым количеством объемных алмазов, но различным количеством секторов и радиальных рядов в них. Результаты выбора конструкции и моделирования работы на забое коронок показаны в таблице 6.

Оказалось, что при одном и том же количестве алмазов в коронке и неизменной углубке за оборот можно добиться различного распределения нагрузки на алмазы, изменяя лишь количество радиальных рядов в секторе. Причем чем меньше радиальных рядов в секторе, тем меньше перепад нагрузки на алмазы (рисунок 2.17).

Таблица 6 – 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, срезанного соответствующим радиальным рядом мм | | | Углубка за оборот, мм | h_{max}/h_2 | h_{max}/h_3 |
|-------|---|--------------------------------|-----------------|---------------|------------|------------|---|--------|--------|-----------------------|---------------|---------------|
| | | | | | | | 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 | - |
| 4 |  | 3 | 28 | 392 | 3,84 | 0,0087 | 0,0113 | 0,013 | 0,0017 | 0,3655 | 1,15 | 7,6 |

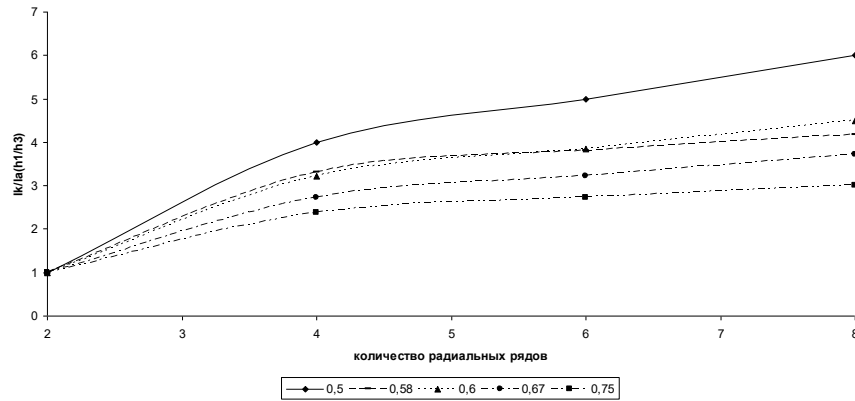


Рисунок 2.17 – График зависимости $h_{1(2)}/h_3$ от количества радиальных рядов в секторе для конструкций коронок, соотношение $l_c/(l_c+l_n)$ которых равно 0,5; 0,58; 0,6 и 0,75

Вышеописанные исследования проведены для коронок, в которых алмазы расположены одинаково во всех секторах. Расположение алмазов в коронке может иметь смешанный характер, т.е. комбинацию секторов I и II типа раскладки алмазов (таблица 7 №п/п 3, 6) или с различным количеством алмазов в смежных секторах (таблица 7 №п/п 5).

Для исследования данной возможности выбраны коронки с комбинацией секторов:

- различной конструкции и с равным количеством алмазов в каждом;
- с количеством алмазов в смежных секторах отличающихся на 1.

Учитывая перспективность конструкции особому вниманию подверглись конструкции коронок с двумя радиальными рядами в секторе. Возможные раскладки алмазов в секторах с двумя радиальными рядами приведены на рисунке 2.18.

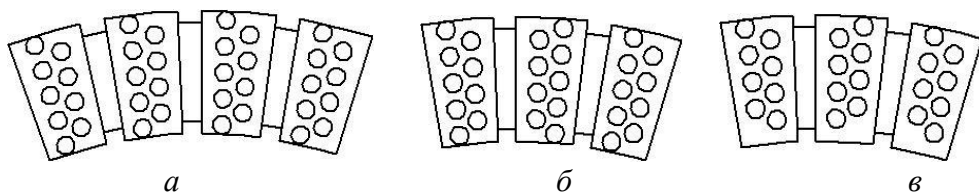


Рисунок 2.18 – Варианты раскладки алмазов в однослойной коронке с двумя радиальными рядами в секторе

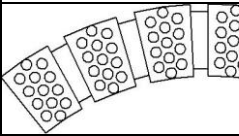
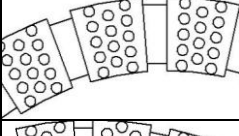
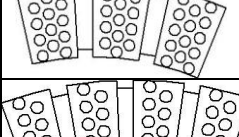
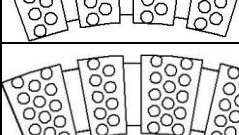
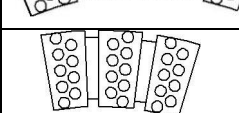

При раскладке алмазов по схемам, показанным на рисунке 2.18 а и 2.18 б, общее количество алмазов и геометрические параметры коронки остаются неизменными. При раскладке, показанной на рисунке 2.18 в, уменьшается

количество алмазов и, самое главное, количество линий резания на 1, что снижает работоспособную площадь и подходит не для всех типоразмеров геологоразведочных коронок. Учитывая данный недостаток, конструкция коронки, приведенная на рисунке 2.18 в, в дальнейших исследованиях не рассматривалась.

Некоторые полученные конструкции коронок с комбинацией секторов приведены в таблицах 7, 8.

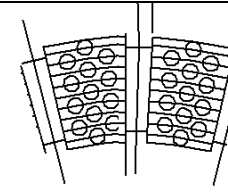
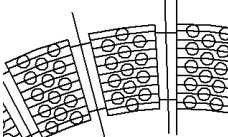
Для детального исследования возможности применения приведенных вариантов раскладки алмазов в коронках при бурении геологоразведочных скважин было проведено компьютерное моделирование работы коронок на забое. Для моделирования были подобраны коронки одного диаметра и равным количеством алмазов в коронке, одинаковые режимы и условия бурения. Результаты моделирования (таблицы 7, 8) показали, что комбинация секторов I и II типа раскладки позволяет исключить большое превышение нагрузки на алмазы, срезающие наибольший слой породы.

Таблица 7 – Некоторые результаты моделирования взаимодействия с породой алмазов коронок со смещенными секторами

| № п/п | Конструкция сектора | Количество секторов | Количество алмазов в коронке | l_a , мм | h_a , мм | Относительная толщина слоя породы, срезаемая соответствующим радиальным рядом | | | h_{max}/h_{min} | Углубка за оборот, мм |
|-------|---|---------------------|------------------------------|------------|------------|---|-----------|-----------|-------------------|-----------------------|
| | | | | | | h_1/h_a | h_2/h_a | h_3/h_a | | |
| 1 |  | 28 | 364 | 3,84 | 0,0077 | 0,85 | 1,42 | 0,53 | 2,68 | 0,31 |
| 2 |  | 28 | 392 | 3,84 | 0,0072 | 0,95 | 1,52 | 0,57 | 2,68 | 0,31 |
| 3 |  | 28 | 374 | 3,84 | 0,0075 | 1,2 | 1,2 | 0,53 | 2,25 | 0,31 |
| 4 |  | 36 | 324 | – | 0,0087 | 1 | 1 | – | 1 | 0,31 |
| 5 |  | 32 | 368 | – | 0,0076 | 1,12 | 1,12 | – | 1,6 | 0,32 |
| | | | | | | 0,81 | 1,32 | 0,5 | | |
| 6 |  | 36 | 324 | – | 0,0087 | 0,71 | 1,21 | – | 1,8 | 0,31 |
| | | | | | | 0,67 | 1,24 | | | |

В таблице 8 показано как совмещение секторов двух типов раскладки позволяет снизить перепад нагрузки на алмазы до 70%.

Таблица 8 – Результаты сравнительного аналитического исследования взаимодействия алмазов различных конструкций коронки с тремя радиальными рядами в секторе с породой

| Конструкция сектора | Кол-во секторов | Всего алмазов | l_a , мм | h_a , мм | Толщина слоя породы, срезаемая соответствующим радиальным рядом, мм | | | | | | r_{max}/r_2 | r_{max}/r_3 |
|---|-----------------|---------------|------------|------------|---|--------|---------|--------|--------|--------|---------------|---------------|
| | | | | | h_1 | h_2 | h_3 | h_4 | h_5 | h_6 | | |
|  | 28 | 392 | 3,84 | 0,0087 | 0,0113 | 0,013 | 0,0017 | - | - | - | 1,15 | 7,6 |
|  | 28 | 378 | 3,84 | 0,0087 | 0,01 | 0,0091 | 0,00456 | 0,0104 | 0,0105 | 0,0046 | 1,09 | 2,19 |

Что касается коронок с двумя радиальными рядами в секторе, обе выбранные конструкции коронки (рисунок 2.18 а, б) обеспечивают одинаковую углубку за оборот. Нагрузка в коронке с раскладкой алмазов по схеме указанной на рисунке 2.18 а распределяется равномерно, что не наблюдается в коронках с раскладкой по схеме, указанной на рисунке 2.18 б. В коронках с раскладкой алмазов по схеме на рисунке 2.18 б перегруз одного ряда алмазов может быть больше другого на 80%. Таким образом, комбинирование схем раскладки алмазов в секторах с двумя радиальными рядами не имеет смысла [96].

2.2 Определение механических напряжений в элементах алмазной коронки при бурении скважин

Для детального изучения распределения механических нагрузок в коронке методом конечных элементов проведено моделирование работы коронки на забое скважины с учетом осевых и крутящих усилий. Исходными данными для составления модели являются геометрические параметры коронки, физико-

механические свойства и форма алмазов, способ их закрепления в матрице и режимы бурения.

Решение поставленной задачи осуществляется на основании системы уравнений (2.34) для определения компонент напряжения в некоторой точке изотропного упругого тела, полученных путем преобразования условий совместности для компонент деформаций в зависимость между компонентами напряжения с использованием закона Гука [50]:

$$\begin{aligned}
 (1+\nu)\nabla^2\sigma_x + \frac{\partial^2\Theta}{\partial x^2} &= 0, & (1+\nu)\nabla^2\tau_{yz} + \frac{\partial^2\Theta}{\partial y\partial z} &= 0, \\
 (1+\nu)\nabla^2\sigma_y + \frac{\partial^2\Theta}{\partial y^2} &= 0, & (1+\nu)\nabla^2\tau_{xz} + \frac{\partial^2\Theta}{\partial x\partial z} &= 0, \\
 (1+\nu)\nabla^2\sigma_z + \frac{\partial^2\Theta}{\partial z^2} &= 0, & (1+\nu)\nabla^2\tau_{xy} + \frac{\partial^2\Theta}{\partial x\partial y} &= 0,
 \end{aligned}
 \tag{2.34}$$

где ν – коэффициент Пуассона;

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2};$$

Θ – сумма нормальных напряжений:

$$\Theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z,$$

$\tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}$ – компоненты касательных напряжений.

Используя возможности компьютерного моделирования, первоначальные исследования проводились с целью определения поля напряжений в одном алмазе. Модель представляла собой жестко закрепленный в фрагменте сектора алмаз октаэдрической формы. К полученной геометрии соответствующим образом были приложены осевые и крутящие усилия, с учетом площади внедрения алмаза в породу.

Результаты моделирования показали, что в начальный период работы коронки на забое при неустановившемся режиме максимальная нагрузка скапливается на вершине октаэдра алмаза (рисунок 2.19). При этом происходит скол вершины и алмаз приобретает овалообразную форму. Причем такая естественная форма овализации в процессе бурения может привести к трещинообразованию в алмазе и

ухудшению работы коронки из-за не правильной формы скола.

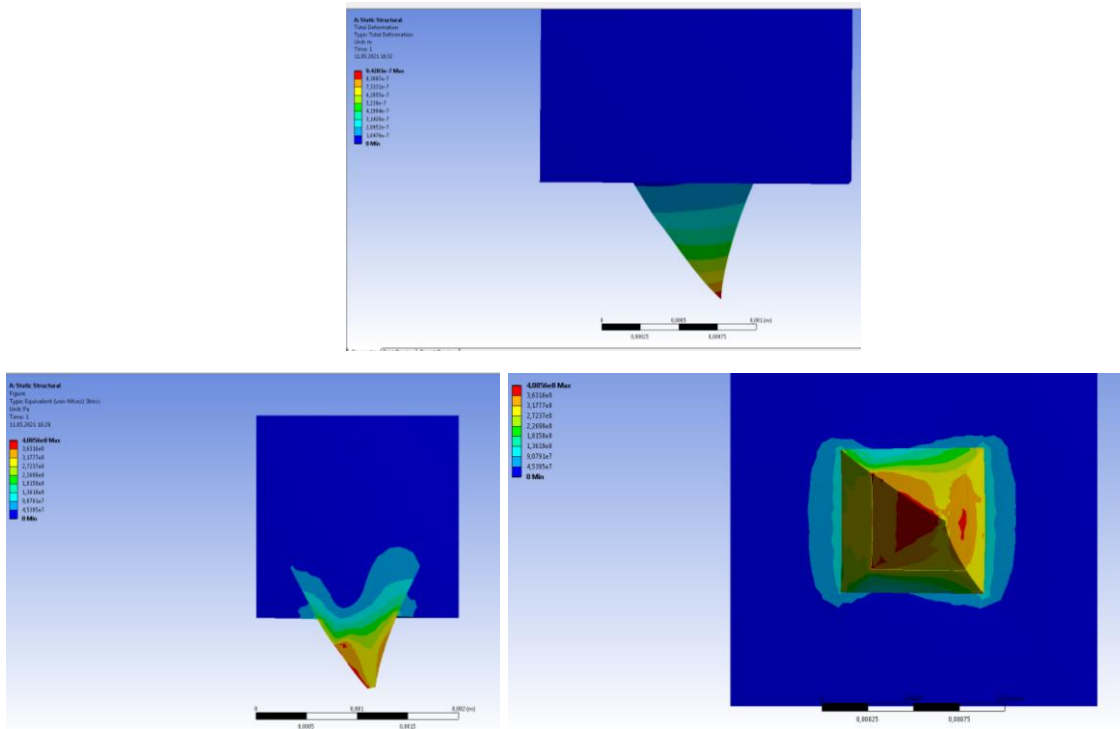


Рисунок 2.19 – Схема распределения механических напряжений в одном максимально нагруженном алмазе при работе коронки

Поэтому однослойные коронки необходимо армировать заранее овализированными алмазами, что совпадает с рекомендациями [2, 14]. К тому же со временем работы в результате износа поверхность алмаза приобретает вид полусферы.

Полученные результаты были учтены при моделировании работы алмазной коронки.

При помощи программного комплекса САПР КОМПАС-3D разработана параметрическая модель, позволяющая осуществлять автоматизированное построение моделей алмазной коронки. При её использовании можно задавать следующие конструктивные параметры коронки: наружный и внутренний диаметр, количество секторов, количество алмазов в секторе, выпуск алмазов, высота сектора, угол, ограничивающий сектор и параметры раскладки алмазов. Пример полученной модели алмазной однослойной коронки приведен на рисунке 2.20.

Такая автоматизация процесса построения модели позволяет осуществлять

моделирование работы коронок различных конструкции без потерь времени на графическую часть работы.

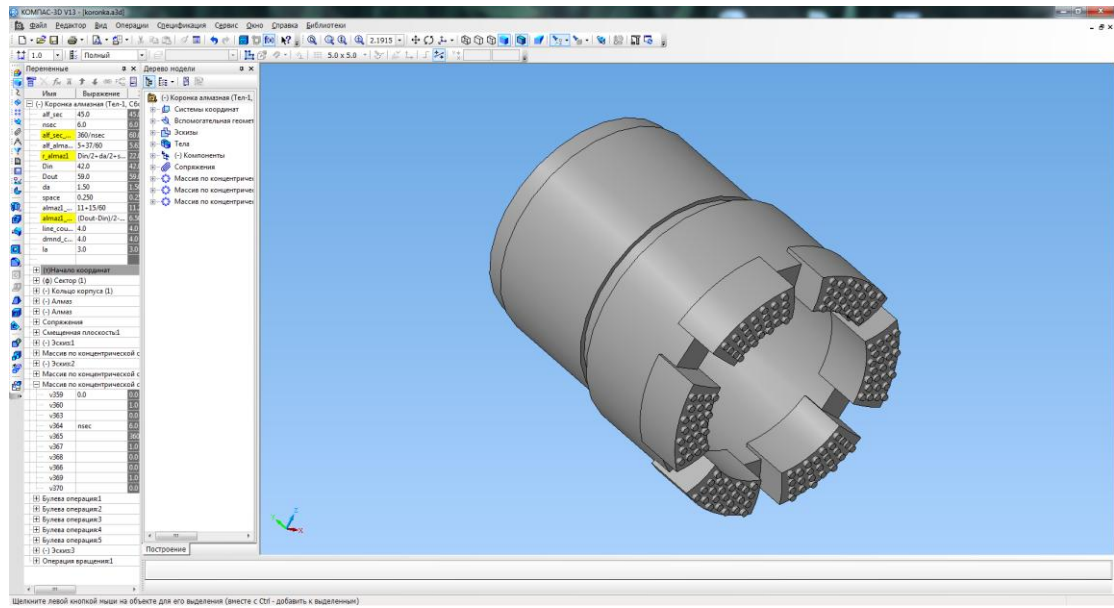


Рисунок 2.20 – Пример моделирования конструкции алмазной однослойной коронки диаметром 59 мм

Результаты компьютерного моделирования с целью определения характера распределения механических напряжений в коронке показали, что сектор с небольшим количеством радиальных рядов выдерживает максимально возможные для геологоразведочной техники режимы бурения (на рисунке 2.21 показаны результаты моделирования работы коронки с 4 радиальными рядами в секторе при осевой нагрузке 20кН и частоте вращения 1000 об/мин).

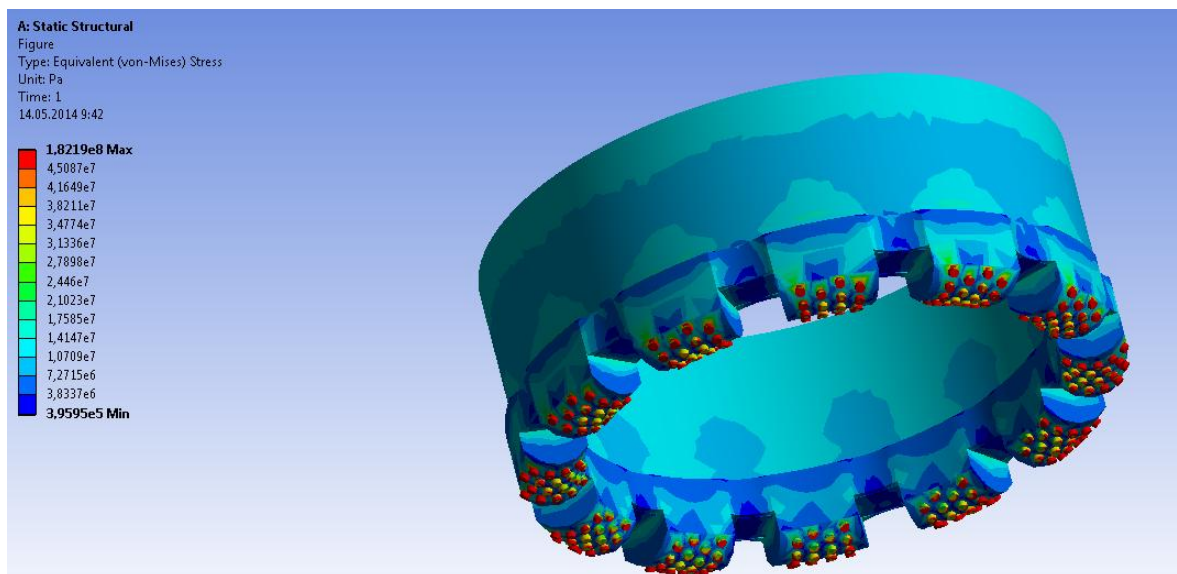


Рисунок 2.21 – Определение механических напряжений в коронке с учетом действующей осевой нагрузки и крутящего момента

Таким образом, наибольшую механическую нагрузку испытывают алмазы коронки. При прочих равных условиях, на характер распределения механических напряжений в секторе влияет не его длина, а количество и тип раскладки алмазов в нем.

2.3 Математическое моделирование температурного режима работы однослойной алмазной коронки с учетом гидравлических процессов, происходящих на забое скважины

Для детального исследования температурных процессов на контакте алмазов с горной породой 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 [51, с. 318]:

– уравнения неразрывности:

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0; \quad (2.35)$$

– уравнения движения ($j = 1, 2, 3$):

$$\rho \left(\frac{\partial u_j}{\partial \tau} + \sum_{i=1}^3 u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = \rho F_j - \frac{\partial P}{\partial x_j} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\eta \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \quad (2.36)$$

– уравнения энергии:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + \sum_{i=1}^3 u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + q_v; \quad (2.37)$$

где x_i – декартовы координаты (x, y, z); τ – время; c_p, ρ, η, λ – соответственно, удельная теплоемкость, плотность, коэффициент вязкости и теплопроводность жидкости, которые задаются исходными данными; u_i – проекции вектора скорости на соответствующие оси координат; P – давление; T – температура; F_j – проекции массовых сил на оси координат; q_v – мощность внутренних или объемных источников энергии.

Учитывая различную толщину снимаемого слоя породы (h_i) и окружную скорость для каждого алмаза, можно определить распределение забойной мощности на отдельных алмазах, которая будет различна для алмазов даже одного радиального ряда.

Забойная мощность на i -том алмазе рассчитывается по формуле:

$$N_i = P_i \cdot v_i, \text{ Вт}, \quad (2.38)$$

где P_i – нагрузка на i -тый алмаз определяется из выражения:

$$P_i = F_i \cdot [\sigma_B] \cdot \mu, \text{ Н} \quad (2.39)$$

где F_i – площадь контакта алмаза с разрушаемой породой, м^2 .

Учитывая, что основную работу воспринимает шарообразная часть алмаза площадь контакта алмаза с забоем можно записать следующим образом:

$$F_i = \frac{1}{2} h_i d_a, \quad (2.40)$$

где h_i – толщина снимаемого слоя породы i -тым алмазом, м; d_a – диаметр алмаза, м.

$[\sigma_B]$ – предел прочности породы, Па;

μ – коэффициент трения алмаза о породу.

v_i – окружная скорость i -того алмаза определяется по формуле:

$$v_i = \omega \cdot R_i = \frac{\pi n}{30} \cdot R_i, \text{ м/с} \quad (2.41)$$

где n – частота вращения коронки, об/мин; R_i – радиус залегания i -того алмаза, м.

Полученная забойная мощность реализуется в теплоту и задается в модели как граничное условие на контакте домена алмаза и домена породы в виде источника энергии.

Для построения модели за основу были приняты: в качестве резцов овализированные синтетические алмазные монокристаллы зернистостью

1600/1250 мкм с повышенной термопрочностью (разработаны и синтезированы в ИСМ); сектор с формой торца в виде полусферы; конструкция коронки (геометрические параметры рассчитывались по методике Н. В. Цыпина [4]).

Построение модели включало в себя следующие этапы:

1. Подготовка исходных данных;
2. Определение граничных условий и допущений;
3. Разбитие на элементы.

Основными исходными данными для составляемой модели являлись конструктивные параметры коронки с учетом раскладки алмазов, характеристики материалов матрицы и корпуса, горной породы, алмазов.

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

Составляемая модель (рисунок 2.22) состоит из нескольких областей решения поставленной задачи – доменов. Для каждой конструкции коронки составляется своя объемная модель. В каждой модели выделены домен очистного агента, породы, сектора, корпуса и алмазов.

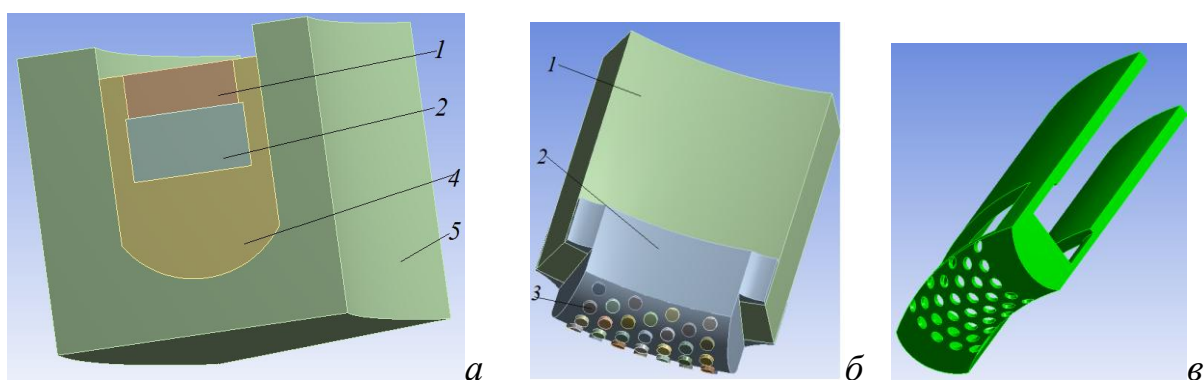


Рисунок 2.22 – Пример модели взаимодействия алмазной однослойной коронки с породой на забое скважины: *a* – модель в сборе; *б* – домен корпуса, сектора и алмазов; *в* – домен воды. 1 – корпус; 2 – сектор; 3 – алмаз; 4 – очистной агент; 5 – порода

При этом модель включает в себя домены тел различного агрегатного состояния, задаваемые свойства которых представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Свойства доменов модели

| Домен | Задаваемые свойства | | | |
|--------|------------------------|------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| | молярная масса, г/моль | плотность, г/см ³ | Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К | Удельная теплоемкость, Дж/кг·К |
| сектор | 117 | 12,30 | 141 | 134 |
| порода | 100 | 2,50 | 3,5 | 1000 |
| алмаз | 100 | 3,53 | 450 | 1334 |
| вода | 18,02 | 0,99 | 0,6069 | 4181,7 |
| корпус | 55,85 | 7,85 | 60,5 | 434 |

Для каждого домена задается начальная температура 20°C и обязательное условие теплообмена. Сопряжение между доменами описывается законами сохранения энергии. Передача тепла от домена к домену происходит без потерь и сопротивлений. При этом учитывается относительное вращение доменов. Для вращающихся доменов и на контакте с ними задается граничное условие вращающейся поверхности с заданной постоянной частотой вращения.

С целью приближения модели к реальным условиям на границах модели задается коэффициент теплопередачи соответствующей породы.

В домене очистного агента в начальных условиях задается относительное давление равно 0 и исходное направление жидкости. Подача задается в плоскости А-А домена очистного агента (рисунок 2.23) с определенным массовым расходом. А плоскость В-В является открытой для перетока жидкости.

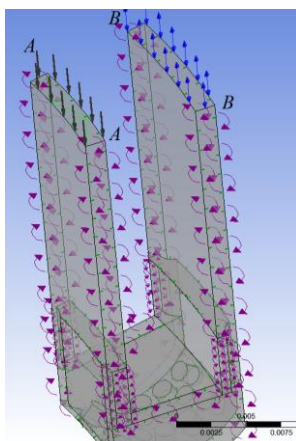


Рисунок 2.23 – Графическое изображение распределения граничных условий в домене «вода»

Длина керна принимается в пределах длины корпуса, т.к. теплопередача выше уровня корпуса коронки не влияет на температурный режим работы

алмазов на забое. Для достоверности данного допущения было проведено моделирование забойных процессов с различной длиной домена породы и очистного агента. Результаты показали, что длина керна не меняет сути процессов происходящих на забое.

Система уравнений (2.35 – 2.37) записывается для каждого домена и решается совместно с учетом приведенных допущений.

На результат решения задачи предложенным методом большое влияние будет оказывать сетка разбиения модели на элементы.

Основной областью исследования является зона взаимодействия алмазов с породой. Поэтому для домена корпуса коронки достаточно крупной сетки, в то время как домен очистного агента и алмазов должен быть разбит на большее количества элементов для получения точного и достоверного решения.

Для определения оптимального количества элементов была проведена серия расчетов работы коронки на забое в одинаковых условиях, но с различным количеством элементов (рисунок 2.24).

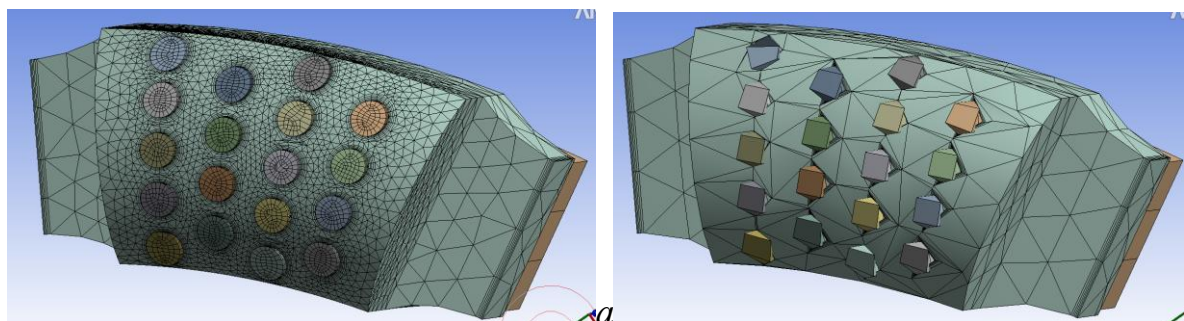


Рисунок 2.24 – Возможные варианты сетки модели коронки на примере конструкции с четырьмя радиальными рядами в секторе: *a* – 77475; *б* – 40195 элементов

Результаты моделирования (рисунок 2.25) показали, что для модели работы коронки с семью радиальными рядами в секторе, при уменьшении элементов с 1200000 до 477362 качество результатов практически не изменяется. При снижении количества элементов менее 477362 значение результатов начинает существенно изменяться. При разбиении модели на 477362 элементов отклонение составляет не более 0,8%. Поэтому целесообразно для моделирования принять сетку с 477362 количеством элементов, что позволит сэкономить ресурс вычислительной машины и

время на исследование при этом получить достоверные результаты.

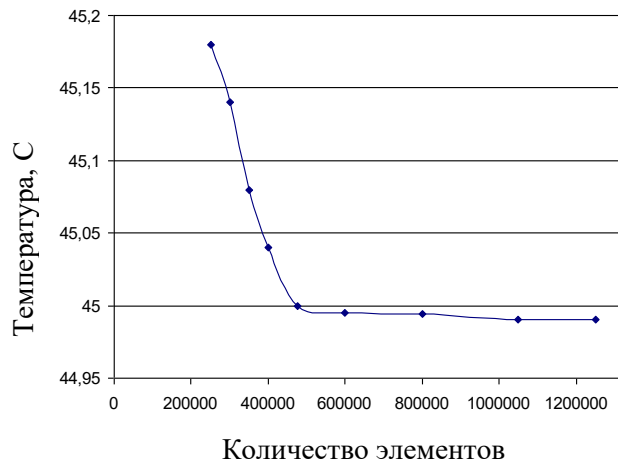


Рисунок 2.25 – Результаты моделирования работы коронки с семью радиальными рядами в секторе при одинаковых условиях, но разном количестве элементов сетки

Для анализа достоверности разработанной математической модели дополнительно рассматривалась работа коронки в воздушной среде без циркуляции очистного агента и при циркуляции на забое технической воды. При нахождении в воздушной среде без её циркуляции, температура алмазов увеличивается непрерывно, достигая, в конечном итоге, критических величин, при которых происходит их разрушение. При циркуляции жидкости на забое температура быстро растёт в начальный период работы, после чего стабилизируется примерно в течение 5 с, что совпадает с экспериментальными данными, полученными другими исследователями [3, 8, 9] (рисунок 2.26).

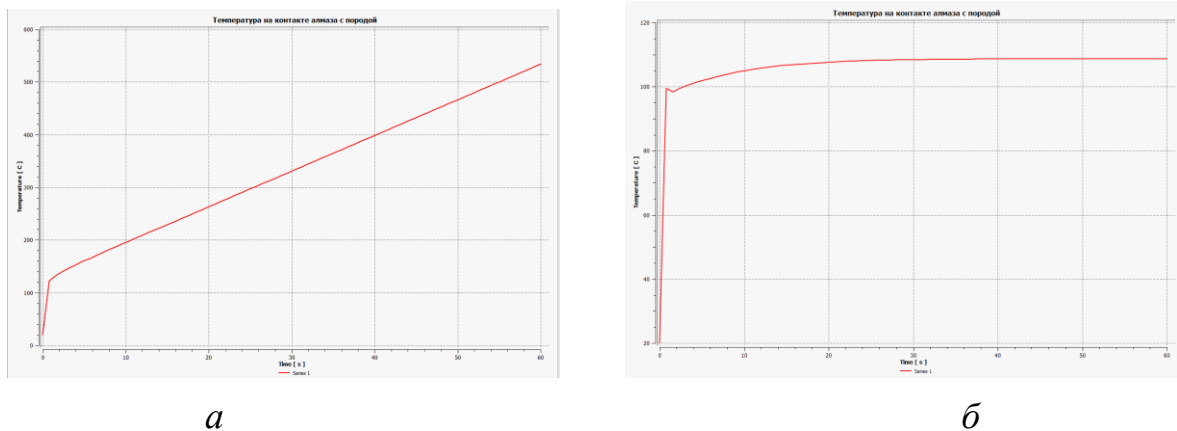


Рисунок 2.26 – Характер изменения температуры на контакте алмаза с породой: *а* – в воздухе (без циркуляции); *б* – в технической воде (подача 40 л/мин)

Поэтому в дальнейшем время моделирования принято равным 5 секундам.

Для получения 5 секунд моделируемого времени приняты следующие варианты сочетания шаг решения/шаг времени соответственно 500/0,01; 250/0,02; 200/0,025; 125/0,04.

Результаты моделирования (таблица 10) показали, что применение шага 125/0,04 позволяет максимально сократить время исследования и сэкономить ресурс компьютера без ущерба результатов. По сравнению с большим шагом в 500/0,01 результат с шагом 125/0,04 отличается всего на 4%, что для температурного режима является не существенным отклонением (см. рисунок 2.27). При этом применение шага 125/0,04 экономит время на моделирование в 4 раза.

Таблица 10 – Максимальная температура (°C) контакта алмаза с породой при бурении коронки с тремя радиальными рядами в секторе при осевой нагрузке 20 кН, подаче промывочной жидкости 40 л/мин, частоте вращения 800 об/мин

| Продолжительность времени/шагов во времени | | | |
|--|-----------|----------|----------|
| 125/0,04 | 200/0,025 | 250/0,02 | 500/0,01 |
| 55,33 | 55,52 | 55,61 | 53,082 |

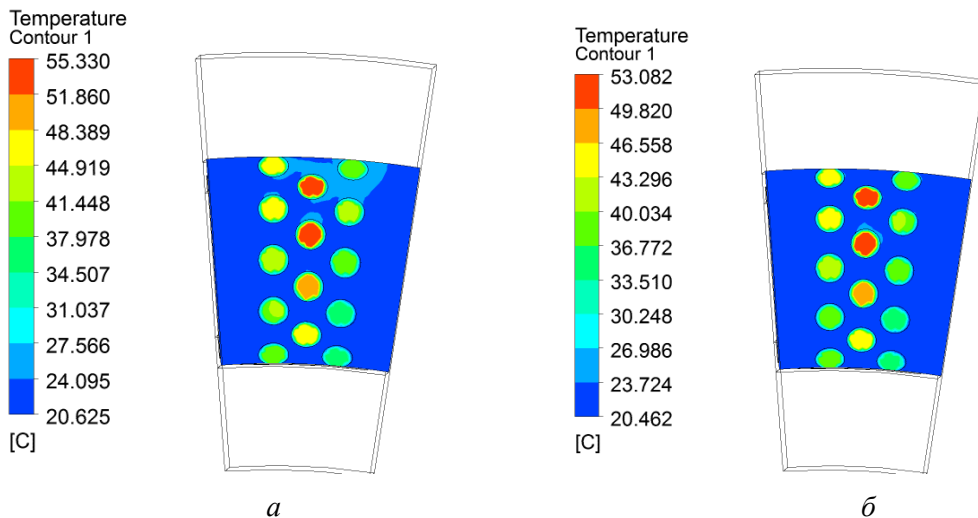


Рисунок 2.27 – Пример результатов определения температуры забоя для коронок с тремя радиальными рядами в секторе ($P=20$ кН, $Q=40$ л/мин, $n=800$ об/мин): *а* – шаг решения 125; *б* – шаг решения 500

Составленная 3D модель позволяет определять температуру, скорость течения жидкости, давление в любой точке призабойной зоны. Примеры результатов моделирования приведены на рисунках 2.28, 2.29, 2.30.

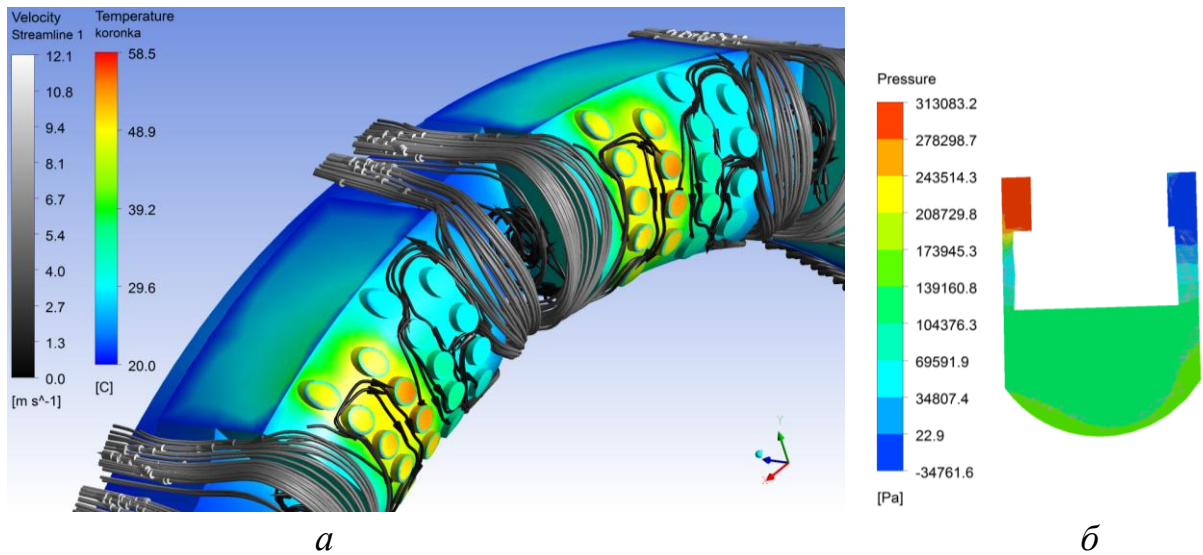


Рисунок 2.28 – Пример элементов 3-D модели:

a – результаты моделирования (температура нагрева и скорость течения жидкости);

б – распределение давления жидкости при бурении скважины однослойной алмазной коронки с тремя радиальными рядами в секторе

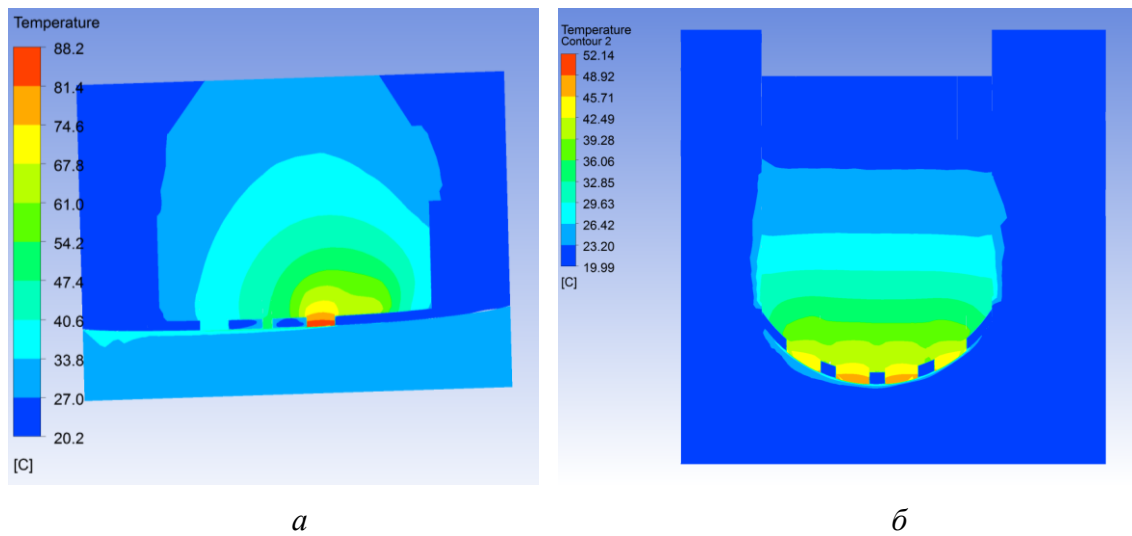


Рисунок 2.29 – Распределение температуры в продольном (*a*) и поперечном (*б*) сечении коронки.

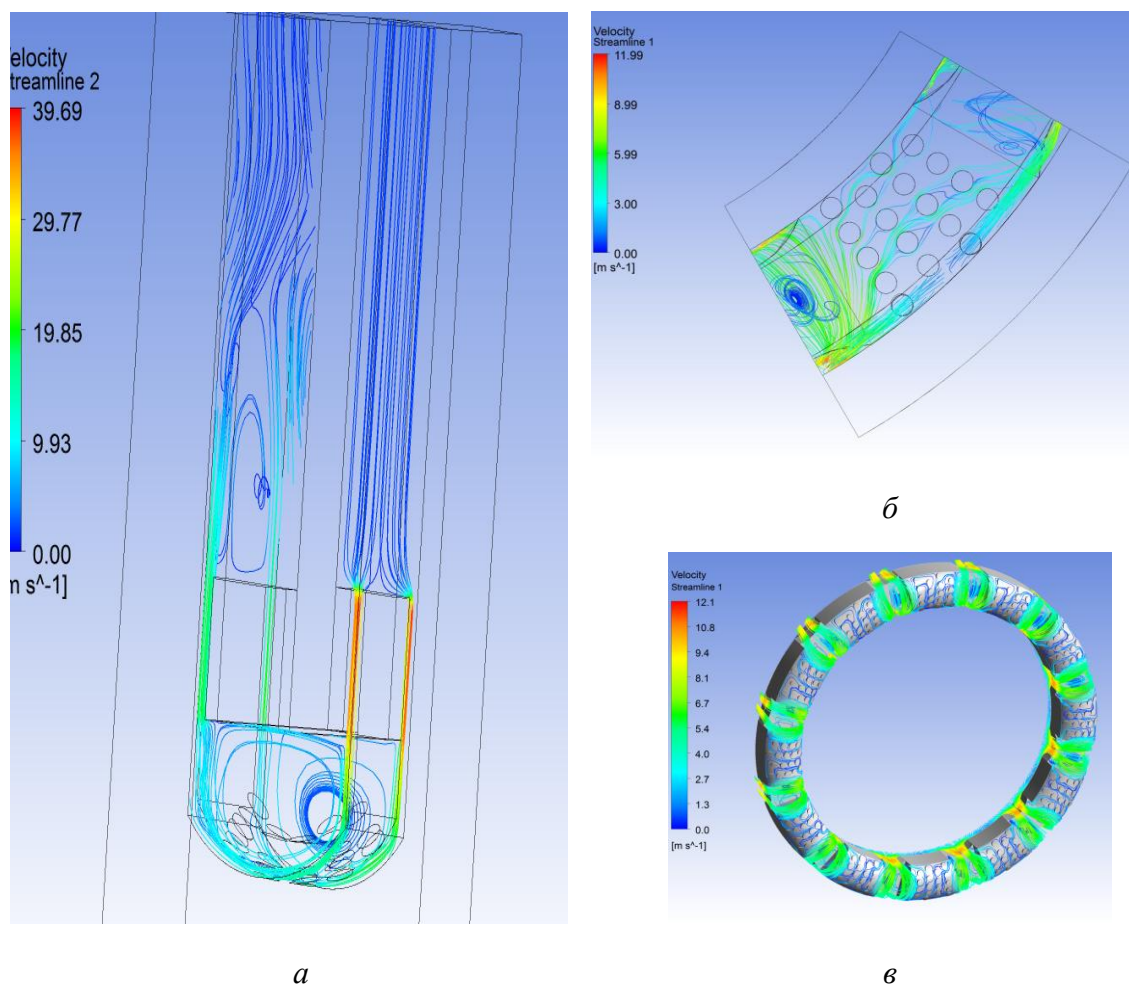
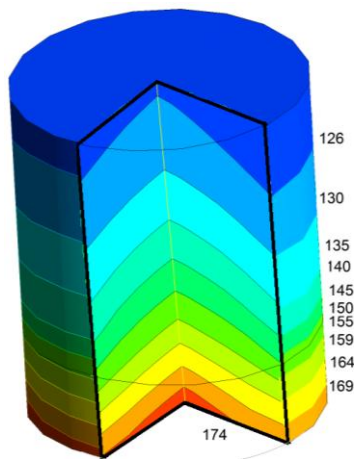


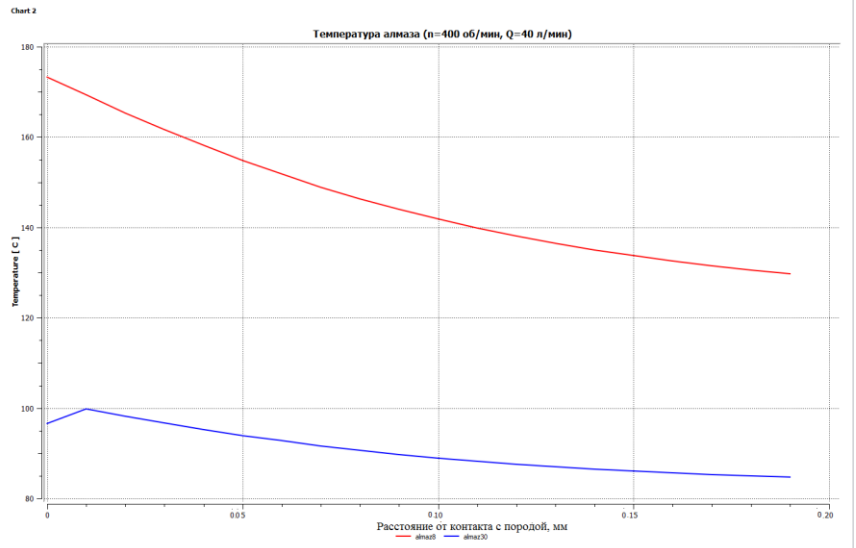
Рисунок 2.30 – Примеры результатов моделирования тепловых и гидравлических процессов, протекающих на забое скважины:

a – линии тока промывочной жидкости в пределах сектора коронки; *б* – течение жидкости на забое в пределах одного сектора; *в* – течение жидкости на забое

Модель позволяет детально исследовать температурные и гидравлические процессы даже в самых мелких элементах и труднодоступных местах расчётной схемы. Например, можно легко определить распределение температуры внутри любого алмаза коронки (рисунок 2.31).



а



б

Рисунок 2.31 – Распределение температуры в алмазе: а – пример результата моделирования; б – график распределения температуры в алмазе (верхняя линия – самый нагретый алмаз; нижняя линия – самый холодный алмаз сектора)

Проверка адекватности модели. Планирование эксперимента

Для проверки адекватности расчётной модели было проведено моделирование работы коронки в тех же условиях, которые описаны в [7, 9, 52], и выполнен сравнительный анализ результатов моделирования и данных экспериментов, проведенных ранее методом термопар.

Первое моделирование было проведено для следующих условий: порода – кварцит; осевая нагрузка – 6 кН; частота вращения – 400 об/мин; промывочная жидкость – вода.

Поскольку модель позволяет определить температуру в любой точке призабойного пространства, то было получено температурное поле в плоскости, построенной на расстоянии 1,8 мм от контакта алмазов с породой (зона установки термопары в реальном эксперименте). Результаты моделирования (рисунок 2.32 а) показывают, что температура в этой зоне колеблется от 103 до 110°C, что соответствует данным (рисунок 2.32 б), полученных в ходе эксперимента, проведенного в ВИТР для аналогичных условий [9, стр. 143].

Второе моделирование проведено с исходными данными: порода – гнейс,

подача воды – 5,4 л/мин, осевая нагрузка – 3 кН, частота вращения $n=400$ об/мин. Результаты моделирования (рисунок 2.32 в) показали, что полученная модель соответствует экспериментальным данным (рисунок 2.32 г) П. Н. Курочкина и М. И. Исаева [52].

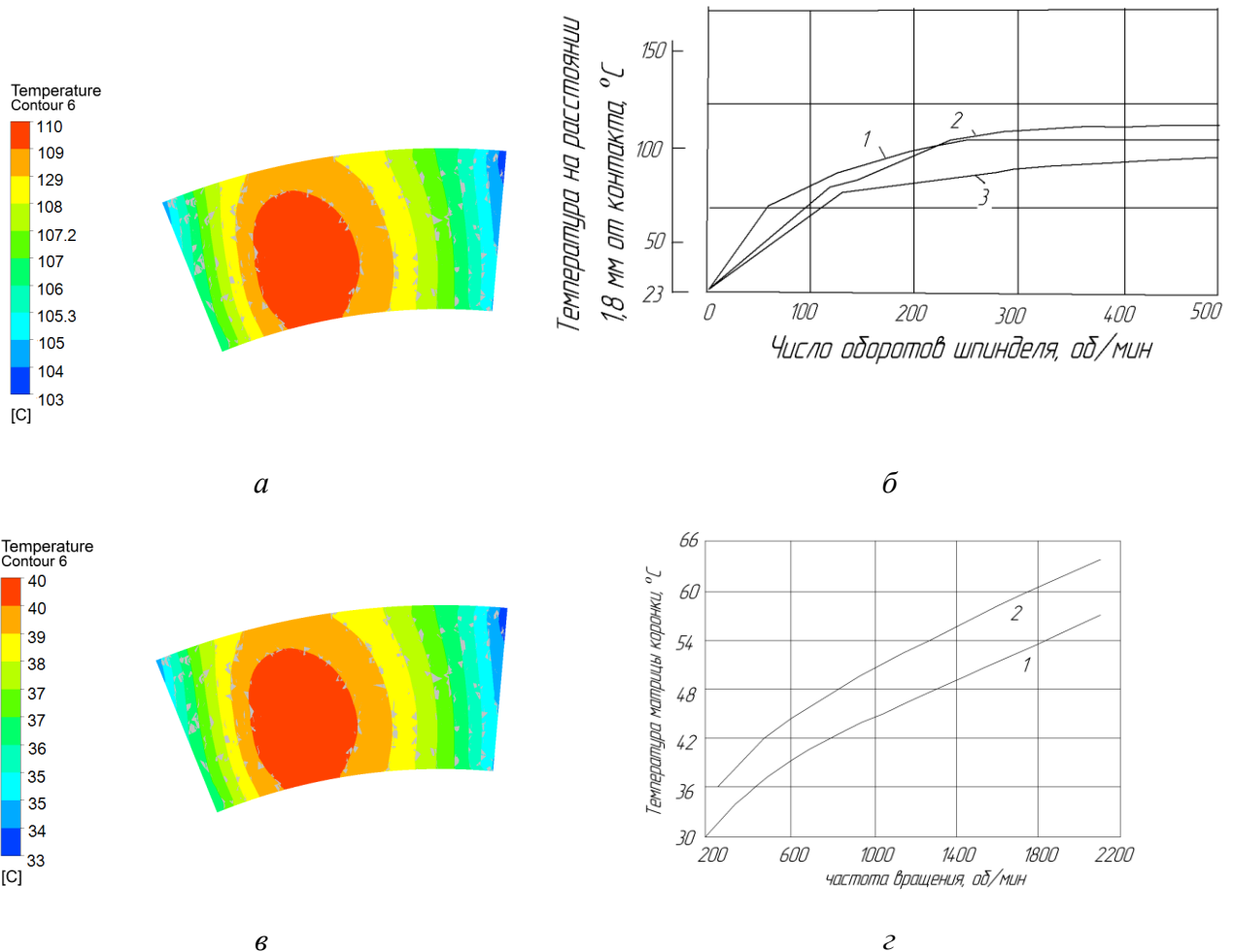


Рисунок 2.32 – Данные о температурном режиме алмазной коронки: *а* – результаты моделирования при бурении по кварциту; *б* – экспериментальные данные ВИТР (при подаче: 1 – 0,15; 2 – 0,1; 3 – 0,06 мм); *в* – результаты моделирования при бурении по гнейсу; *г* – экспериментальные данные П.Н. Курочкина и М.И. Исаева (1 – перед алмазом; 2 – позади алмаза)

Результаты моделирования совпадают с результатами натуральных экспериментов различных работ, что подтверждает адекватность полученной модели и позволяет использовать компьютерное моделирование для исследования температурного режима работы алмазной коронки.

Для исследования температурного режима работы алмазной однослойной коронки выделены конструкции с различной раскладкой алмазов в секторе: с двумя, тремя, четырьмя (как наиболее перспективные с точки зрения

распределения механической нагрузки) и с семью (конструкция Н. В. Цыпина [4]) радиальными рядами.

Определены главные факторы, регулируемые в процессе бурения и влияющие на температуру нагрева (T , °C) плоскости контакта алмаза с породой. Это осевая нагрузка, частота вращения и подача промывочной жидкости. Температура нагрева контакта алмаза с породой является функцией зависимости от режимов бурения, т.е.:

$$T = f(P, Q, n),$$

где P – осевая нагрузка на коронку, кН; Q – подача промывочной жидкости, л/мин; n – частота вращения, об/мин.

Учитывая технические возможности бурового геологоразведочного оборудования при бурении алмазными коронками, составлен план эксперимента (таблица 11):

Таблица 11 – План эксперимента

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

Для проведения трехфакторного двухуровневого эксперимента необходимо количество опытов равно:

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

Матрица планирования будет иметь вид представленный в таблице 12.

Таблица 12 – Матрица планирования

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

На основании полученного, проведено компьютерное моделирование работы алмазных однослойных коронок на забое скважины. Некоторые результаты исследования температурного режима работы коронок на забое приведены на рисунке 2.33 и в таблице 13.

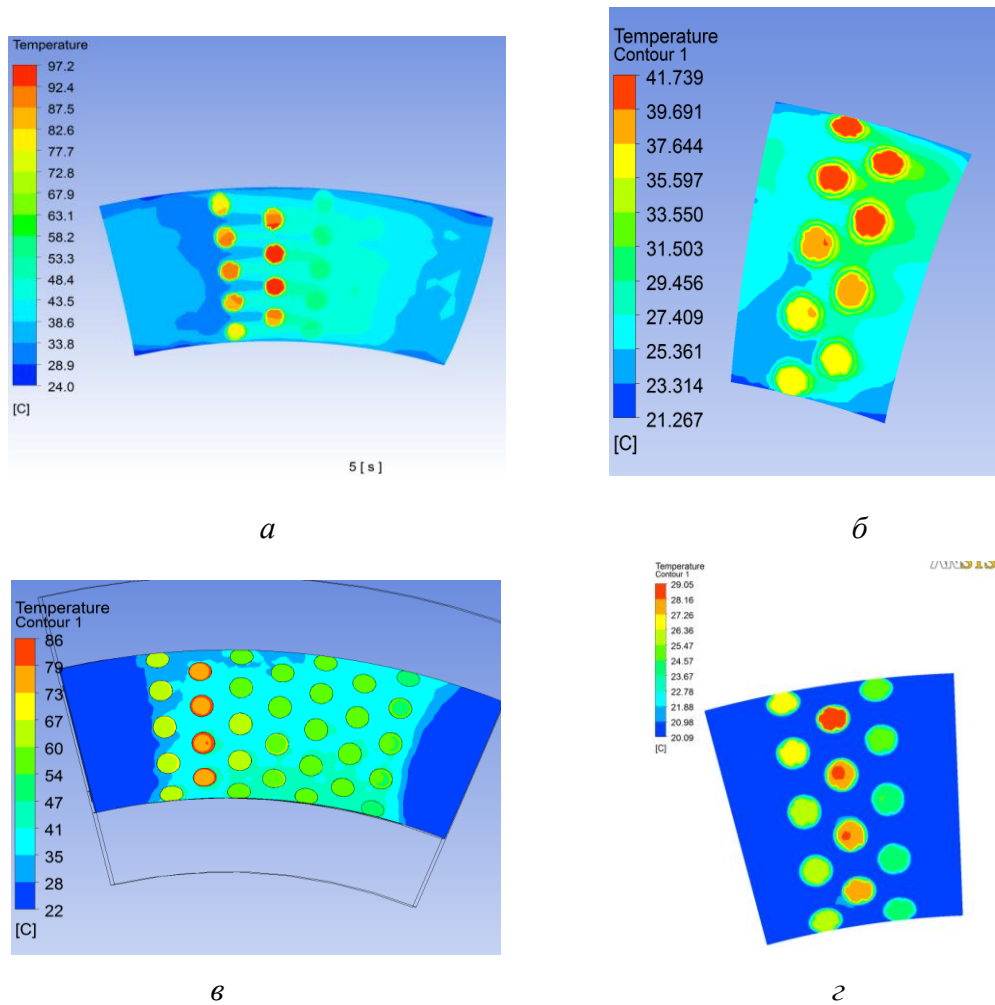


Рисунок 2.33 – Пример результатов определения температуры забоя для коронок с четырьмя (а), двумя (б), семью (в) и тремя (г) радиальными рядами в секторе [89].

Таблица 13 – Максимальная температура (°С) контакта алмаза с породой при бурении коронками диаметром 93 мм с различной раскладкой алмазов

| Кол-во радиальных рядов в секторе | Кол-во секторов | Очистной агент | Режимы бурения при осевой нагрузке P=20 кН | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------|------------------|--|--------------------------|-----|-----|-----|-----|------|-----|--|
| | | | Подача, л/мин | Частота вращения, об/мин | | | | | | | |
| | | | | 200 | 400 | 600 | 700 | 800 | 1000 | | |
| 7 | 10 | Техническая вода | 19 | 39 | 55 | 69 | 75 | 81 | 91 | 112 | |
| | | | 40 | 37 | 51 | 64 | 69 | 76 | 86 | 108 | |
| | | | 70 | 35 | 48 | 59 | 65 | 71 | 81 | 103 | |
| | | Воздух | * | 50 | 76 | 99 | 109 | 118 | 125 | 165 | |
| 4 | 12 | Техническая вода | 19 | 43 | 59 | 72 | 80 | 89 | 102 | 130 | |
| | | | 40 | 41 | 60 | 73 | 79 | 85 | 97 | 124 | |
| | | | 70 | 37 | 53 | 69 | 76 | 82 | 94 | 119 | |
| | | Воздух | * | 60 | 98 | 127 | 138 | 150 | 165 | 263 | |
| 3 | 28 | Техническая вода | 19 | 31 | 42 | 53 | 58 | 64 | 75 | 100 | |
| | | | 40 | 28 | 37 | 45 | 50 | 54 | 62 | 84 | |
| | | | 70 | 27 | 34 | 40 | 44 | 48 | 54 | 71 | |
| | | Воздух | * | 59 | 92 | 121 | 136 | 149 | 177 | 245 | |
| 2 | 38 | Техническая вода | 19 | 26 | 32 | 38 | 40 | 43 | 51 | 58 | |
| | | | 40 | 25 | 29 | 34 | 35 | 38 | 42 | 50 | |
| | | | 70 | 24 | 28 | 31 | 32 | 34 | 38 | 45 | |
| | | Воздух | * | 51 | 70 | 84 | 89 | 94 | 102 | 120 | |

*Расход воздуха рассчитан для скорости восходящего потока в кольцевом пространстве скважины 20 м/с

Результаты моделирования показали, что распределение температуры среди объемных алмазов следующая: *максимально нагретыми являются алмазы второго радиального ряда*, алмазы первого радиального ряда менее нагреты, причем независимо от типа раскладки, *минимально нагретыми являются алмазы последнего радиального ряда* (таблица 14, рисунок 2.34).

Таблица 14 – Распределение температуры нагрева объемных алмазов в радиальных рядах одного сектора коронки

| Кол-во рад. рядов в секторе | Подача, л/мин | Частота вращения, об/мин | | | | | | | | |
|-----------------------------|---------------|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 700 | | | 800 | | | 1500 | | |
| | | 1р.р. | 2 р.р. | 3 р.р. | 1 р.р. | 2 р.р. | 3 р.р. | 1 р.р. | 2 р.р. | 3 р.р. |
| 7 | 40 | 58 | 69 | 50 | 63 | 76 | 57 | 87 | 108 | 74 |
| | 70 | 53 | 65 | 48 | 58 | 71 | 52 | 81 | 103 | 70 |
| 4 | 40 | 69 | 79 | 55 | 78 | 85 | 58 | 120 | 128 | 84 |
| | 70 | 65 | 76 | 52 | 75 | 82 | 55 | 110 | 119 | 77 |

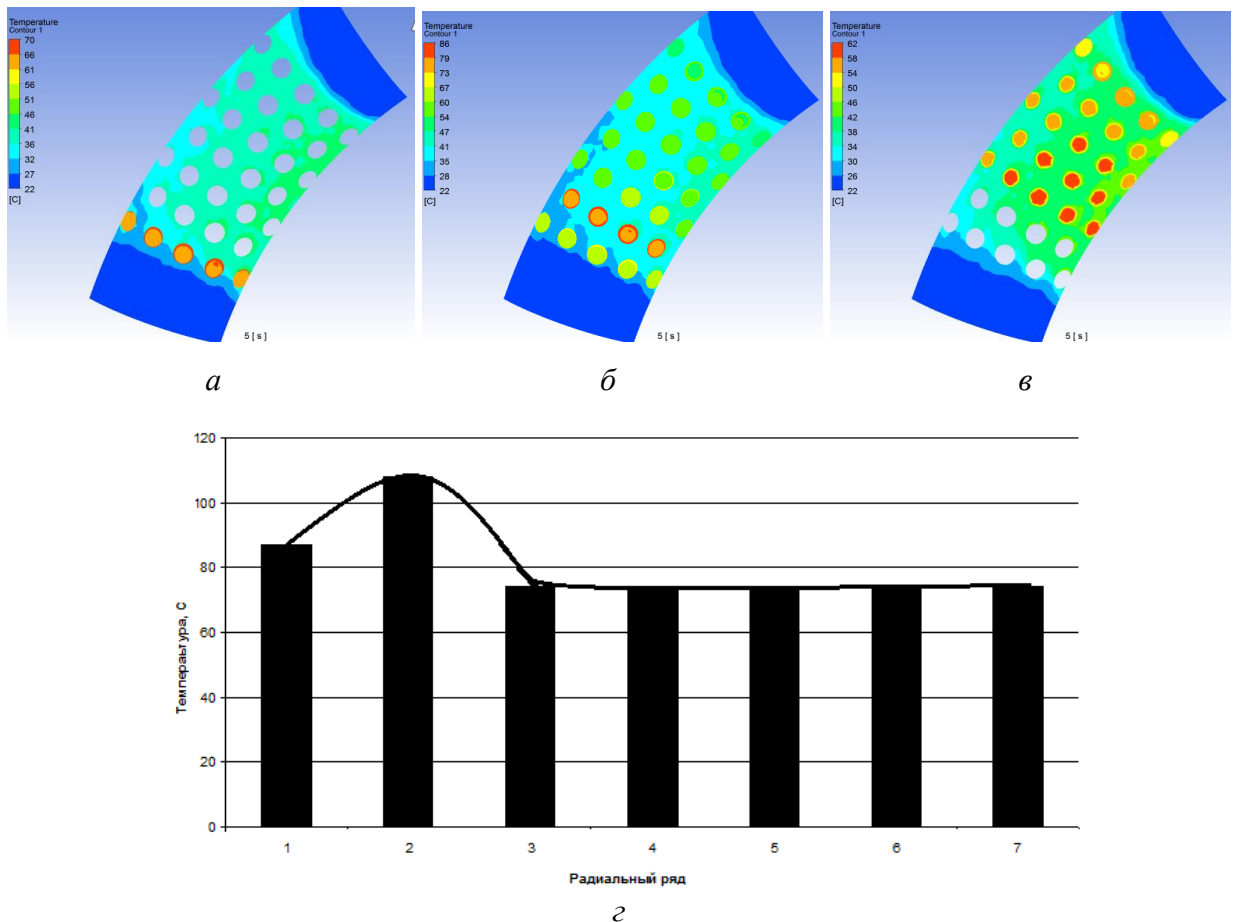


Рисунок 2.34 – Пример результатов определения температуры алмазов для коронки с семью радиальными рядами в секторе:

a – первого радиального ряда, *b* – второго радиального ряда, *v* – третьего радиального ряда сектора; *z* – распределения температуры алмазов в пределах сектора.

Результаты моделирования дают картину распределения температурных полей во всех элементах коронки. Пример распределения температуры в матрицах различных коронки приведен на рисунке 2.35. Наибольшая температура матрицы будет соответствовать области, примыкающей ко второму радиальному ряду алмазов [97].

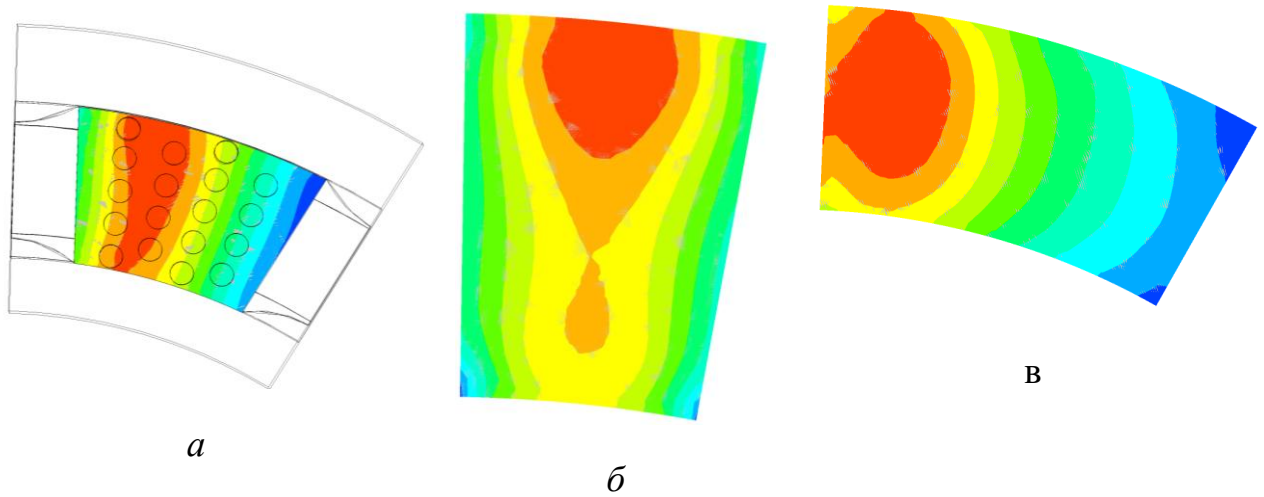


Рисунок 2.35 – Пример распределения температуры в матрице коронки с радиальной раскладкой алмазов в секторе: *a* – четыре ряда; *б* – три ряда; *в* – семь рядов

Зависимость температуры нагрева алмаза от количества радиальных рядов

Полученные результаты подтвердили, что в коронках с многорядной раскладкой наибольшая мощность реализуется алмазами первых двух радиальных рядов. Однако алмазы первого радиального ряда многорядного сектора сильнее омываются промывочной жидкостью и, следовательно, охлаждаются лучше, чем более отдаленные от промывочного канала алмазы второго радиального ряда (рисунок 2.33), которые подвергаются наибольшему нагреву, и, при прочих равных условиях, наиболее вероятно, что они первыми будут выходить из строя, особенно при работе коронки на форсированных режимах.

При этом разность температуры нагрева алмазов в пределах одного сектора не одинакова для всех однослойных алмазных коронок, ее величина зависит от количества радиальных рядов в секторе (рисунок 2.36). Так, у коронок с шестью радиальными рядами в секторе превышение температуры нагрева алмазов второго радиального ряда над температурой нагрева алмазов третьего радиального ряда составляет 27-28%, в то время как этот же показатель у коронок с пятью радиальными рядами в секторе не превышает 26%.

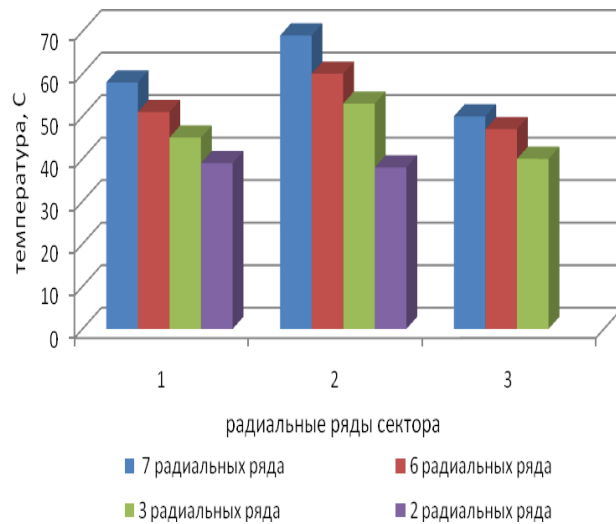


Рисунок 2.36 – Гистограмма сравнения температуры нагрева первых трех радиальных рядов коронок с 7, 6, 3 и 2 радиальными рядами в секторе

Из таблицы 13 видно, что *снижая количество радиальных рядов в секторе на один, можно добиться уменьшения температуры нагрева алмаза на 30-40%* (рисунок 2.37).

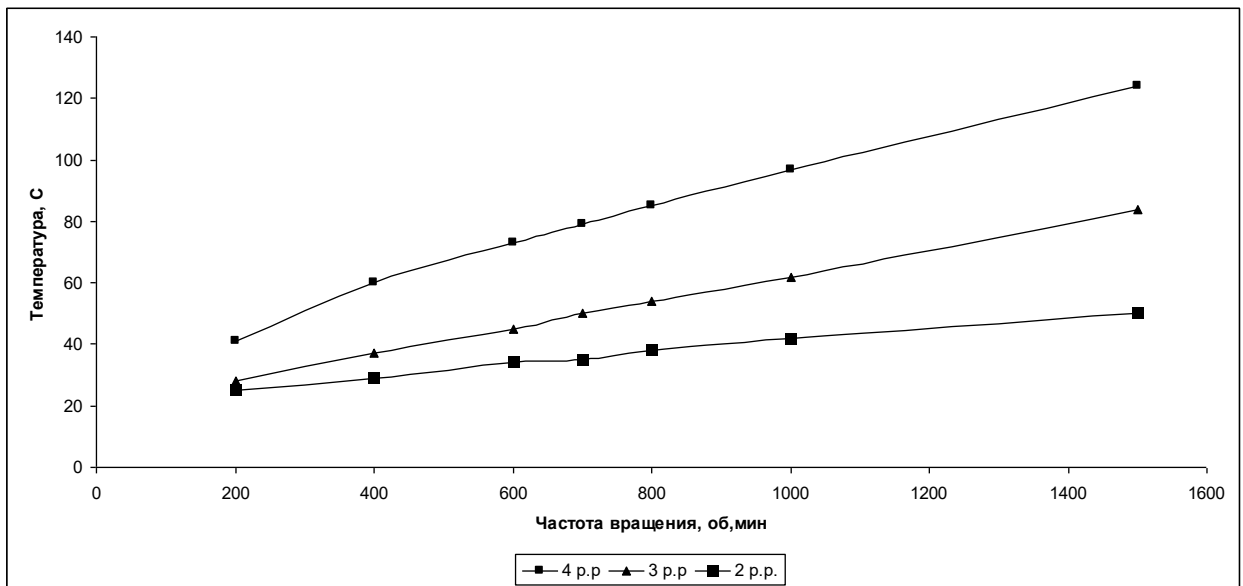


Рисунок 2.37 – График зависимости температуры нагрева алмаза на контакте с породой от частоты вращения (осевая нагрузка 20 кН, подача промывочной жидкости 40 л/мин)

Нагрев алмазов первых двух радиальных рядов сектора коронки с 4 радиальными рядами в секторе (рисунок 2.38) более равномерный, чем у коронок с 7 радиальными рядами в секторе (рисунок 2.39). 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%* (таблица 15, рисунки 2.39, 2.40).

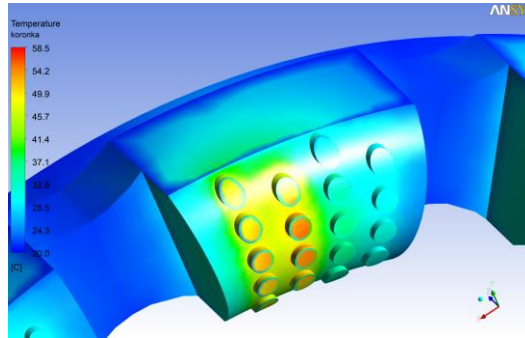


Рисунок 2.38 – Распределение температуры в торцевой части коронки с четырьмя радиальными рядами в секторе

Таблица 15 – Распределение температуры нагрева объемных алмазов в радиальных рядах одного сектора коронки при осевой нагрузке на коронку 20 кН

| Кол-во рад. рядов в секторе | Подача, л/мин | Частота вращения, об/мин | | | | | | | | |
|--------------------------------------|------------------|--------------------------|--------|-------------------|--------|--------|-------------------|--------|--------|-------------------|
| | | 700 | | | 800 | | | 1500 | | |
| | | 1р.р. | 2 р.р. | 3 р.р. и посл. | 1 р.р. | 2 р.р. | 3 р.р. и посл. | 1 р.р. | 2 р.р. | 3 р.р. и посл. |
| 7 | 40 | 58 | 69 | 50 | 63 | 76 | 57 | 87 | 108 | 74 |
| | 70 | 53 | 65 | 48 | 58 | 71 | 52 | 81 | 103 | 70 |
| 4 | 40 | 69 | 79 | 55 | 78 | 85 | 58 | 120 | 128 | 84 |
| | 70 | 65 | 76 | 52 | 75 | 82 | 55 | 110 | 119 | 77 |

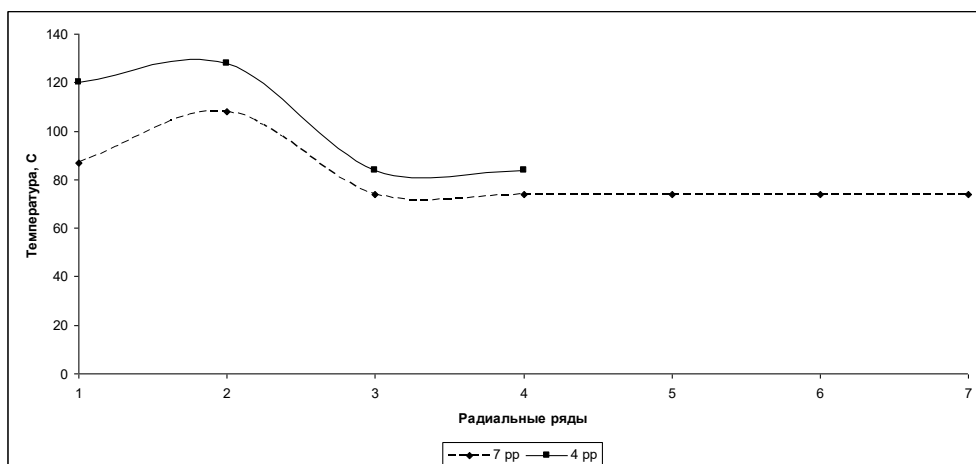


Рисунок 2.39 – График распределения температуры алмазов в пределах одного сектора коронки диаметром 93мм (7 и 4 радиальных рядов в секторе) (осевая нагрузка 20 кН, подача промывочной жидкости 40 л/мин)

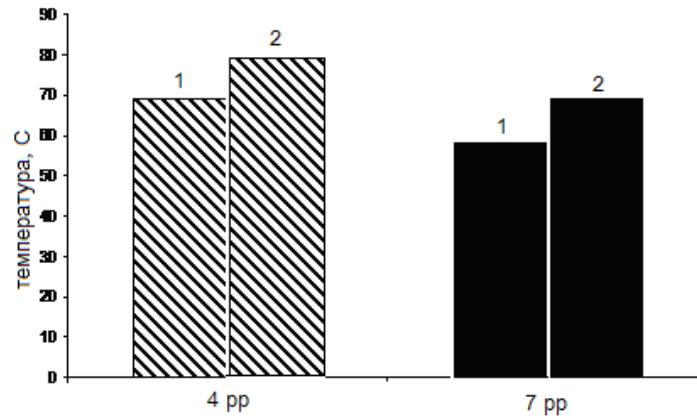


Рисунок 2.40 – Гистограмма сравнения температуры нагрева алмазов первых двух радиальных рядов секторов с 7 и 4 радиальными рядами

Как показывают результаты, приведенные в таблице 16, *снижение количества радиальных рядов в секторе позволяет увеличивать 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 [90].

Таблица 16 – 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 | Мощность, Вт | Температура при частоте вращения, 800 об/мин | Мощность, Вт | Температура при частоте вращения, 1000 об/мин |
|-----------------------------------|---------------------|--------------|--|--------------|--|--------------|---|
| 7 | 20 | 75 | 64 | 228 | 76 | 303 | 86 |
| 4 | 22 | | 78 | | 92 | | 105 |
| 2 | 69 | | 68 | | 81 | | 95 |

Зависимость температуры нагрева алмаза от режимов бурения

По результатам моделирования, путем аппроксимации можно вывести зависимости изменения температуры нагрева алмазов от режимов бурения.

На примере коронки с четырьмя радиальными рядами в секторе это осуществляется следующим образом.

Для данных приведенных в таблицы 13 строятся линии тренда (рисунок 2.41).

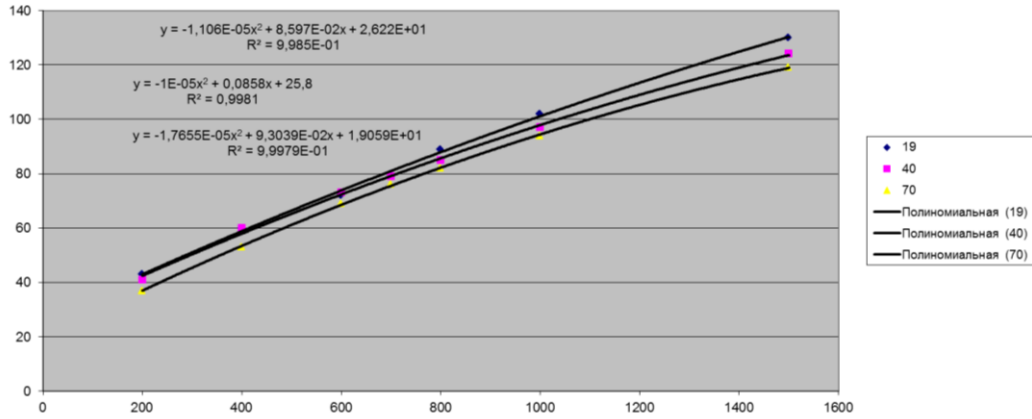


Рисунок 2.41 – Линии тренда для данных представленных в таблице 13 для коронки с четырьмя радиальными рядами в секторе: 19 – подача жидкости 19 л/мин; 40 – подача жидкости 40 л/мин; 70 – подача жидкости 70 л/мин

Для коэффициентов возле значений частоты вращения (n) с привязкой к зависимости от подачи промывочной жидкости составляется таблица 17 и для полученных значений строятся линии тренда (рисунок 2.42)

Таблица 17 – Значения коэффициентов при n

| Подача промывочной жидкости, л/мин | Коэффициент значения частоты вращения | | |
|------------------------------------|---------------------------------------|-------|-------|
| | n2 | n1 | n0 |
| 19 | 1,106 | 8,597 | 26,22 |
| 40 | 1 | 8,58 | 25,8 |
| 70 | 1,7655 | 9,304 | 19,06 |

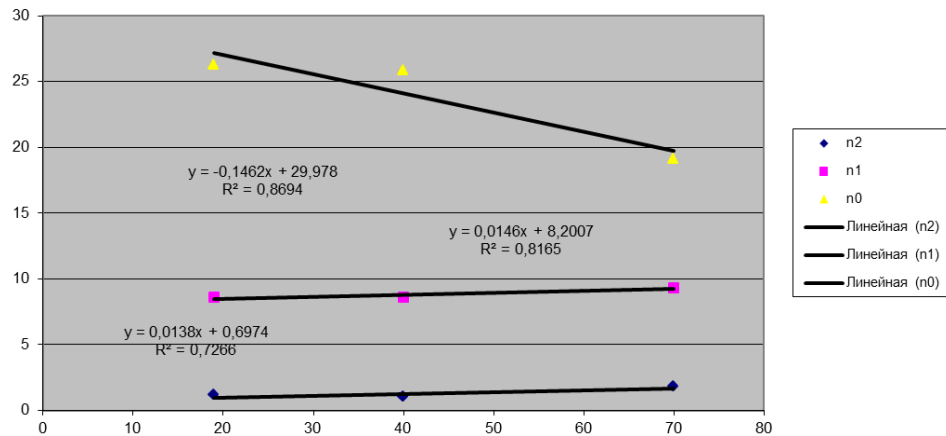


Рисунок 2.42 – Линии тренда значений коэффициента при частоте вращения

Получаем уравнение:

$$-(0,0138q+0,6974) \cdot 10^{-5} n^2 + (0,0146q+8,2007) \cdot 10^{-12} n + (-0,1462q+29,978) = T$$

Путем преобразования полученного уравнения получаем формулу

зависимости температуры на контакте алмаза с породой (T , °C) от частоты вращения снаряда (n , об/мин) и подачи воды (q , л/мин) для коронок с четырьмя радиальными рядами в секторе:

$$T = -1,4 \cdot 10^{-7} n^2 q - 0,7 \cdot 10^{-5} n^2 + 1,5 \cdot 10^{-4} n \cdot q + 0,082n - 0,15q + 30 \quad (2.42)$$

С целью проверки полученного выражения (2.42) осуществлен расчет максимальной температуры контакта алмаза с породой при бурении коронками диаметром 93 мм с различной раскладкой алмазов для значений частоты вращения: 200, 400, 600, 700, 800, 1000, 1500 об/мин и подачи промывочной жидкости 19, 40 и 70 л/мин. Результаты расчета приведены в таблице 18.

Таблица 18 – Расчетная максимальная температура контакта алмаза с породой при бурении коронками диаметром 93 мм с четырьмя радиальными рядами в секторе

| Режимы бурения при осевой нагрузке $P=20$ кН | | | | | | | |
|--|--------------------------|------|------|------|------|-------|-------|
| Подача, л/мин | Частота вращения, об/мин | | | | | | |
| | 200 | 400 | 600 | 700 | 800 | 1000 | 1500 |
| 19 | 43,7 | 59,5 | 74,6 | 81,8 | 88,8 | 102,3 | 132,7 |
| 40 | 41,1 | 57,2 | 72,3 | 79,4 | 86,3 | 99,4 | 127,7 |
| 70 | 37,3 | 53,8 | 69 | 76 | 82,7 | 95,2 | 120,5 |

Сравнение результатов расчета с результатами моделирования показало, что полученные значения имеют максимальное отклонение $3,8^\circ\text{C}$ для частоты вращения 400 и 1500 об/мин, что является незначительным для теплоустойчивого алмаза [95].

Аналогично температура на контакте алмаза с породой (T , °C) в зависимости от частоты вращения снаряда (n , об/мин) и подачи воды (q , л/мин) может быть аппроксимирована следующими соотношениями:

- для коронок с семью радиальными рядами в секторе:

$$T = 1,8 \cdot 10^{-7} n^2 q - 2,2 \cdot 10^{-5} n^2 - 3,7 \cdot 10^{-4} n \cdot q + 0,094n - 1,7 \cdot 10^{-3} q + 23; \quad (2.43)$$

- для коронок с тремя радиальными рядами в секторе:

$$T = -3,8 \cdot 10^{-4} n \cdot q + 0,059n + 21; \quad (2.44)$$

- для коронок с двумя радиальными рядами в секторе:

$$T = 1,2 \cdot 10^{-7} n^2 q - 0,9 \cdot 10^{-5} n^2 - 3,8 \cdot 10^{-4} n \cdot q + 0,043n + 4,6 \cdot 10^{-2} q + 18 \quad (2.45)$$

На основании полученных результатов моделирования построены графики зависимости температуры нагрева контакта алмаза с горной породой от режимов бурения (рисунки 2.43, 2.44).

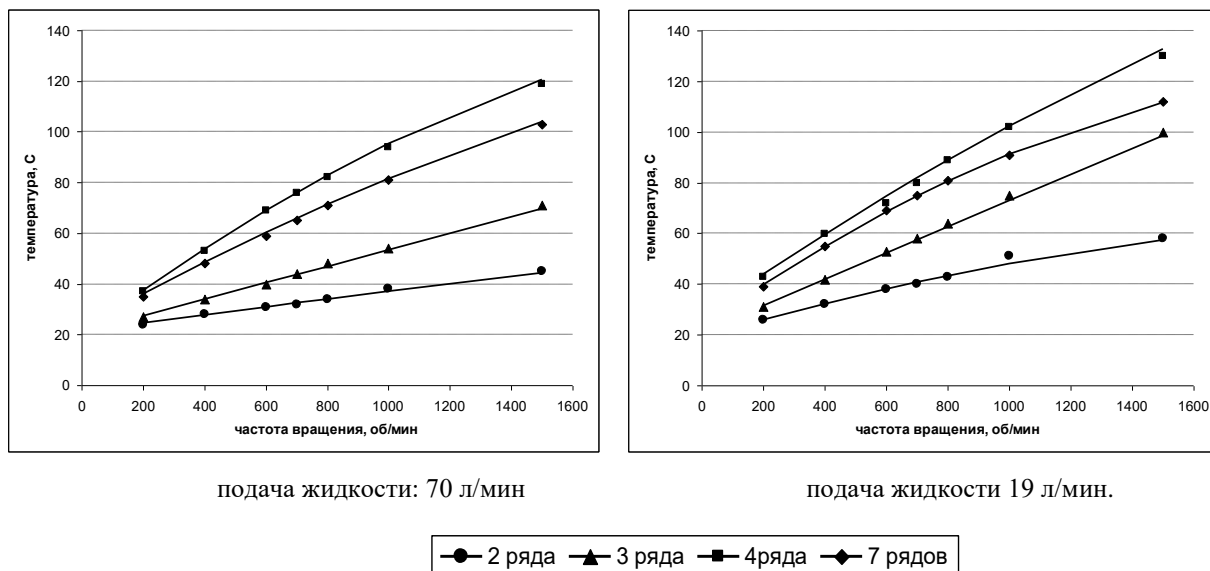


Рисунок 2.43 – График зависимости температуры на контакте алмаза с породой от частоты вращения

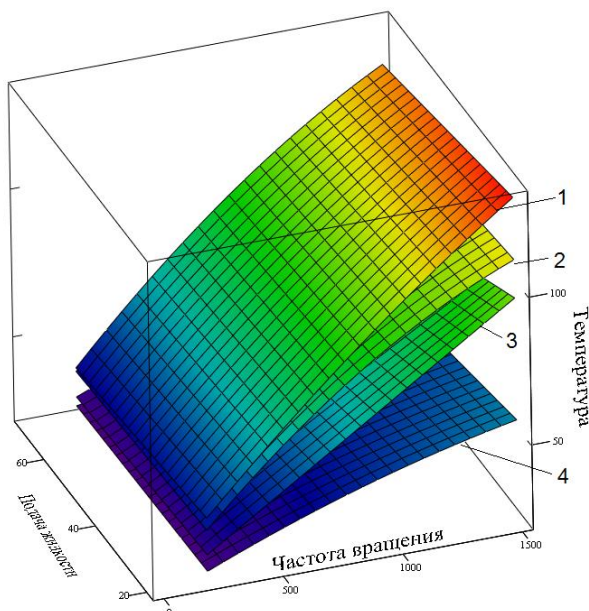


Рисунок 2.44 – График зависимости температуры на контакте алмаза с породой от частоты вращения и подачи промывочной жидкости коронки диаметром 93 мм:
1 – четыре; 2 – семь; 3 – три; 4 – два радиальных ряда в секторе

Анализ графиков (рисунки 2.43, 2.44) показывает, что *минимальная температура алмазов обеспечивается в коронке с двумя радиальными рядами.*

Это объясняется как равномерностью нагружения всех алмазов, так и более интенсивным охлаждением их промывочной жидкостью, что является одним из преимуществ данной конструкции коронки. При одной и той же толщине слоя породы, снимаемой каждым алмазом за оборот, *температура нагрева алмазов коронки с двумя радиальными рядами в секторе в 1,3–3 раза меньше чем у коронки с четырьмя радиальными рядами*, при этом расчетная температура алмазов на контакте с породой мало изменяется при значительном изменении величины подачи промывочной жидкости (рисунок 2.45).

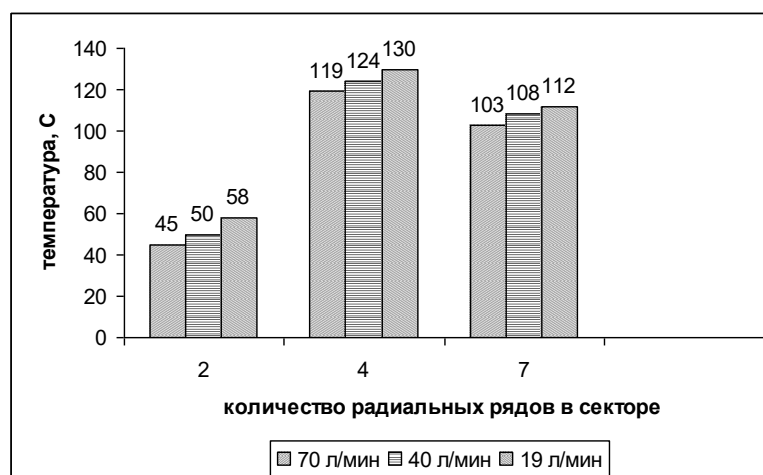


Рисунок 2.45 – Сравнение максимальных температур алмазов для различных коронок при подаче жидкости 19, 40 и 70 л/мин

Кроме того 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 будет на 5-20% меньше чем у коронки с 7 радиальными рядами в секторе* (табл. 19). Причем большая разница будет наблюдаться при частоте вращения 1500 об/мин (рисунок 2.46).

Таблица 19 – Расчетные данные температуры нагрева контакта алмаза с породой (нагрузка, приходящаяся на 1 алмаз одинаковая)

| Количество радиальных рядов в секторе | Кол-во секторов | Всего алмазов в коронке | Расстояние между алмазами в линии резания, мм | Частота вращения, об/мин | | | |
|---------------------------------------|-----------------|-------------------------|---|--------------------------|-----|-----|------|
| | | | | 200 | 600 | 800 | 1500 |
| 7 | 10 | 320 | 5,4 | 45 | 87 | 105 | 153 |
| 4 | 12 | 216 | 6,11 | 41 | 73 | 85 | 124 |

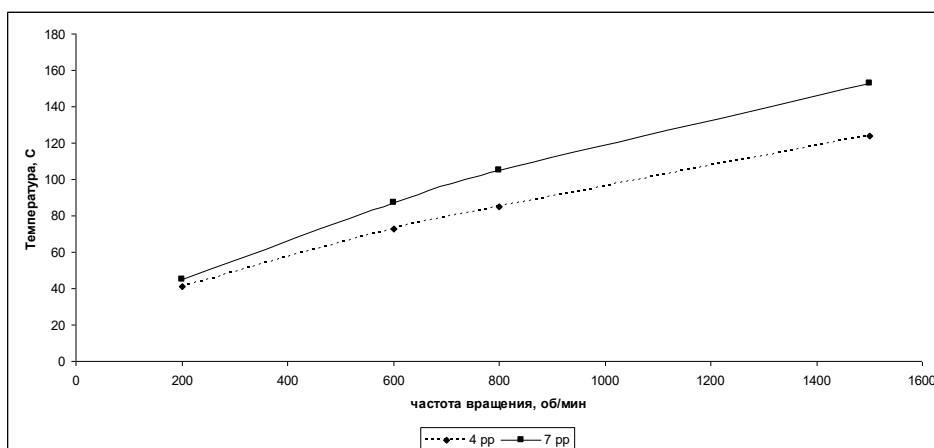


Рисунок 2.46 – График зависимости температуры нагрева алмаза на контакте с породой от частоты вращения для коронок с 4 и 7 радиальными рядами в секторе (осевая нагрузка на алмаз 92 Н, подача промывочной жидкости 40 л/мин)

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% (таблица 20).

Таблица 20 – Максимальная температура (°С) контакта алмаза с породой при бурении коронками с двумя и четырьмя радиальными рядами в секторе диаметром 93 мм при подаче промывочной жидкости 40 л/мин

| Кол-во радиальных рядов в секторе | Осевая нагрузка, кН | Частота вращения, об/мин | | |
|-----------------------------------|---------------------|--------------------------|-----|------|
| | | 600 | 800 | 1000 |
| 4 | 20 | 73 | 85 | 97 |
| | 22 | 78 | 92 | 105 |
| 2 | 20 | 34 | 38 | 42 |
| | 69 | 68 | 81 | 95 |

Согласно графикам, предоставленных на рисунках 2.43, 2.44, 2.46, влияние конструкции коронки на температуру нагрева алмазов ярко выражена при частоте вращения 1500 об/мин и выше. При детальном исследовании данного явления составлены графики, приведенные на рисунке 2.47.

Анализ полученных результатов показал, что при прочих равных условиях температура нагревания алмазов резко повышается с изменением частоты вращения от 200 до 600 об/мин, далее с изменением частоты от 600 до 1000 об/мин прирост температуры не значителен и лишь с превышением частоты вращения 1000 об/мин происходит резкий скачек температуры вверх.

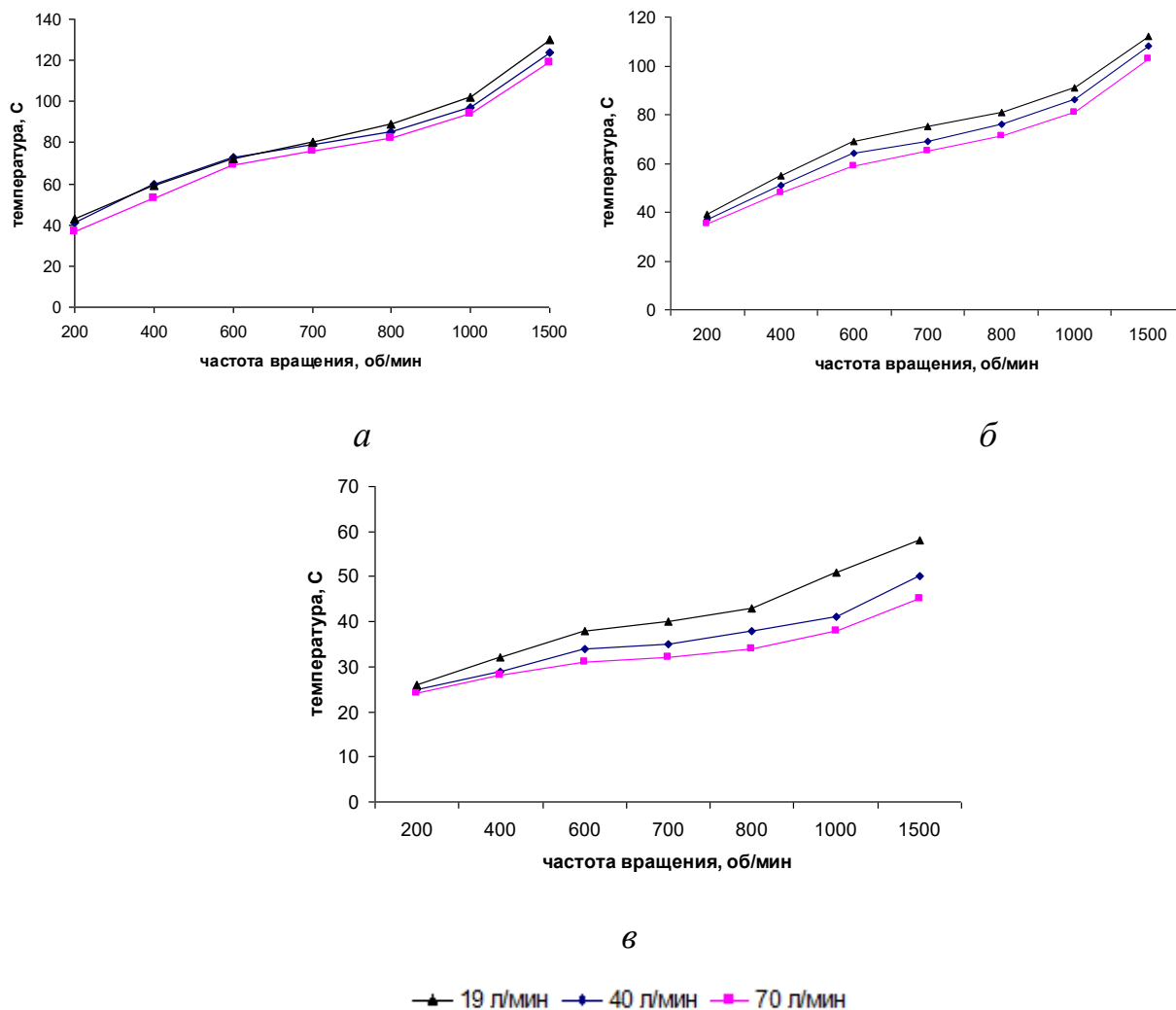


Рисунок 2.47 – График зависимости максимальной температуры нагрева алмазов от частоты вращения коронки с: *a* – 4; *б* – 7; *в* – 2 радиальными рядами в секторе.

На охлаждение алмазов влияет время и объем контактирующей с ними промывочной жидкости. На скорость и направление течения промывочной жидкости, помимо величины ее подачи, влияет частота вращения коронки. В процессе вращения между торцом коронки и жидкостью возникают вязкие напряжения, которые изменяют направление и скорость течения жидкости под сектором коронки.

Результаты детального исследования гидравлического режима работы коронки, основанного на результатах математического моделирования, показали, что чем больше частота вращения, тем больше сила, увлекающая жидкость под торец сектора. На рисунке 2.48 в виде проекции векторов представлена картина

изменения скорости и направления течения жидкости от частоты вращения под торцом сектора коронки в трех параллельно проведенных плоскостях. Длина вектора пропорциональна величине скорости течения жидкости [98].

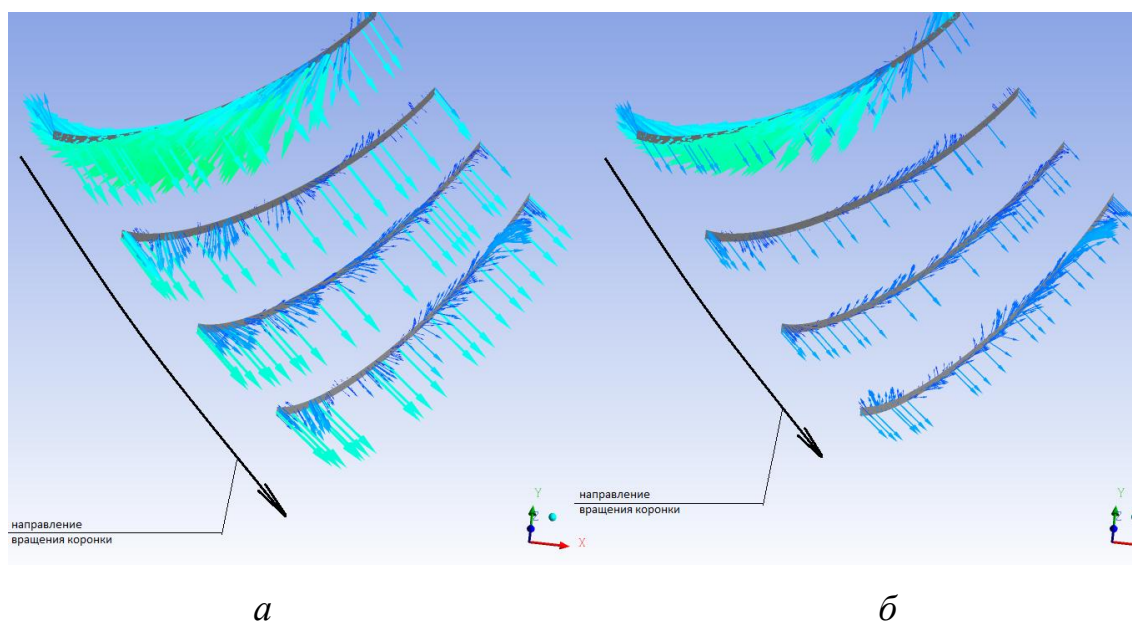


Рисунок 2.48 – Направление и скорость течения промывочной жидкости под торцом сектора с 4 радиальными рядами алмазов в трех параллельно проведенных плоскостях: *а* – частота вращения 800 об/мин; *б* – частота вращения 200 об/мин.

Чем больше частота вращения коронки, тем больший поток жидкости протекает под торцом сектора, а не уходит в боковой промывочный канал (рисунок 2.49).

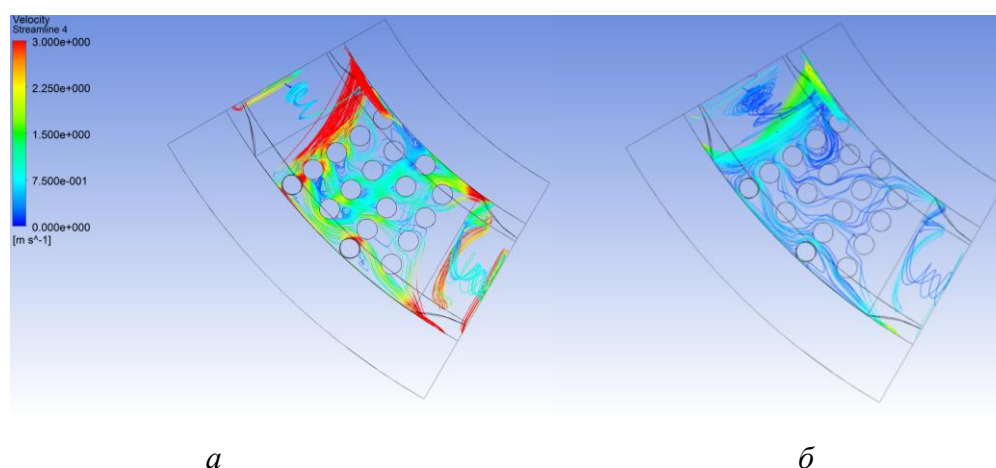


Рисунок 2.49 – Линии тока промывочной жидкости на забое в пределах одного сектора коронки: *а* – частота вращения 800 об/мин; *б* – частота вращения 200 об/мин

Результаты исследования течения жидкости на забое при бурении алмазной коронкой (таблица 21, рисунок 2.50), показали, что при частоте вращения менее 380 об/мин жидкость под торец коронки из боковых промывочных каналов не

поступает, что объясняет более резкий рост температуры нагрева алмазов при повышении частоты вращения коронки с 200 об/мин до 400 об/мин. При частоте вращения 600 об/мин течение жидкости под торцом сектора коронки не значительно, и лишь при частоте вращения более 800 об/мин движение жидкости под торцом коронки способствует эффекту теплоотвода.

Таблица 21 – Результаты моделирования течения жидкости под торцом коронки диаметром 93 мм с 4 радиальными рядами в секторе (осевая нагрузка 20 кН, подача промывочной жидкости 40 л/мин)

| Частота вращения, об/мин | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 |
|-------------------------------|-----------|----------|---------|---------|---------|
| Средний расход жидкости, кг/с | -0,00139* | 0,000122 | 0,00134 | 0,00234 | 0,00320 |

* минус обозначает, что направление жидкости обратно направлению вращения коронки. Течение жидкости исследовалось в направлении с набегающей к сбегающей части торца сектора.

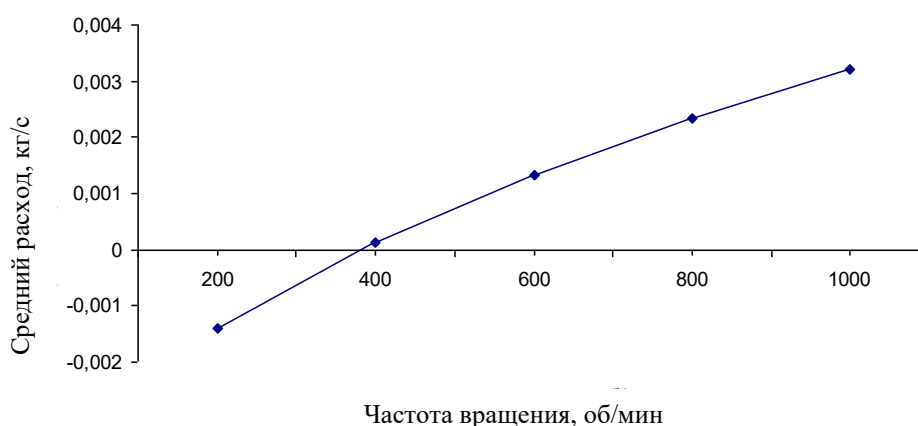


Рисунок 2.50 – График зависимости изменения среднего расхода жидкости под торцом сектора коронки от частоты вращения коронки (коронка диаметром 93 мм с 4 радиальными рядами в секторе, осевая нагрузка 20 кН, подача промывочной жидкости 40 л/мин).

Отсюда следует, что наиболее оптимальным, с точки зрения обеспечения безопасного температурного режима бурения коронками данных конструкций, является *интервал частоты вращения от 600 до 1000 об/мин*. Бурение с частотой вращения свыше 1000 об/мин возможно даже с осевой нагрузкой в 20 кН, т.к. при этом температура нагрева алмазов не достигает критической отметки (термостойкие алмазы выдерживают температуру до 1500°C), но в этом случае преимущественно обладают коронки с количеством радиальных рядов в секторе меньше четырех. Коронки с четырьмя-двумя радиальными рядами в секторе лучше омываются (охлаждаются, очищаются) промывочной жидкостью, имеют

равномерное распределение нагрузки на алмазы коронки и таким образом обладают запасом прочности.

2.4 Рекомендации по выбору геометрических параметров и схем раскладок алмазов для однослойных коронок

Совместное рассмотрение механических, гидравлических и термодинамических процессов на забое скважины при бурении алмазной однослойной коронкой позволило разработать рекомендации к проектированию однослойных алмазных коронок для бурения в породах V–VIII с пропластками до IX категории по буримости.

Основой проектирования однослойных алмазных коронок для бурения в породах V–VIII с пропластками до IX категории по буримости должно быть ограничение количества радиальных рядов в секторах коронки. Уменьшая количество радиальных рядов в секторе коронки необходимо стремиться сохранить площадь рабочей поверхности аналогично серийно выпускаемым однослойным алмазным коронкам для бурения в подобных условиях. Добиться выполнения выше изложенных рекомендации можно за счет увеличения количества промывочных окон и уменьшения при этом длины секторов коронки.

На основании существующих конструкций серийных однослойных коронок и методики [4], разработана серия конструкций коронок с 4 радиальными рядами в секторе (рисунок 2.51).

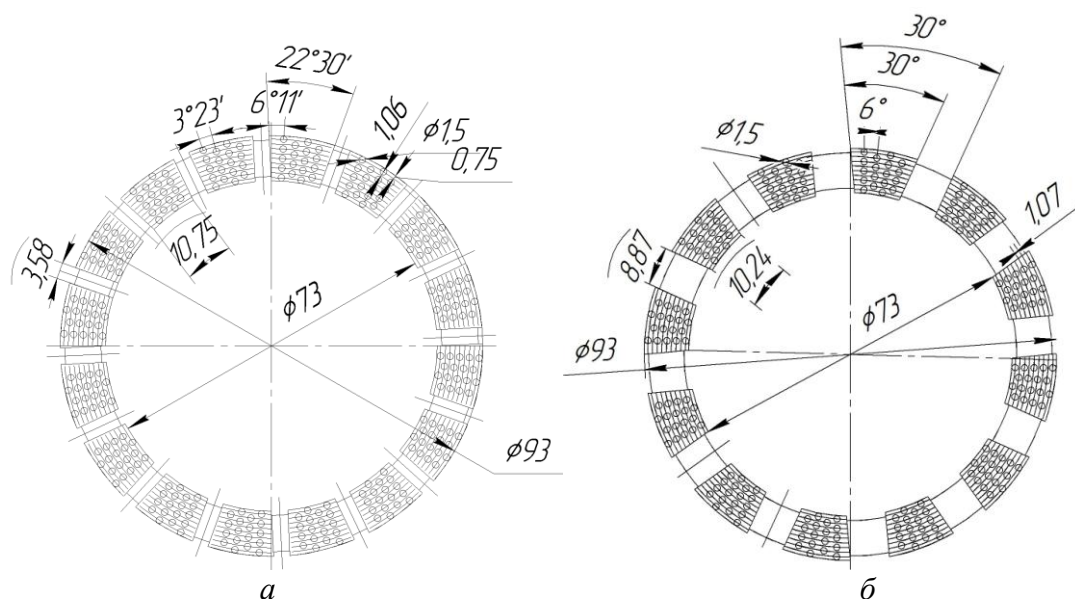


Рисунок 2.51 – Возможные конструкции торца однослойной алмазной коронки с 4 радиальными рядами в секторе:

a – 16 промывочных окон; *б* – 12 промывочных окон

Из предложенных конструкций с наиболее развитой системой промывочных каналов показана на рисунке 2.51 *a* (16 промывочных окон). Согласно методике В. Ф. Чихоткина [5] длина промывочных окон определяется по формуле:

$$l_n = \frac{Q}{(16...31) \cdot 10^2 V_M h_c n_o}, \quad (2.46)$$

где V_M – механическая скорость бурения (примем среднее значение для алмазного бурения по породам VI – IX категории по буримости, как для области бурения проектируемой коронкой $V_M = 5 \text{ м/ч} = 0,083 \text{ м/мин}$); h_c – высота сектора промывочного окна (принимается значение серийных коронок $h = 3 \text{ мм} = 0,003 \text{ м}$); n_o – количество промывочных окон; $(16...31) \cdot 10^2$ – граничные значения шламового режима; Q – расход бурового раствора, $\text{м}^3/\text{мин}$.

Расход бурового раствора должен обеспечивать необходимую степень охлаждения и очистки алмазного инструмента.

Согласно [36], подача промывочной жидкости рассчитывается по формуле:

$$Q = \frac{\pi}{4} (D^2 - d_n^2) v_s, \quad (2.47)$$

где D – диаметр скважины, м (принимаем значение равное наружному диаметру коронки $D = 0,093 \text{ м}$); d_n – наружный диаметр бурильных труб, м (для алмазного

бурения коронкой 93 мм принимаем бурильные трубы ЛБТН-68 $d_n=0,068\text{м}$); v_s – необходимая скорость восходящего потока, м/с.

$$v_s = k_n(u + c), \quad (2.48)$$

где $k_n=1,1\div 1,3$ – коэффициент, учитывающий неравномерность скорости движения восходящего потока по сечению скважины; u – скорость падения частиц, м/с.

$$u = k_\phi \sqrt{d_0(\delta - \rho_s) / \rho_s}, \quad (2.49)$$

где k_ϕ – коэффициент, зависящий от формы частиц (для частиц шарообразной формы $k_\phi=5,11$); d_0 – диаметр частицы шлама, м; δ – плотность частицы шлама, кг/м³; ρ_s – плотность восходящего потока промывочной жидкости, т.е. насыщенной шламом (для воды $\rho_s=1100$ кг/м³); c – величина желаемой скорости выноса шлама (в прикладных расчетах предлагается принять $c=(0,1\div 0,3) u$).

Для аналитического исследования примем в качестве породы гранит ($\delta=2600$ кг/м³), диаметр частицы шлама половине диаметра алмаза ($d_0=0,5\cdot 0,015=0,00075\text{м}$), как максимально возможное значение. В качестве промывочной жидкости – воду ($\rho=1000$ кг/м³; $v=10^{-6}\text{м}^2/\text{с}$).

$$u = 5,11 \sqrt{\frac{0,00075(2600 - 1100)}{1100}} = 0,163 \text{ м/с}$$

$c=(0,0163\div 0,0489)$ м/с, принимаем верхний предел, учитывая, что коронка предназначена для бурения глубоких скважин высокими механическими скоростями с промывкой водой.

$$v_s = 1,2(0,163 + 0,0489) = 0,25 \text{ м/с}$$

$$Q = \frac{\pi}{4} (0,093^2 - 0,068^2) \cdot 0,25 = 0,000138 \text{ м}^3/\text{с} = 8,28 \text{ л/мин.}$$

По характеристике серийного бурового насоса принимаем подачу 40 л/мин=0,04 м³/мин.

Тогда по формуле (2.46) необходимая длина промывочного окна проектируемой коронки будет в пределах:

$$l_n = \frac{0,04}{(16...31) \cdot 10^2 \cdot 0,083 \cdot 0,003 \cdot 16} = (0,0062...0,0032) \text{ м}$$

Т.е. длина промывочного окна может быть не больше 6,2 мм, но не меньше 3,2 мм, что соблюдается в выбранной конструкции ($l_{п}=3,58$ мм) (рисунок 2.48 а).

Расчет подачи жидкости в скважину по методике [36] учитывает параметры необходимые для беспрепятственного выноса шлама (при прочих равных условиях), однако для чистоты аналитического исследования целесообразно рассмотреть данный процесс с точки зрения других методик [18, 44].

Скорость течения жидкости в каналах коронки должна быть больше критической скорости (такой скорости течения, при которой частицы шлама будут оставаться во взвешенном состоянии). Согласно методике Б. Б. Кудряшова [18] критическую скорость течения жидкости можно найти из формулы:

$$\omega_0 = \frac{\nu \cdot Re}{d_0}, \quad (2.50)$$

где ω_0 – критическая скорость, м/с; ν – кинематическая вязкость, м²/с; Re – параметр Рейнольдса.

$$Re = 10^{\left(\sqrt{\frac{\lg Li + 1.25}{0.1224}} - 4.3\right)}, \quad (2.51)$$

где Li – параметр Лященко.

$$Li = \frac{Ar \cdot \pi}{6}, \quad (2.52)$$

где Ar – параметр Архимеда.

$$Ar = \frac{gd_0^3(\delta - \rho)}{\rho\nu^2}, \quad (2.53)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³.

$$Ar = \frac{9.81 \cdot 0.00075^3 \cdot (2600 - 1000)}{1000 \cdot (10^{-6})^2} = 6621,75$$

$$Re = 10^{\left(\sqrt{\frac{\lg 3467.2478 + 1.25}{0.1224}} - 4.3\right)} = 90$$

$$\omega_0 = \frac{10^{-6} \cdot 90}{0,00075} = 0,12 \text{ м/с.}$$

Следовательно, при проектировании конструкции коронки должно выполняться условие:

$$Q > \omega_0 \cdot F \quad (2.54)$$

Площадь течения жидкости в промывочном окне коронки с 16 промывочными окнами (рисунок 2.51 а):

$$F=l_0 \cdot h=0,00358 \cdot 0,003=0,00001074 \text{ м}^2.$$

Тогда критическая подача жидкости (подача необходимая для удержания частиц шлама во взвешенном состоянии) будет равна:

$$Q_{кр} = \omega_0 \cdot F = 0,12 \cdot 0,00001074 \cdot 16 = 0,00002 \text{ м}^3/\text{с} = 1,23 \text{ л/мин.}$$

Согласно условию (2.54) подача промывочной жидкости в скважину должна быть больше критической:

$$Q > Q_{кр};$$

$$40 \text{ л/мин} > 1,23 \text{ л/мин,}$$

Условие (2.54) соблюдается, согласно методике [18] принятые значения подачи и размеров промывочного окна позволяют осуществлять вынос шлама.

По методике, основанной на учете гидравлической мощности потока очистного агента, подводимой к рабочему на забое алмазному инструменту [36], расход очистного агента определяется по зависимости:

$$Q = \frac{33P_2}{\Delta P_k}, \quad (2.55)$$

где P_2 – гидравлическая мощность, создаваемая потоком очистного агента, кВт; ΔP_k – падение давления потока очистного агента в промывочных каналах коронки, обеспечивающее требуемую степень очистки и охлаждения алмазной коронки, МПа; 33 – размерный пересчетный коэффициент.

Для обеспечения необходимой степени очистки алмазного инструмента от шлама перепад давления в потоке должен составить:

$$\Delta P_k = \frac{5,32 \cdot 10^{-5} \rho_g v^2}{g}, \quad (2.56)$$

Методика гласит, что для расчетов по формуле (2.55) необходимо, чтобы $\Delta P_k \geq 1 \text{ МПа}$. Из заданного условия примем, что $\Delta P_k = 1 \text{ МПа}$, как близкое к критическому значению.

Из (2.56) скорость движения очистного агента в каналах коронки канала, необходимая для выноса шлама составит:

$$v = \sqrt{\frac{\Delta P_k \cdot g}{5,35 \cdot 10^{-5} \rho_g}} = \sqrt{\frac{1 \cdot 9,81}{5,32 \cdot 10^{-5} \cdot 1100}} = 12,94 \text{ м/с}$$

Подачу промывочной жидкости, которая обеспечит данную скорость можно найти, зная, что площади сечения торцевого промывочного окна $0,00001074 \text{ м}^2$:

$$Q = v \cdot F = 12,94 \cdot 0,00001074 = 0,000138 \text{ м}^3/\text{с} = 8,3 \text{ л/мин},$$

Что соответствует значению, рассчитанному по формуле (2.47).

В [44] основным направлением исследования является обоснование длины сектора, влияющей на концентрацию шлама под торцом коронки. Для нормального режима бурения необходимо, чтобы объем образующегося и удаляемого из-под торца шлама был одинаков.

Объем образующегося шлама можно определить по формуле:

$$V = V_m \pi D_{cp} b K_p \alpha, \quad (2.57)$$

где D_{cp} – средний диаметр коронки, м; b – ширина матрицы коронки, м; K_p – коэффициент разрыхления шлама (для гранита по [2] $K_p=8$); α – угол поворота сектора коронки при ее вращении, рад.

Объем шлама, который может быть удален в единицу времени с забоя скважины:

$$V_{y0} = h_3 b V_{отн}, \quad (2.58)$$

где $V_{отн}$ – относительная скорость перемещения частиц (для шлама $V_{отн}=0,25V_m$); h_3 – величина зазора между матрицей коронки и забоем скважины. Проектируемая коронка имеет заданный выпуск алмазов $h_6 = \frac{1}{3} d_a$, глубина внедрения алмаза

$h_a = \frac{1}{3} h_6 = \frac{1}{9} d_a$, отсюда $h_3 = \frac{2}{9} d_a$ (для синтетического алмаза $d_a=1,5 \text{ мм}$ $h_3 = 0,334 \text{ мм}$).

Принимаем длину дуги поворота коронки $\pi D_{cp} \alpha$ равную длине сектора l_c .

Приравнивая (2.57) и (2.58) получим:

$$l_c = \frac{h_3}{K_p} = \frac{0,334}{8} = 0,04 \text{ мм} \quad (2.59)$$

Как видно из полученного значения, методика [44] рассчитана лишь на конструкции импрегнированных коронок и для однослойных коронок с заданным выпуском алмазов дает сомнительные результаты.

Снижая количество радиальных рядов, уменьшается как длина промывочного окна, так и длина сектора коронки. Для проверки прочности сектора принятой длины определим напряжения при изгибе, возникающие в секторе во время бурения. Согласно [8], расчетные значения напряжений при изгибе можно получить из формулы:

$$\sigma_{изг} = \frac{12Pf_{mp}h}{ml_c^2(D-d)}, \quad (2.60)$$

где P – осевая нагрузка на коронку, Н; f_{mp} – коэффициент трения коронки о породу; m – количество секторов; D – наружный диаметр коронки, м; d – внутренний диаметр коронки, м.

$$\sigma_{изг} = \frac{12 \cdot 10000 \cdot 0,5 \cdot 0,003}{16 \cdot 0,01075^2 (0,093 - 0,073)} = 4857495,944 \text{ Па} = 4,86 \text{ МПа}.$$

Предел прочности на изгиб образцов ВК6+Cu, пропитанных медью в вакууме, колеблется в пределах от 892 до 1300 МПа в зависимости от содержания и зернистости гранул ВК6, следовательно запас прочности сектора длиной 10,75 мм будет достаточным для проведения буровых работ в любых условиях.

На рисунке 2.52 показана конструкция коронки с 7 радиальными рядами в секторе, раскладка алмазов и конструктивные размеры торца которой рассчитанные по методике Н. В. Цыпина [4]. Длина сектора (по меньшему диаметру) данной коронки $l_c=17,2$ мм, а длина промывочного окна $l_{п}=5,89$ мм, т.е. длина промывочного окна составляет 34,2% от длины сектора. Допустим при прохождении данной коронкой длины 23,09 мм ($l_c+l_{п}=23,09$ мм) на разрушение породы тратится 100% времени, тогда исходя из конструктивных значений сектора и окна 25,5% ($5,89 \cdot 100 / 23,09 = 25,5$) из этого времени расходуется на вынос разрушенного шлама.

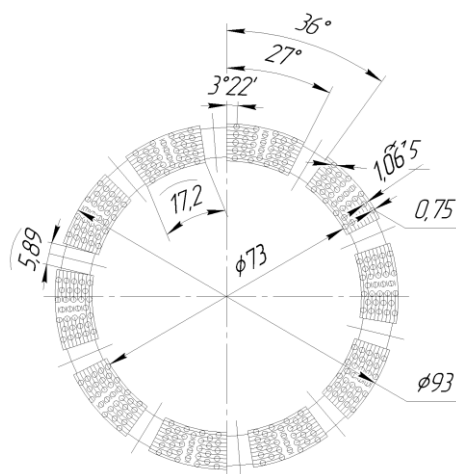


Рисунок 2.52 – Чертеж торца коронки с 7 радиальными рядами в секторе

В проектируемой коронке (рисунок 2.51 а) длина сектора (по меньшему диаметру) $l_c=10,75$ мм, длина промывочного окна $l_{п}=3,58$ мм, в данном случае длина промывочного окна составляет 33,3% от длины сектора, что всего на 0,9% меньше. Аналогичным способом выходит, что при разрушении породы из 100% времени 25% расходуется на вынос шлама.

Серийно изготавливаемая коронка, показанная на рисунке 2.53, в процессе бурения в производственных условиях показала плохие результаты по выносу шлама (наблюдался прижог). Данная коронка имеет длину сектора (по меньшему диаметру) $l_c=30$ мм, длину промывочного окна $l_{п}=5$ мм, т.е. длина промывочного окна составляет 16,6% от длины сектора. Следовательно, из 100% времени на разрушение породы при такой конструкции всего лишь 14,3 % расходуется на промывку, что объясняет явление прижога во время бурения.



Рисунок 2.53 – Торец, серийно изготавливаемой однослойной алмазной коронки

Итак, промывочная система, состоящая из 16 окон позволяет решить проблему зашламования сектора при условии, что значение длины промывочного окна находится в пределах от 3,2 мм до 6,2 мм при подаче жидкости 40 л/мин, соотношение длины окна к длине сектора составляет 0,3.

Увеличение подачи, при неизменных размерах промывочного окна, приведет к увеличению давления, что на больших глубинах бурения будет актуально для улучшения выноса шлама.

Высокие контактные напряжения и температура, влияющие на работоспособность алмазных буровых коронок, выдвигают особые требования к алмазному сырью, используемому для их оснащения. Синтетические алмазы должны иметь высокие коэффициенты однородности по прочности и линейным размерам, а также термостабильности.

В коронках с многорядными секторами целесообразно в качестве алмазов первых двух радиальных рядов сектора использовать как более прочные, так и более термостойкие алмазы, причем большей термостойкостью должны обладать алмазы второго ряда. Таким образом, обеспечивается не только рациональное использование алмазного сырья, но и сохраняется качество работы коронки.

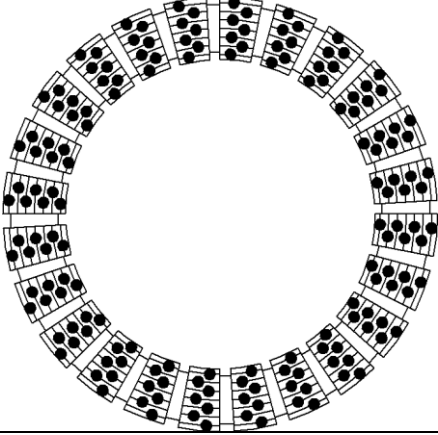
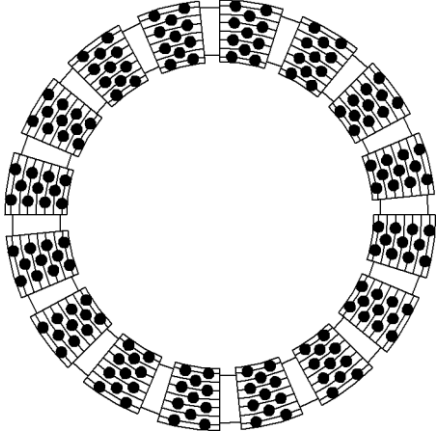
Синтезированные в институте сверхтвердых материалов термостойкие монокристаллические алмазы с размером зерна 1600/1250 мкм могут иметь различную прочность. Прочностные характеристики партий этих алмазов показаны в таблице 22.

Таблица 22 – Прочностные характеристики монокристаллов зернистостью 1600/1250 мкм

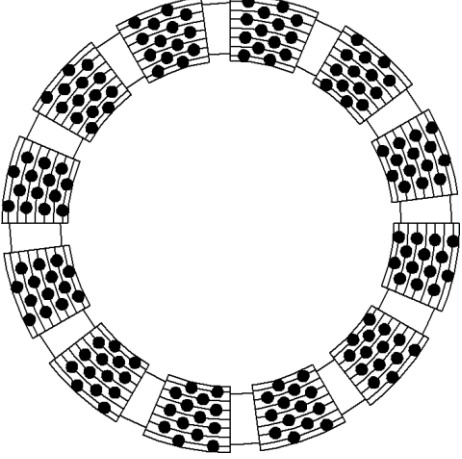
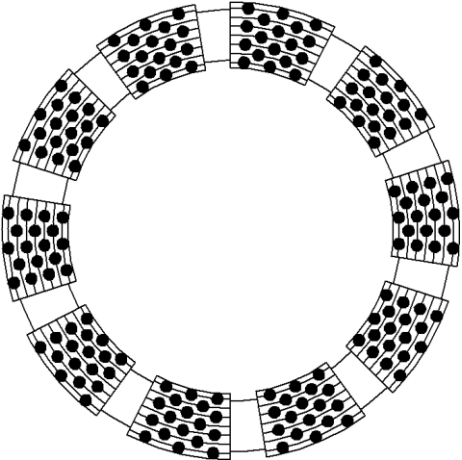
| Номер партии монокристаллов | Разрушающая нагрузка, P , Н | |
|-----------------------------|-------------------------------|----------------------|
| | исходная | После термообработки |
| 1 | 1630 | 1300 |
| 2 | 2160 | 1250 |
| 3 | 1900 | 840 |
| 4 | 1740 | 740 |

Пример возможных схем раскладок данного сырья, согласно приведенным рекомендациям, показан в таблице 23.

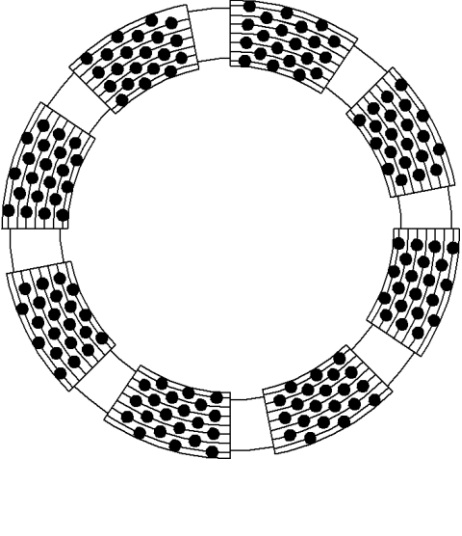
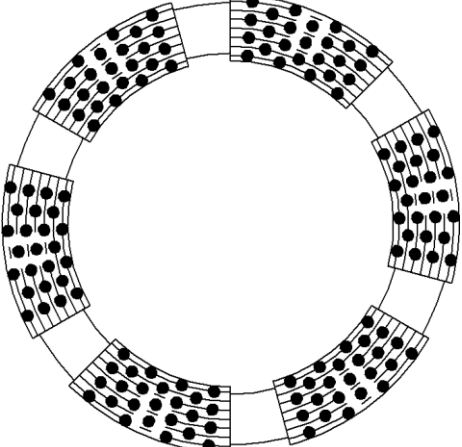
Таблица 23 – Варианты раскладок алмазов на торце однослойных коронок на примере коронки диаметром 59мм

| Конструкция коронки | КОЛИЧЕСТВО | | | № партии алмазов радиального ряда | | | | | | | Осевая нагрузка на единственный алмаз, Н | Углубка за оборот, мм | Осевая нагрузка на коронку, кН |
|---|------------|---------|---------------|-----------------------------------|---|---|---|---|----|----|--|-----------------------|--------------------------------|
| | секторов | алмазов | радиал. рядов | | | | | | | | | | |
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|  | 24 | 168 | 2 | 1 | 1 | - | - | - | - | - | 130 | 0,43 | 21,8 |
| | | | | 2 | 2 | - | - | - | - | - | 125 | 0,42 | 21 |
| | | | | 3 | 3 | - | - | - | - | - | 84 | 0,26 | 14 |
| | | | | 4 | 4 | - | - | - | - | - | 74 | 0,24 | 12 |
|  | 16 | 176 | 3 | 1 | 1 | 1 | - | - | - | - | 130 | 0,43 | 22 |
| | | | | 2 | 1 | 3 | - | - | - | - | 84 | 0,26 | 14,7 |
| | | | | 2 | 2 | 3 | - | - | - | - | | | |
| | | | | 1 | 1 | 3 | - | - | - | - | | | |
| | | | | 2 | 1 | 4 | - | - | - | - | 74 | 0,24 | 13,0 |
| | | | | 2 | 2 | 4 | - | - | - | - | | | |
| | | | | 1 | 1 | 4 | - | - | - | - | | | |

Продолжение таблицы 23

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|---|----|-----|---|---|---|---|---|---|----|----|-----|------|------|
|  | 12 | 168 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | - | - | - | 130 | 0,43 | 21,8 |
| | | | | 1 | 1 | 2 | 2 | - | - | - | 125 | 0,42 | 21 |
| | | | | 1 | 1 | 3 | 3 | - | - | - | 84 | 0,26 | 14,1 |
| | | | | 2 | 2 | 3 | 3 | - | - | - | | | |
| | | | | 1 | 1 | 4 | 4 | - | - | - | 74 | 0,24 | 12,4 |
| | | | | 2 | 2 | 4 | 4 | - | - | - | | | |
| | | | | 3 | 3 | 4 | 4 | - | - | - | | | |
|  | 10 | 180 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | - | - | - | 130 | 0,45 | 23 |
| | | | | 2 | 1 | 3 | 3 | 3 | - | - | 84 | 0,27 | 15,1 |
| | | | | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | - | - | | | |
| | | | | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | - | - | | | |
| | | | | 3 | 1 | 4 | 4 | 4 | - | - | 74 | 0,25 | 13,3 |
| | | | | 2 | 1 | 4 | 4 | 4 | - | - | | | |
| | | | | 1 | 1 | 4 | 4 | 4 | - | - | | | |
| | | | | 2 | 2 | 4 | 4 | 4 | - | - | | | |
| | | | | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | - | - | | | |

Продолжение таблицы 23

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|--|---|-----|---|---|---|---|---|---|----|----|-----|------|------|
|  | 8 | 168 | 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | - | 130 | 0,43 | 21,8 |
| | | | | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | - | 125 | 0,42 | 21 |
| | | | | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | - | 84 | 0,26 | 14,1 |
| | | | | 1 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | - | 74 | 0,24 | 12,4 |
|  | 6 | 150 | 7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 130 | 0,37 | 19,5 |
| | | | | 2 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 84 | 0,23 | 12,6 |
| | | | | 2 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 74 | 0,21 | 11,1 |

Используя предложенный способ раскладки алмазов (таблица 23), можно получить следующие результаты:

1. при работе на форсированном режиме в коронке с двумя радиальными рядами запас прочности составит 6-10 для алмазов различных партий монокристаллов;

2. для коронки с четырьмя радиальными рядами для первых двух рядов этот показатель составит 6,25-6,5 при условии использования алмазов первых двух партий. Для третьего и четвертого ряда запас прочности будет находиться в пределах 14,8-16,8 даже при условии использования алмазов третьей и четвертой партий;

3. для коронки с шестью радиальными рядами по аналогии имеем запас

прочности равный, соответственно, 5,9-6,1 и 9,1-10,3.

Таким образом, исходя даже из пятикратного запаса прочности, можно сделать вывод о возможности использования имеющихся алмазов во всех приведенных выше конструкциях коронок. Естественно, при меньших осевых нагрузках ситуация будет ещё более благоприятной с точки зрения обеспечения прочности алмазных монокристаллов при работе на забое.

Результаты моделирования подтверждают первоначальные предположения о перспективности использования однослойных алмазных коронок I типа раскладки с двумя рядами в секторе. Кроме равномерного распределения нагрузки на алмазные резцы и лучшей очистки забоя от шлама имеется ещё одно преимущество: при равных условиях максимальная температура нагрева алмазов коронки диаметром 93 мм с двумя радиальными рядами в секторе в 1,3-3 раза меньше даже чем у коронки с четырьмя радиальными рядами.

Отличительной особенностью распределения температур в двухрядной коронке является более выраженный нагрев периферийных алмазов, обусловленный более высокими окружными скоростями резания. В связи с этим, в реальных конструкциях коронок на периферийных линиях резания целесообразно использовать алмазы, отличающиеся большей термостойкостью.

Рассматривая возможную перспективность двухрядных коронок для внедрения в практику буровых работ, был проведен анализ их эффективности в зависимости от следующих конструктивных параметров: расстояния между рядами алмазов (L_p), длины сектора (L_c), длины окна промывочного канала (L_k). В результате проведенных расчетов были определены следующие рациональные соотношения между конструктивными параметрами коронки [50, 51]: длина окна промывочного канала равна расстоянию между рядами алмазов ($L_k = L_p$); длина сектора равна трем длинам окна промывочного канала ($L_c = 3 L_k$); сумма длин сектора и окна промывочного канала находится в пределах 5-5,5 диаметров объемных алмазов ($L_c + L_k = 5 \div 5,5 d_a$).

Следующими по эффективности являются коронки с четырьмя радиальными рядами.

В конструкции коронки с четырьмя радиальными рядами в секторе рекомендуется использовать в одном секторе алмазы различных групп прочности. Причем прочность алмазов первых двух радиальных рядов (P_1) и алмазов других радиальных рядов (P_2) должны быть связаны отношением $P_1 = P_2 \cdot l_k / l_a$.

Таким образом, проведенный комплекс исследований позволил разработать новый подход в конструировании алмазных однослойных коронок. Дальнейшее развитие разработки нового породоразрушающего инструмента с синтетическими алмазными монокристаллами будет направлено на создание коронок с двумя радиальными рядами в секторе, которые, по предварительной оценке, будут более эффективными.

Выводы по главе 2

1. Нагрузка на алмазы первого рабочего ряда сектора может превышать нагрузку на последующие ряды сектора в более чем 2 раза, что зависит от отношения расстояния в линии резания между первыми алмазами сектора и последними алмазами впередиидущего сектора (l_k) к расстоянию между алмазами внутри сектора (l_a) ($k = l_k / l_a$).
2. Одинаковая толщина слоя породы, снимаемого каждым алмазом, наблюдается лишь при использовании коронок с двумя радиальными рядами алмазов, которые раскладываются в секторе по I типу.
3. Для коронок с раскладкой алмазов по II типу характерно следующее: 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 %).
4. Температура (T) на контакте алмаза с породой зависит от частоты вращения (n) снаряда и подачи промывочной жидкости (q) следующим образом:

- для коронок с семью радиальными рядами в секторе:

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

- для коронок с четырьмя радиальными рядами в секторе:

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

- для коронок с тремя радиальными рядами в секторе:

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

- для коронок с двумя радиальными рядами в секторе:

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

5. Коронки с двухрядной раскладкой имеют ресурс для форсирования режимов бурения, что позволит повысить механическую скорость проходки скважины.
6. Основа проектирования однослойных алмазных коронок – ограничение количества радиальных рядов в секторах коронки.
7. Прочность алмазов первых двух радиальных рядов (P_1) и алмазов других радиальных рядов (P_2) должны быть связаны отношением $P_1 = P_2 \cdot l_k / l_a$.
8. Длина окна промывочного канала должна быть равна расстоянию между рядами алмазов ($L_k = L_p$); длина сектора равна трем длинам окна промывочного канала ($L_c = 3 L_k$); сумма длин сектора и окна промывочного канала должна находиться в пределах 5-5,5 диаметров объемных алмазов ($L_c + L_k = 5 \div 5,5 d_a$).

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АЛМАЗНОЙ ОДНОСЛОЙНОЙ КОРОНКА С ЗАБОЕМ СКВАЖИНЫ В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ

3.1 Цели экспериментальных работ, состав экспериментальных стендов

Для получения достоверного вывода об эффективности применения многосекторных однослойных алмазных коронок, армированных синтетическими алмазными монокристаллами зернистостью 1600/1250 мкм с повышенной термостойкостью для бурения в породах V-VIII с пропластками до IX категории по буримости необходимо проведение экспериментального исследования процесса.

Автором выполнены опытные работы, целями которых являются:

- определение степени влияния длины сектора коронки на очистку забоя скважины;
- определение влияния количества радиальных рядов в секторе коронки на механическую скорость бурения;
- определение возможности использования и степени износа синтетических алмазных монокристаллов зернистостью 1600/1250 мкм с повышенной термостойкостью в процессе бурения геологоразведочных скважин.

В ходе экспериментальных исследований определялись:

- 1) механическая скорость бурения;
- 2) износ алмаза по высоте.

Испытания, проходившие в Институте сверхтвердых материалов, осуществлялись в лабораторных условиях на экспериментальном стенде, выполненном на основе модернизированного радиально-сверлильного станка модели 2Н58 (рисунок 3.1) с мощностью двигателя основного привода 13 кВт, дополнительно оснащенного гидравлической системой подачи и системой промывки скважины. Гидравлическая система предназначена для плавного

регулирования величины осевой нагрузки. Она состоит из пульта управления регулированием давления в гидросистеме, шлангов высокого давления и исполнительного гидроцилиндра, установленного на сверлильной головке станка. Пульт управления, оснащенный насосом Г-12-21А и регулятором давления РД-4, обеспечивает плавное регулирование осевой нагрузки на коронку в пределах 0-2500 даН. В станке имеется многоскоростной редуктор, позволяющий ступенчато регулировать частоту вращения от 35 до 1250 об/мин. Кроме этого станок оборудован редуктором, который обеспечивает принудительную механическую подачу шпинделя в диапазоне от 0,063 до 3,15 мм, что позволяет проводить исследования при постоянной механической скорости бурения и разных сочетаниях частоты вращения и осевой нагрузки. В таблице 24 приведены значения возможной механической скорости бурения при определенном сочетании частоты вращения инструмента и механической скорости подачи шпинделя станка 2Н58.



Рисунок 3.1 – Экспериментальный стенд (ИСМ)

Таблица 24 – Механическая скорость бурения, которая достигается при различном сочетании частоты вращения инструмента и механической скорости подачи шпинделя станка 2Н58

| Углубка за оборот, мм | Частота вращения инструмента, об/мин | | | | | | | |
|-----------------------|--------------------------------------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|
| | 250 | 315 | 400 | 500 | 630 | 800 | 1000 | 1250 |
| 0,063 | 0,945 | 1,19 | 1,512 | 1,89 | 2,38 | 3,024 | 3,78 | 4,725 |
| 0,08 | 1,2 | 1,512 | 1,92 | 2,4 | 3,024 | 3,84 | 4,8 | 6,0 |
| 0,100 | 1,5 | 1,89 | 2,4 | 3,0 | 3,78 | 4,8 | 6,0 | 7,5 |
| 0,125 | 1,875 | 2,362 | 3,0 | 3,75 | 4,725 | 6,0 | 7,5 | 9,375 |
| 0,160 | 2,4 | 3,024 | 3,84 | 4,8 | 6,048 | 7,68 | 9,6 | 12 |

Для измерения и регистрации с необходимой точностью параметров, которые характеризуют процесс бурения, установка оснащена следующей измерительной аппаратурой: ватметром Н-395, двухкомпонентным динамометром, тензоусилимелем УТ 4-1, шлейфовым осциллографом Н-117.

Для исключения влияния колебаний в электрической линии в цепь питания приборов был включен стабилизатор напряжения З-0,9.

Самопишущий ватметр позволяет наблюдать визуально и делать запись на бумажной лентовой диаграмме величину энергии, затрачиваемую коронкой при разрушении горной породы на протяжении всего времени проведения эксперимента.

Двухкомпонентный динамометр предназначен для определения осевой нагрузки и крутящего момента, переданных породоразрушающим инструментом на горную породу, при использовании фиксированной механической подачи инструмента на забой скважины. При небольших габаритах динамометр имеет достаточную устойчивость и позволяет измерять крутящий момент и осевое усилие в широких пределах с большой точностью.

Принцип работы двухкомпонентного динамометра лежит в преобразовании упругой деформации рабочих элементов в электрический сигнал с помощью изменения электрического сопротивления тензодатчиков. Тензодатчики БКП-10 с сопротивлением 100 Ом наклеены на рабочий элемент динамометра по симметрично-мостовой схеме.

Электронная система динамометра обеспечивает стабильную точность измерения величин осевого усилия и крутящего момента и имеет высокую

чувствительность. Схема уравнивания в электронной схеме представляет собой тензометрический мост, где равняются опоры рабочих (деформирующихся) и компенсационных тензодатчиков, включающиеся в смежные плечи измерительного моста.

Получаемая при нагрузках на рабочий элемент разница тока в измерительной диагонали при разбалансировке моста подается на тензометрический усилитель УТ 4-1. После усиления полученной величины электрического сигнала осуществляется регистрация его с помощью шлейфового осциллографа Н-117 на фотобумагу УФ-67 со скоростью протяжения от 5 до 20 м/с.

Для измерения износа алмаза по высоте после проведения испытаний использовалось специальное устройство – измерительная стойка с индикаторной головкой типа МИГ-1, позволяющая делать измерения с точностью до 1 мкм (рисунок 3.2). За счет дополнительного оснащения измерительной стойки вертикальной призмой коронка при каждом следующем измерении может быть зафиксирована в том же самом положении по соответствующим отметкам.



Рисунок 3.2 – Измерительная стойка с индикаторной головкой типа МИГ-1

В Донецком национальном техническом университете испытания коронок проводились в лабораторных условиях (рисунок 3.3.) на буровом станке СКБ-4, промывка обеспечивалась насосом НБЗ-120/40. Перед выполнением работ проведено тарирование системы передачи и регистрации осевого усилия гидросистемой станка динамометром типа ДОСМ-3-3 с классом точности I. Предел измерения динамометра – 3 000 даН. Заданные по дрелометру и

полученные значения осевой нагрузки (на динамометре) сравнивались и определялись расхождения этих показателей, что позволило оценить и скорректировать значения осевого усилия. Возможные неточности воспроизводства осевого усилия буровым станком могут быть связаны с неисправностями гидросистемы станка и с погрешностями, которые предопределены неисправностями механических частей системы.



Рисунок 3.3 – Экспериментальные исследования в лабораторном комплексе ДонНТУ

В ИСМ экспериментальное бурение осуществлялось по монолитным образцам размером $1 \times 1,5 \times 1 \text{ м}$, для исследования в лабораторном комплексе ДонНТУ использовался керн породы большего диаметра. С целью получения достоверных результатов, в лабораториях кафедры "Строительства зданий, подземных сооружений и геомеханики" ДонНТУ была проведена проверка всех перебуриваемых в процессе эксперимента образцов породы на прочность при сжатии. Образец породы в форме цилиндра высотой 45мм, диаметром 45мм испытывался на экспериментальной установке типа ПСУ-15 (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Установка ПСУ-15: *а* – общий вид; *б* – датчик прибора (показание 200 кН)

Предел прочности породы на сжатие определялось по формуле:

$$\sigma_{сж} = \frac{P}{S} \quad (3.1)$$

$$S = \frac{\pi \cdot 0.045^2}{4} = 0.0016 \text{ м}^2; \quad \sigma_{сж} = \frac{200 \cdot 10^3}{0,0016} = 125000000 \text{ Па} = 125 \text{ МПа}$$

Коэффициент крепости пород по М. М. Протодьяконову в системе СИ рассчитывается по формуле:

$$f = 0.1 \sigma_{сж} \quad (3.2)$$

$$f = 0.1 \cdot 125 = 12,5$$

Согласно шкале классификации горных пород по крепости (по Протодьяконову), образцы пород относятся к III-II категории (крепкие и очень крепкие породы) (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Характер разрушения образца породы при одноосном сжатии

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

Погрешности и прямого и косвенного измерения зависят от точности измерительных устройств. При проведении инструментальных измерений, а также при визуальном снятии показаний за наибольшую погрешность, исходя из рекомендаций [73], принята половина деления шкалы прибора (инструмента).

Определенные погрешности измерений по методике [72] не превышают 4%, что вписывается в принятые при исследованиях процесса бурения (10%) пределы [74].

Исследовалась механическая скорость бурения в зависимости от частоты вращения, осевой нагрузки и количества промывочной жидкости.

Результаты отсчета одной и той же величины отличались друг от друга вследствие несовершенства измерительной аппаратуры и инструмента. Для повышения достоверности результатов проводились повторные измерения, количество которых определяли по выражению [74]:

$$n = \frac{t_{\alpha, f}^2}{\Delta^2} S^2, \quad (3.3)$$

где $t_{\alpha, f}$ – критерий Стьюдента, зависящий от уровня значимости α и числа степеней свободы f , Δ – предельная точность интервальной оценки; S – среднеквадратичное отклонение измеренной величины.

3.2 Анализ результатов экспериментальных исследований. Подтверждение адекватности теоретических моделей

Для оценки работоспособности коронок армированных крупными термостойкими синтетическими монокристаллами различной прочности, расположенных в секторах по радиальной схеме, были изготовлены опытные образцы буровых коронок диаметром 59 мм (рисунок 3.6 б) с использованием уже имеющегося пуансона (рисунок 3.6 а) для разработанных ранее коронок с 22 радиальными рядами алмазов в секторе.

Партия опытных образцов коронок №1 была армирована алмазами марки АС зернистостью 20-30 шт/кар (тип алмазов принят по аналогии армирования коронок АКВ). Партия №2 армирована синтетическими алмазными монокристаллами зернистостью 1600/1250 мкм (30 шт/кар) с повышенной термостойкостью (рисунок 1.1) согласно рекомендациям, приведенных в п.2.4.

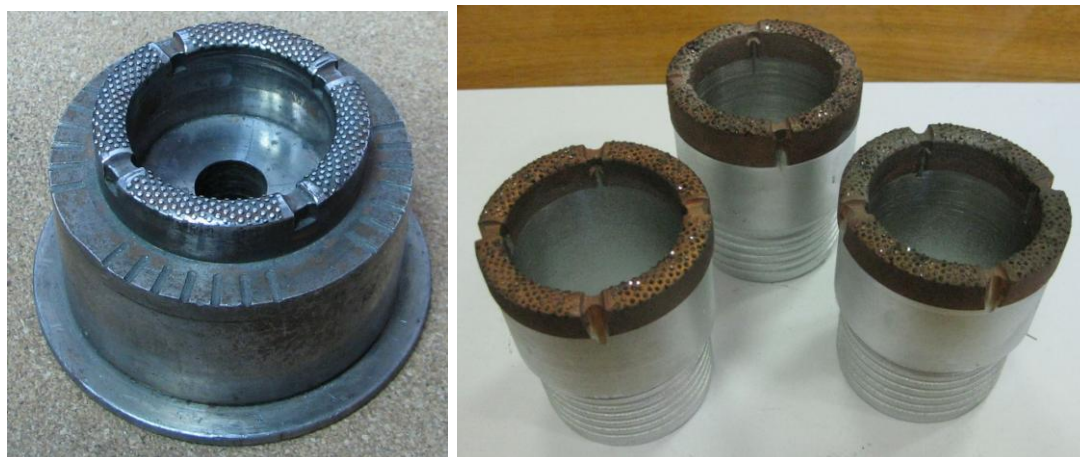


Рисунок 3.6 – Испытуемая коронка: *а* – пуансон; *б* – опытные образцы.

С целью определения предельно допустимой осевой нагрузки для опытных образцов, экспериментальное бурение проводилось на режимах соответствующих существующим рекомендациям для алмазных однослойных коронок, но с постепенным увеличением осевой нагрузки. При продолжительном бурении первыми выходили из строя коронки партии №1. Алмазы набегающей части секторов таких коронок оказывались изношенными (рисунок 3.7 а), в то время как алмазы сбегающей части оставались практически в неизменном виде (рисунок 3.7 б). Алмазы коронок партии №2 при визуальном осмотре были равномерно изношены.

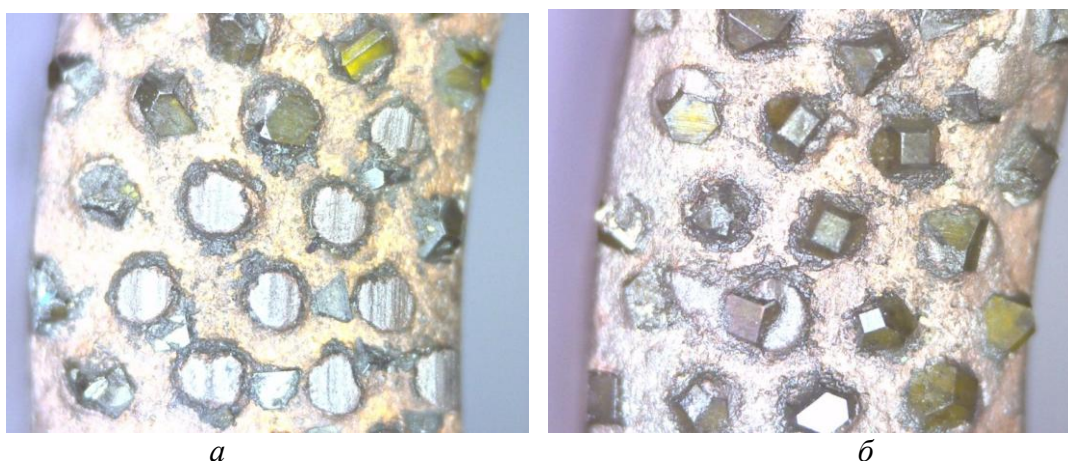


Рисунок 3.7 – Торец рабочей части алмазной однослойной коронки армированной алмазами марки АС:
а – набегающая часть сектора; *б* – сбегающая часть сектора

Дальнейшие испытания продолжились с использованием партии экспериментальных коронок №2.

Опытное бурение в ИСМ выполнялось при следующих режимах: частота вращения 400 об/мин; осевая нагрузка 5–10 кН. За базу сравнения были приняты серийные импрегнированные буровые коронки типа БС06 диаметром 59 мм, оснащенные синтетическими алмазами АС 160Т зернистостью 355/300 мкм, как рекомендуемые для бурения в породах представленных в образцах разбуриваемых монолитов. Результаты испытаний представлены в таблице 25.

Таблица 25 – 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 |

Линейный износ по высоте измерялся в заранее выбранной точке на поверхности сектора коронки. Абсолютное значение линейного износа опытных образцов партии №2, которое определялось по разнице показаний индикатора МИГ-1 до и после проведения единичного опыта, при таких режимах бурения, оказалось равно нулю, что объясняется относительно небольшими объемами бурения.

Как видно из таблицы 25, механическая скорость бурения однослойными коронками в 1,4–1,8 раза превышает аналогичный показатель для импрегнированных коронок, что свидетельствует о более эффективном разрушении породы коронками, оснащенными синтетическими алмазами с размером зерна 1600/1250 мкм.

В ДонНТУ испытания коронки партии №2 проводились в лабораторных условиях на буровом станке СКБ-4, промывка обеспечивалась насосом НБЗ-120/40. Режимы бурения варьировались в пределах, соответствующих имеющимся рекомендациям. Частота вращения изменялась от 280 об/мин до 640 об/мин. Осевая

нагрузка изменялась от 6000 Н до 12000 Н. Согласно рекомендациям для алмазного бурения коронками диаметром 59 мм подача промывочной жидкости составляет от 15 л/мин до 40 л/мин. Однако, в ходе эксперимента выяснилось, что для нормальной работы коронки данной конструкции подача промывочной жидкости должна быть не меньше 24 л/мин, т.е. подачи насоса 15 и 19 л/мин вообще нельзя использовать. Это связано с тем, что при малых подачах жидкости из-за большой длины сектора происходит скопление шлама в его сбегающей части (рис. 3.7).

Результаты экспериментального бурения по песчанику опытной коронкой показаны на рисунке 3.8.



Рисунок 3.8 – Пример скопления шлама на сбегающей части сектора коронки

Эксперимент показал, что использование новых алмазных монокристаллов даёт существенные результаты с точки зрения повышения механической скорости бурения: первоначальная механическая скорость бурения по таким породам как песчаник может достигать 20 м/ч, а по алевролитам – не менее 25 м/ч. Бурение такими коронками продуктивно при осевой нагрузке 8-12 кН и частоте вращения более 600 об/мин (рисунок 3.9.).

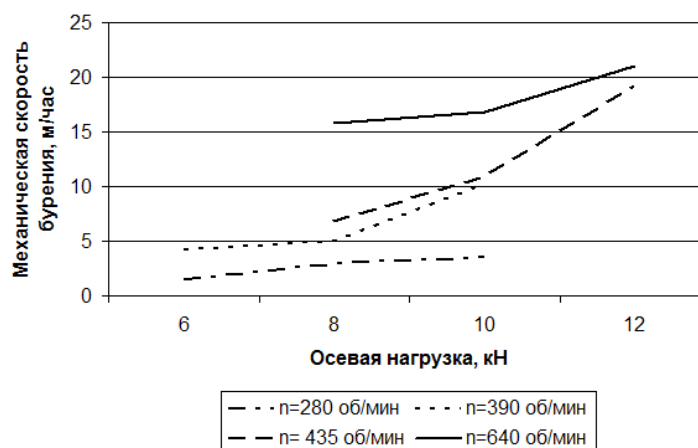


Рисунок 3.9 – Экспериментальные данные изменения механической скорости бурения коронками партии №2

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность армирования породоразрушающего инструмента синтетическими монокристаллами зернистостью 1600/1250 мкм с повышенной термостойкостью. Причем, использование в секторе алмазного сырья разной прочности позволяет повысить работоспособность и производительность коронки.

Выводы по главе 3

1. Синтетические монокристаллы зернистостью 1600/1250 мкм с повышенной термостойкостью пригодны для армирования однослойных алмазных коронок геологоразведочного сортамента.
2. Чем длиннее сектор коронки, тем больше скопление шлама в сбегавшей части сектора.
3. Применение в первых радиальных рядах сектора более прочного алмазного сырья приводит к увеличению работоспособности и продуктивности коронки.
4. При многорядной конструкции сектора коронки, последние радиальные ряды в разрушении породы практически не задействованы, что указывает на нерациональное использование алмазного сырья.
5. Рекомендуемыми параметрами режима бурения однослойными алмазными коронками, армированными синтетическими монокристаллами зернистостью 1600/1250 мкм с повышенной термостойкостью являются: а) подача промывочной жидкости 20-40 л/мин; б) частота вращения в пределах 600-1000 об/мин.

Опытный образец однослойной коронки БСО-1 диаметром 93 мм представлен на рисунке 4.2.

Рабочая часть коронки состоит из двенадцати секторов, разделенных прямыми промывочными окнами длиной 8 мм, с четырьмя радиальными рядами алмазов, что технологически облегчает изготовление коронки. Алмазы в секторе размещены по I типу раскладки.

Оснащение радиальных рядов рабочего торца коронки БСО-1 осуществляется алмазными зернами различной прочности: первые два ряда выполнены из монокристаллов первой и второй партии, а последние – из монокристаллов третьей и четвертой партии (таблица 22). Сплав матрицы коронки (ВК6+медь) и корпус приняты как для серийно выпускаемых коронок (АКВ, БС23, БС01).

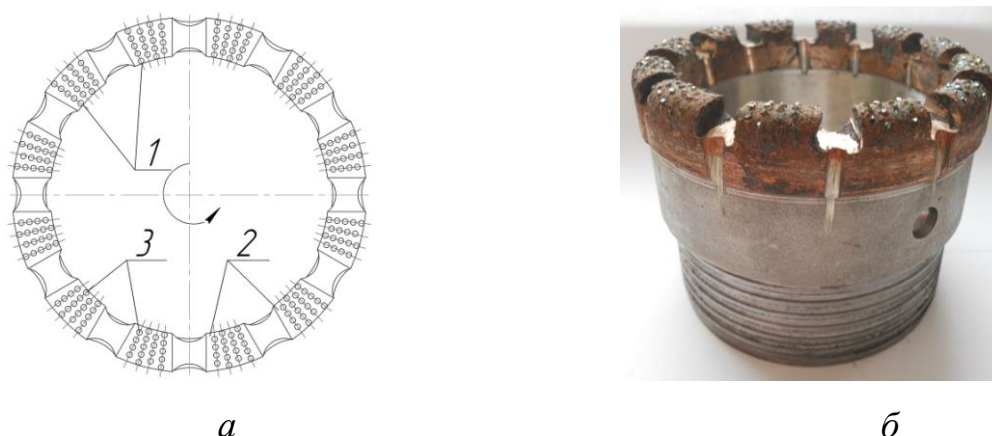


Рисунок 4.2 – Коронка БСО-1:

а – схема оснащения рабочего торца однослойной алмазной коронки диаметром 93мм: 1 – алмазные зерна; 2 – сектора матрицы; 3 – радиальные ряды

б – опытный образец.

4.2 Цель и методика производственных испытаний

С целью определения работоспособности опытные образцы разработанной коронки БСО-1 диаметром 93 мм испытывались на объектах государственного геологоразведочного предприятия (ГГП) «Донецкгеология» (г. Артемовск, Донецкая обл., Украина). Испытания проводились при бурении скважин

установкой УКБ-4С (техническая характеристика приведена в таблице 26). В комплект установки входят: буровой станок СКБ-4, буровой насос НБЗ-120/40, трубооборот РТ-1200 и транспортная база «Урал-4320». Для предупреждения возможности переподъема элеватора и затягивания его в кронблок установка снабжена выключателем ограничения подъема. Фото с места испытания приведена на рисунке 4.3.

Таблица 26 – Техническая характеристика буровой установки УКБ-4С

| Параметры | Значение параметров |
|---|--|
| Глубина бурения: | |
| твердосплавными коронками диаметром 93 мм | 300 |
| алмазными коронками диаметром 59 мм | 500 |
| алмазными коронками диаметром 46 мм | 700 |
| Начальный диаметр бурения, мм | 151 |
| Диаметр бурильных труб, мм | 55; 54; 50; 42 |
| Угол бурения к горизонту, градус | 90 |
| Подача инструмента на забой | Гидравлическая |
| Перехват ведущей трубы (54 мм) | Автоматический |
| Ход шпинделя, мм | 400 |
| Частота вращения шпинделя, об/мин: | |
| правое вращение | 155; 280; 390; 435; 640; 710; 1100; |
| левое вращение | 1600 |
| | 96; 228 |
| Наибольшее усилие подачи шпинделя. даН: | |
| вниз | 4000 |
| вверх | 6000 |
| Наибольшая скорость подачи шпинделя без нагрузки, л/мин: | |
| вниз | 1,10 |
| вверх | 0,83 |
| Грузоподъемность лебедки на прямом канате на 1-й скорости даН. не более | 2500 |
| Грузоподъемность мачты, кН, не более: на крюке | 50 |
| на кронблоке | 100 |
| Максимальный размер свечи, м | 9 |
| Укладка свечей | В штангонриемник. на подсвечник |
| Ходовая база установки | Урал-4320 |
| Буровой агрегат | Станок СКБ-4 |
| Промывочный насос | НБЗ-120/40 |
| Приводный двигатель | Дизель Л-144-60 |
| Мощность двигателя. кВт | 44 |

Бурение геологоразведочных скважин на уголь осуществлялось в породах VII-IX категории по буримости (основные слагающие разрез породы – песчаники и известняки) с использованием одинарного колонкового снаряда.



Рисунок 4.3 – Производственные испытания опытного образца коронки БСО-1

Согласно геолого-техническому проекту (ГТП), разработанного специалистами ГТП «Донецкгеология», бурение коронкой БСО-1 осуществлялось на следующих режимах: частота вращения 435 об/мин; осевая нагрузка 12 кН; подача промывочной жидкости 60 л/мин. Всего на объекте было пробурено 12 скважин, 6 из которых – серийно выпускаемой алмазной однослойной коронкой 01А3 и 6 – опытным образцом БСО-1. Коронка 01А3 (ТУ 2-037-79-88Е) диаметром 93 мм производства ООО Техно-Алмаз, предназначенная для бурения геологоразведочных скважин одинарными колонковыми трубами в малоабразивных, монолитных и трещиноватых породах VII-IX категории, в качестве сравнительной была выбрана как утвержденная по ГТП ГТП «Донецкгеология».

Акт производственного внедрения приведен в приложении Б.

4.3 Результаты производственных испытаний образцов однослойной коронки

Результаты сравнительных испытаний коронок БСО-1 и 01А3 приведены в таблице 27.

Таблица 27 – Результаты испытаний коронок типа БСО-1 и 01А3

| Тип коронки | Количество, шт. | Средние показатели бурения | |
|-------------|-----------------|----------------------------|------------------------|
| | | Механическая скорость, м/ч | Проходка на коронку, м |
| БСО-1 | 5 | 2,5 | 15,4 |
| 01А3 | 5 | 1,5 | 9,4 |

Результаты испытаний показали, что 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 производственных испытаний предварительно подтвердили возможность использования различного алмазного сырья в секторе, что позволяет оптимизировать расход монокристаллов разных групп прочности при изготовлении коронки.

Таким образом, проведенный комплекс исследований позволил разработать новую конструкцию алмазных однослойных коронок особенностью которой является:

- армирование синтетическими алмазными монокристаллами зернистостью 1600/1250 мкм с повышенной термостойкостью (1500°С);
- укороченный до четырех радиальных рядов сектор;
- алмазы первого рабочего ряда сектора более прочные, чем остальные алмазы сектора;
- увеличение количества промывочных окон.

Алмазная однослойная коронка такой конструкции в процессе производственных испытаний зарекомендовала себя положительно. Бурение по породам V-VIII с пропластками до IX категории по буримости коронкой БСО-1

одинарным колонковым снарядом обеспечило высокую механическую скорость бурения, проходку на коронку, при этом отмечено хорошее качество выхода керна.

Выводы по главе 4

1. В результате проведенных исследований разработана конструкция однослойной алмазной коронки, армированная синтетическими алмазными монокристаллами зернистостью 1600/1250 мкм с повышенной термостойкостью разной прочности.

2. Разработанные в главе 2 рекомендации по технологии бурения однослойными алмазными коронками, армированными синтетическими монокристаллами зернистостью 1600/1250 мкм являются достоверными.

3. Результаты испытаний в производственных условиях подтвердили возможность эффективного использования однослойных алмазных коронок при армировании их синтетическими алмазными монокристаллами зернистостью 1600/1250 мкм разной прочности.

Дальнейшая разработка нового породоразрушающего инструмента с синтетическими алмазными монокристаллами будет направлена на создание коронок с двумя радиальными рядами в секторе, которые, по предварительной оценке, должны быть ещё более эффективными, чем коронки БСО-1.

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. Разработку новых алмазных коронок необходимо производить на основании комплексного подхода, рассматривая взаимодействие с горной породой каждого алмаза коронки как элемента единой и взаимосвязанной системы с учетом термических и гидродинамических процессов.
2. 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.
3. Интенсификация 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 четырех радиальных рядов объемных алмазов
4. Равномерная нагрузка на все алмазы коронки достигается при следующих геометрических размерах матрицы по наружному диаметру: длина промывочного канала равна расстоянию между рядами объемных алмазов в секторе; длина сектора составляет три длины промывочного канала; сумма длин сектора и промывочного канала находится в пределах не более 5-5,5 диаметров объемных алмазов.
5. Снижая количество радиальных рядов в секторе на один, можно добиться уменьшения температуры нагрева алмаза на 30-40%.
6. Зависимость температуры нагрева алмаза при бурении скважины от частоты

вращения инструмента и подачи промывочной жидкости не одинакова для коронок с 2, 3, 4 и 7 радиальными рядами в секторе.

7. Максимально термостойкие объемные алмазы следует располагать во втором радиальном ряду сектора.
8. 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марамзин, А. В., Алмазное бурение на твердые полезные ископаемые. Технология работ [Текст] / А. В. Марамзин, Г. А. Блинов. – Л.: «Недра», 1977. – 248 с.
2. Корнилов, Н. И. Буровой инструмент для геологоразведочных скважин: Справочник [Текст] / Н. И. Корнилов, Н. Н. Бухарев, А. Т. Киселев и др. Под ред. Н. И. Корнилова. – М.: Недра, 1990. – 395 с.
3. Зыбинский, П. В. Сверхтвердые материалы в геологоразведочном бурении: Монография [Текст] / П. В. Зыбинский, Р. К. Богданов, А. П. Загора, А. М. Исонкин. – Донецк: Норд-Пресс, 2007. – 244 с.
4. Цыпин, Н. В. Износостойкость композиционных алмазосодержащих материалов для бурового инструмента [Текст] / Н. В. Цыпин. – К. : Наук. думка, 1983. – 191 с.
5. Чихоткин, В. Ф. Исследование техники и технологии бурения геологоразведочных скважин и разработка нового поколения алмазного породоразрушающего инструмента [Текст] / В. Ф. Чихоткин. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 1997. – 241 с.
6. Пономарев, П. П. Алмазное бурение трещиноватых пород. – Л. : Недра, 1985. – 144 с.
7. Исаев, М. И. Основы прогрессивной технологии алмазного бурения геологоразведочных скважин / М. И. Исаев, П. В. Пономарев. – М.: Недра, 1975. – 288 с.
8. Кожевников, А. А. Разрушение горных пород на забое геологоразведочных скважин : Монография / А. А. Кожевников, С. В. Гошовский, И. И. Мартыненко, П. П. Вырвинский. – К.: укрГГРИ, 2006. – 146 с.
9. Кожевников, А. А. Тепловой фактор при бурении скважин: Монография [Текст] / С. В. Гошовский, А. Ю. Дреус, И. И. Мартыненко. – К.: укрГГРИ, 2008. – 166 с.

10. Новиков, Н. В. Физические свойства алмазов: Справочник [Текст] / Ю. А. Кочержинский, Л. А. Шульман, Т. Д. Оситинская и др. – Киев: Наукова Думка, 1987. – 188 с.
11. Будюков, Ю. Е. Алмазный породоразрушающий инструмент [Текст] / Ю. Е. Будюков, В. И. Власюк, В. И. Спирин. – Тула : ИПП «Гриф и К», 2005. – 288 с.
12. Будюков, Ю. Е. Алмазный инструмент для бурения направленных и многоствольных скважин: Монография [Текст] / В. И. Власюк, В. И. Спирин. – Тула: «Гриф и К», 2007. – 176 с.
13. Нескоромных, В. В и др. Разработка и экспериментальные исследования особенностей работы алмазной коронки для бурения в твердых анизотропных горных породах. Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 4.
14. Кичигин, А. Ф. Алмазный инструмент для разрушения крепких горных пород [Текст] / А. Ф. Кичигин, С. Н. Игнатов, Ю. И. Климов, В. Д. Ярема. – М., Недра, 1980. – 159 с.
15. Башкатов, Д. Н. Исследование процесса алмазного бурения с позиции системного подхода. Сб. Разработка и совершенствование методов и средств оптимизации и автоматизации процессов алмазного бурения, – ВИТР, – Л.: 1988. – с. 19–24.
16. Бугаев, А. А. Некоторые закономерности работы алмазной импрегнированной коронки. // Буровой инструмент из сверхтвердых материалов. – Киев.: ИСМ АН УССР, 1986. – с.74-79.
17. Казика, В. Ф. Один из аспектов расчета буровых коронок при проектировании [Текст] // Сб. науч. тр.: Применение синтетических алмазов в бурении. – Л.: ВИТР, 1991. – с. 38-47.
18. Кудряшов, Б. Б. Нагрев и охлаждение алмазной коронки при бурении [Текст] / , Ю. А. Оношко // Сборник «Методика и техника разведки» Л.: ОНТИ ВИТР. – 1964. – № 46. – С. 49-61

19. Кудряшов, Б. Б. Анализ и расчет температурного поля в теле алмазной коронки [Текст] // А. А. Яковлев // Бурение разведочных скважин в сложных условиях. Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В. Плеханова. – 1985. – Том 105. – С. 10-16
20. Сологуб, С. Я. Результаты лабораторных и промышленных исследований резцов и коронок торцового резания. [Текст] // Сборник трудов «Электровращательное бурение шпуров и скважин в крепких породах» Материалы 1-го координационного совещания состоявшегося в г.Фрунзе. – 1963.
21. Июдин, П. Н. Применение электросверл для бурения шпуров по породам. [Текст] – Углетехиздат, 1957.
22. Станишевский, А. С. Режимы колонкового бурения. [Текст] // Труды ВИТРа, выпуск 27. – Ленинград, 1960.
23. Cocorandu, M. O metoda de determinare a indicilor tehnico-ekonomici de foray. // Petrol si Gase. – 1958. – 9 an № 6.
24. Станишевский, А. Е. Методика расчета тяжелого низа. [Текст] / А. Е. Станишевский, А. П. Руденко, А. Н. Ягодин // «Новое в методике и технике геологоразведочных работ». Труды ВИТРа. – 1961. – №3
25. Гулизаде, М. П. К экспериментальному определению коэффициента сопротивления, при движении труб в наклонной скважине. Известия ВУЗов. – «Нефть и газ», 1965. – №5
25. Белоконь, В. Г. Применение алмазных коронок для бурения глубоких скважин в условиях абразивных пород районов Донбасса [Текст] / В.Г. Белоконь, Н. М. Гавриленко, Н. И. Костенко // Сборник «Передовой опыт технологии бурения скважин в геологоразведочных организациях треста «Луганскгеология». – Киев, 1966.
26. Шаньгин, А. Н. О рациональном соотношении размеров бурильных труб и долот Н.Х.. – 1961. – №9.

27. Карпов, В. П. По поводу статьи А.Н. Шаньгина «О рациональном соотношении размеров бурильных труб и долот». Н.Х. – 1962. – №9
28. Кожевников, А. А. Численный анализ теплового состояния буровых алмазов [Текст] / А.А. Кожувников, А.Ю. Дреус // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. Выпуск 17. – Киев, 2014. – С. 23-25.
29. Илларионова, Т. М. Методика расчета гидравлических сопротивлений в алмазных коронках. [Текст] – в сб. Методика и техника разведки. – Л.: ВИТР, 1975. – №97. – С 19-26.
30. Базанов, Л. Д. Исследования гидравлических сопротивлений при промывке геологоразведочных скважин малого диаметров. [Текст] – Автореф. дис. канд. техн. наук. – М.: МГРИ, 1970. – 19 с.
31. Шрейнер, Л. А. Физические основы механики горных пород. [Текст] – Гостоптехиздат, 1950.
32. Блинов, Г. А. Алмазосберегающая технология бурения. [Текст] / Блинов, Г.А., Васильев В. И., Глазов М. Г. и др. – Л.: Недра, 1989. – 184 с.
33. Соловьев, Н. В. Ресурсосберегающая технология алмазного бурения в сложных геологических условиях [Текст] / Н. В. Соловьев, В. Ф. Чихоткин, Р. К. Богданов, А. П. Загора. – М. : ОАО «ВНИИОЭНГ», 1997. – 332 с.
34. Бондаренко, Н. А. Основы создания алмазосодержащих композиционных материалов для породоразрушающих инструментов [Текст] / Бондаренко Н.А., Жуковский А.Н., Мечник В.А. / под ред. Н.В. Новикова. – Киев: Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2008. – 456 с.
35. Сулакшин, С. С. Разрушение горных пород [Текст]/ С. С. Сулакшин. – Томск: ТПУ, 1994. – 100 с.
36. Ганджумян, Р. А. Практические расчеты в разведочном бурении. [Текст] / Р.А. Ганджумян. – М.: Недра, 1986. – 253с.
37. Винниченко, В. М. Технология бурения геологоразведочных скважин. Монография [Текст] / Н. Н. Максименко. – М. : ООО "Недра", 2000. – 278с.

38. Калинин, А. Г. Разведочное бурение. Учеб. для вузов [Текст] / О.В. Ошкордин, В. М. Питерский, Н. В. Соловьев. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. – 748 с.
39. Воздвиженский, Б. И. Разведочное бурение. Монография [Текст] / О.Н. Голубинцев, А.А. Новожилов. – М., Недра, 1979. – 830 с.
40. Ребрик, Б. М. Бурение инженерно-геологических скважин. Справочник [Текст] / Б.М. Ребрик. – М.: Недра, 1990. – 336 с.
41. Волков, А. С. Буровой геологоразведочный инструмент. [Текст] / А.С. Волков. – М.: Недра, 1979. – 286 с.
42. Козловский, Е. А. Справочник инженера по бурению геологоразведочных скважин: в 2-х томах [Текст] / Е. А. Козловский, В. Г. Кардыш, Б. В. Музаков, Г. А. Блинов, В. М. Питерский. – Том. 1. – М.: Недра, 1984. – 512 с.
43. Кожевников, А. А. Забойные факторы алмазного бурения геологоразведочных скважин [Текст] / А. А. Кожевников, С. В. Гошовский, И. И. Мартыненко и др. – Д.: ЧП «Ли́ра ЛТД», 2006. – 264 с.
44. Богданов, Р. К. Сверхтвердые материалы в геологоразведочном инструменте [Текст] / Р. К. Богданов, А. П. Загора, А. М. Исонкин, О. А. Колобков, О. В. Ошкордин, К. А. Плеханов, С. Г. Фролов. – Екатеринбург: УГГА, 2003. – 138 с.
45. Бугаев, А. А. Синтетические алмазы в геологоразведочном бурении [Текст] / А. А. Бугаев, В. Н. Лившиц, В. В. Иванов, Р. К. Богданов, В.Ф. Фадеев. – К., «Наук. думка», 1978. – 232 с.
46. Шерстюк, О. И. Исследование и разработка метода оперативного управления процессом бурения скважин в твердых породах. [Текст] – Автореф. дис. канд. техн. наук. – Л., 1982. –24 с.
47. Пинчук, Н. П. Методы повышения эффективности бурения геологоразведочных скважин (опыт концерна «Геологоразведка») [Текст] / Н. П. Пинчук, В. А. Кудря, И. П. Мельничук. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2000. – 536 с.

48. Кожевников, А. А. Тепловое поле алмазной коронки при бурении с нестационарным режимом промывки скважины [Текст] / А.А. Кожевников, С.В. Гошовский, А. Ю. Дреус и др // Доповіді Національної академії наук України, №2, 2007. – С. 62–67
49. Есьман, Б. И. Термогидравлические процессы при бурении скважин [Текст] / Б. И. Есьман, Г.Г. Габузов. –М.: Недра, 1991. – 216 с.
50. Патент № 91720 Украина, МПК (2014.01) E21B 7/00. Алмазна одношарова бурова коронка: № u201402067: заявл. 28.02. 2014 : опубл. 10.07.2014 / Каракозов А. А., **Попова М. С.**, Богданов Р. К., Загора А. П. ; заявитель ДонНТУ. – 4 с.: ил.
51. Патент № 108943 Украина, МПК E21B 10/36 (2006.01) E21B 10/46 (2006.01). Алмазна одношарова бурова коронка: № u20140755: заявл. 24.02. 2014: опубл. 25.06.2015 / Каракозов А. А., **Попова М. С.**, Богданов Р. К., Загора А. П. ; заявитель ДонНТУ. – 3 с.: ил.
52. Патент № 92032 Украина, МПК (2014.01) E21B 7/00. Алмазна одношарова бурова коронка: № u201402063: заявл. 28.02. 2014: опубл. 25.07.2014 / Каракозов А. А., **Попова М. С.**, Богданов Р. К., Загора А. П. ; заявитель ДонНТУ. – 5 с.: ил.
53. Патент №108942 Украина, МПК E21B 10/36 (2006.01) E21B 10/46 (2006.01). Алмазна одношарова бурова коронка : № u20141753: заявл. 24.02. 2014: опубл. 25.06.2015 / Каракозов А. А., **Попова М. С.**, Богданов Р. К., Загора А. П. ; заявитель ДонНТУ. – 4 с.: ил.
54. Каракозов, А. А. Моделирование работы алмазных резцов однослойных коронок на забое и оценка влияния схемы раскладки алмазов на механическую скорость бурения [Текст] / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, С. Н. Парфенюк, Р. К. Богданов, А. П. Загора // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Гірничо-геологічна». – Вип. 16(206). – 2012. – Донецк: ДонНТУ, 2012. – С. 162–166. – ISSN 2073-9575. (0,31 п.л.).
55. Эйгелес, Р.М. Разрушение горных пород при бурении. – М.: Недра, 1970. – 232 с.: ил.

56. Ильницкая, Г. Д. Исследование и рекомендации по оснащению бурового инструмента крупными синтетическими алмазами [Текст] / Г. Д. Ильницкая, А. П. Загора, Р. К. Богданов, С. А. Ивахненко, О. А. Заневский, А. А. Каракозов, **М. С. Попова** // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сборник научных трудов. – Вып. 15. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, НАН Украины, 2012. – С. 56–62. – ISSN 2223-3938 (0,44 п.л.).
57. Шамшев, Ф. А. Технология и техника разведочного бурения. / Ф.А. Шамшев, С.Н. Тараканов, Б.Б. Кудряшов, Ю.М. Парийский, А.М. Яковлев – М.: Недра, 1983. – 565 с.:ил.
58. Кубасов, В. В. Новый способ изготовления породоразрушающего инструмента. / В.В. Кубасов В.И. Спирин, Ю.Е. Будюков. Приоритетные направления науки и технологий: тезисы докладов XVI международной научн. - техн. конф.; под общ.ред. В.М. Панарина. – Тула: Изд-во «Инновационные технологии», 2014. – С.76-81.
59. Гореликов, В. Г. Исследование механизма углубки скважин при алмазном бурении / В. Г. Гореликов, Г.А. Блинов // Техника, технология и организация геологоразведочных работ. – Москва, 1994. – С. 53-55.
60. Каракозов, А. А. Исследования и разработка конструкции однослойной буровой коронки с синтетическими алмазными монокристаллами [Текст] / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, Р. К. Богданов, Загора А. П. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент и технология его изготовления. Сб. научн. Трудов. – Киев: ИСМ им. Бакуля, 2014. – Вып.17. – С. 73-79.
61. Каракозов, А. А. Результаты исследований алмазного породоразрушающего инструмента для колонкового бурения скважин на основе синтетических монокристаллов с повышенной термостойкостью [Текст] / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, С.Н. Парфенюк, Р. К. Богданов, Загора А. П. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Гірничо-геологічна». – Вып. 1(20). – Донецьк, ДонНТУ, 2014. – С. 132–137.

62. Каракозов, А. А. Исследование теплового режима однослойной алмазной коронкой с синтетическими монокристаллами [Текст] / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, С.Н. Парфенюк, Р. К. Богданов, Загора А. П. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Гірничо-геологічна». – Вып. 1(22). – Донецьк, ДонНТУ, 2015. – С. 39–44
63. Заневский, О. А. Получение крупнозернистых высокопрочных шлифпорошков алмаза для применения в буровом инструменте [Текст] / О. А. Заневский, С. А. Ивахненко, Г. Д. Ильницкая, А. П. Загора, Р. К. Богданов, А. А. Каракозов, **М. С. Попова** // Сверхтвердые материалы : науч.-теор. журн. / Ин-т надтвердых матер. ім. В. М. Бакуля Нац. акад. наук України. – К., 2015. – Вып. 2. – 2015. С. 85-96.– ISSN 0203-3119
64. 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.
65. Каракозов, А. А. Уточнение критерия удельной энергоёмкости объёмного износа при оценке эффективности процесса взаимодействия импрегнированной алмазной коронки с породой [Текст] / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, С.Н. Парфенюк, Р. К. Богданов, Загора А. П. // Наукові праці ДонНТУ: Серія Гірничо-геологічна. – Донецьк: ДонНТУ, 2016. – № 2(25). – С. 86-88
66. Каракозов, А. А. Однослойные алмазные коронки для бурения пород V-VIII (IX) категории по буримости [Текст] / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, С.Н. Парфенюк // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции «Геологоразведочное и нефтегазовое дело в XXI веке: технологии, наука и образование». – Алматы, КазННТУ, 2016. – С. 85-91. – ISBN 978-601-7529-48-2.
67. Каракозов, А. А. Однослойные алмазные коронки для бурения пород V-VIII (IX) категории по буримости [Текст] / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, С.Н. Парфенюк // Материалы Международной научно-практической конференции «Бурение в осложненных условиях. – Санкт-Петербург, 4-6 октября 2016.

68. **Попова, М. С.** Исследование гидравлических и термодинамических процессов при бурении однослойной алмазной коронкой с синтетическими монокристаллами [Текст] / М. С. Попова, С.Н. Парфенюк // Проблемы геологии и освоения недр : труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета. Том 2. Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – с. 769-771.
69. **Попова, М. С.** Разработка алмазного породоразрушающего инструмента на основе синтетических монокристаллов для бурения геологоразведочных скважин [Текст] // Проблемы недропользования: Сборник научных трудов. Часть I / Санкт-Петербургский горный университет. – СПб, 2016. – С. 47–50.
70. **Попова, М. С.** Разработка однослойных алмазных коронок с укороченными секторами [Текст] / М. С. Попова, А.А. Каракозов, Р.К. Богданов, А.П. Загора // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент и технология его изготовления. Сб. научн. Трудов.- Киев: ИСМ им. Бакуля, 2016. – Вып.19. – С. 10-16.
71. **Попова, М. С.** Развитие теоретических моделей работы однослойных алмазных коронок на забое скважин [Электронный ресурс] // Инновационные перспективы Донбасса, г. Донецк, 2017 г. Т. 7: Перспективные технологии в геологоразведочной и нефтегазовой отраслях, геодезии и маркшейдерии. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – 67 - 70 С. –
URL: <http://ipd.donntu.org/> (дата обращения: 25.04.2018)
72. Тимошенко, Г. М. Теория инженерного эксперимента. [Текст] / Г.М. Тимошенко, П.Ф. Зима – Донецк: ДПИ, 1987. – 64 с.
73. Яковлев, Л. Г. Погрешности контрольно-измерительных приборов и датчиков. [Текст] – М.: Недра, 1961. – 154 с.
74. Башкатов, Д. Н. Планирование эксперимента в разведочном бурении. [Текст] – М.: Недра, 1985. – 181 с.

75. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. [Текст] / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский – М.: Наука, 1976. – 276 с.
76. Соловьев, Н. В. Основы конструирования алмазного породоразрушающего инструмента./Н.В. Соловьев Н.В., В.Ф. Чихоткин, В.И. Власюк, Р.А. Ганджумян и др. – М.: МГГА, 2000. – 111 с.:ил.
78. Рябчиков, С.Я. Повышение износостойкости породоразрушающего инструмента различными физическими способами. – Обзор МГП «Геоинформмарк», М.: 1993. – 36 с.:ил
79. Остроушко, И.А. Бурение твердых горных пород. – М.: Недра, 1966. – 289 с.:ил.
80. Камминг Дж. Д. Руководство по алмазному бурению. – М.: Госгеолтехиздат, 1960. – 327 с.:ил.
81. Власюк, В. И. Новые технологии в создании и использовании алмазного породоразрушающего инструмента. / В.И. Власюк, Ю.Е. Будюков, Л. К. Горшков, Л. И. Осецкий, С.Я. Рябчиков, В.И. Спириг. – М.: «Геоинформмарк», 2002 – 140 с
82. Будюков, Ю.Е. Рациональный принцип размещения алмазов в коронках для бурения геологоразведочных скважин./Ю.Е. Будюков, Б.С. Чугунов. Сб. «Алмазы», вып.4. НИИМАШ. – М.: 1968. – с.7-9.
83. Козловский, А. Е. Оптимизация процесса бурения: структура и элементы управления / А. Е. Козловский. – М., 2000.–187 с.
84. Нескоромных, В. В. Разрушение горных пород при бурении скважин: Учебное пособие. – М.:ИНФРА-М; Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. – 336 с.
85. Воздвиженский, Б. И. Повышение эффективности колонкового алмазного бурения / Б. И. Воздвиженский, Г. А. Воробьев, Л. К. Горшков и др. – М. : Недра, 1990. – 208 с.
86. Овчаренко, В. М. Основы автоматизации и контрольно измерительные приборы на буровых и горно-разведочных работах. 2-е изд., перераб. и доп / В. М. Овчаренко, И. А. Брацлавский. – М. : Недра, 1982. – 230 с.

87. **Попова, М. С.** Результаты компьютерного моделирования температурного режима алмазного бурового инструмента // Научно-технический журнал «Инженер-нефтяник». – 2018. – №2. – С. 23-26.
88. 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.
89. 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
90. Каракозов, А. А. Исследование теплового режима однослойной алмазной коронкой с синтетическими монокристаллами / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, С.Н. Парфенюк, Р. К. Богданов, Загора А. П. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Гірничо-геологічна». – Вып. 1(22). – Донецьк, ДонНТУ, 2015. – С. 39–44.
91. Каракозов, А. А. О процессе взаимодействия алмазов с забоем скважины при работе однослойных коронок/ А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, Р. К. Богданов, Загора А. П. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент и технология его изготовления. Сб. научн. Трудов.- Киев: ИСМ им. Бакуля, 2011. – Вып.14. – С. 78-85.
92. Каракозов, А. А. О влиянии схем раскладки алмазов однослойных коронок на их нагружение при взаимодействии с забоем скважины / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, Р. К. Богданов, А. П. Загора // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2011». – Дніпропетровськ: НГУ, 2011. – С. 35-38.
93. Каракозов, А. А. О влиянии конструктивных параметров однослойной алмазной коронки на показатели разрушения породы на забое / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, Р. К. Богданов, А. П. Загора // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2011, №4(41). – С. 47-51.

94. Богданов, Р. К. Буровая однослойная коронка с крупными синтетическими монокристаллическими алмазами / Р. К. Богданов, Загора А. П., **М. С. Попова**, М. С. Супрун, А. А. Каракозов // Инструментальний світ. – №1 (57) 2013. – С. 7-9
95. Каракозов, А. А. Моделирование работы алмазных резцов однослойных коронок на забое и оценка влияния схемы раскладки алмазов на механическую скорость бурения / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, С.Н. Парфенюк, Р. К. Богданов, Загора А. П. // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Гірничо-геологічна». – Вип. 16(206). – Донецьк, ДонНТУ, 2012. – С. 162-166.
96. Каракозов, А. А. Разработка однослойных алмазных коронок с укороченными секторами / А. А. Каракозов, **М. С. Попова**, Р.К. Богданов, А.П. Загора // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент и технология его изготовления. Сб. научн. Трудов.- Киев: ИСМ им. Бакуля, 2016. – Вып.19. – С. 10-16.
97. **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.
98. **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.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Руководство к пользованию и основные принципы действия программы «koronka2»

программа «koronka2» позволяет:

- моделировать процесс движение однослойной алмазной коронки по забою скважины;
- определять величину толщины слоя породы, срезаемого каждым алмазом в конкретный момент времени;
- определять координату нижнего торца коронки;
- отображать траекторию движение алмазов в осевом направлении по мере движения нижнего торца коронки;

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

Инструкция к пользованию программой «koronka2».

Работа с программой организована путем последовательного выполнения следующих шагов:

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

Для начала работы с данной программой необходимо запустить файл koronka2.exe. На экране появится главное окно (рисунок А.1), которое содержит главное меню и поля ввода исходных данных.

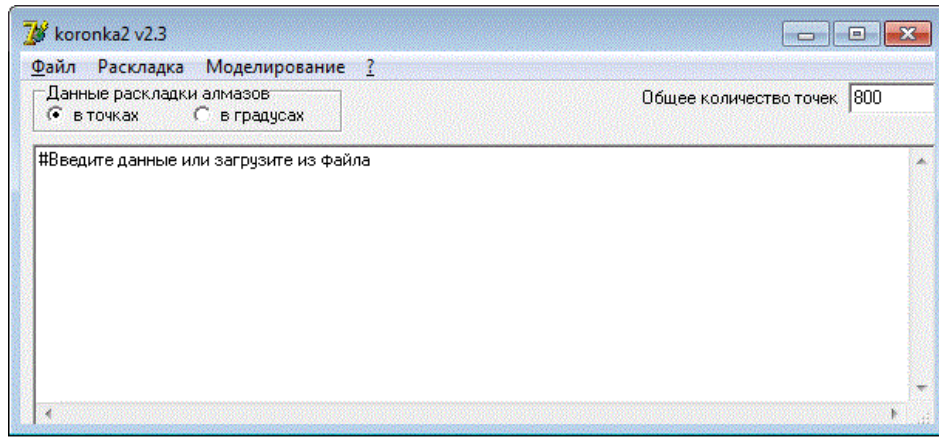


Рисунок А.1 – Главное окно программы «koronka2»

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

Величина первоначального углубления каждого алмаза задается путем вызова пункта меню *Моделирование – Настройки...* и задается в соответствующем поле ввода (рисунок А.2) как значение h_a .

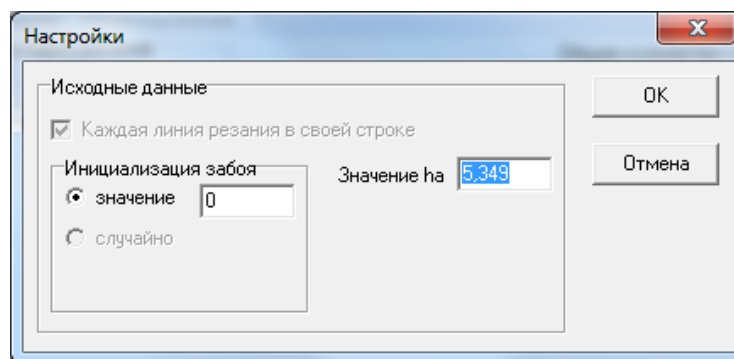


Рисунок А.2 – Окно ввода параметров моделирования

Предусмотрено три способа ввода исходных данных по раскладке алмазов: вручную; по шаблону и загрузка из файла.

1. При ручном способе ввода данные о координатах каждого алмаза

вносятся в текстовое поле ввода главного окна в следующем формате:

– каждая строка текста представляет собой координаты алмазов, которые находятся на одной линии резания. Строка должна завершаться символом «точка с запятой»;

– в пределах одной линии резания задается угловая координата каждого алмаза в градусах (0° – 360°) или в точках модели. Координаты алмазов разделяются символом «точка с запятой».

– любая строка, начинающаяся с символа «#», игнорируется и считается комментарием.

Для задания единиц измерения координат алмазов служит соответствующий переключатель над полем ввода координат алмазов.

2. При вводе данных раскладки по шаблону исходными данными являются координаты алмазов одного сектора. Для реализации данного метода ввода необходимо выбрать пункт главного меню Раскладка – По шаблону... и в окне параметров раскладки задать необходимые данные (рисунок А.3). Таким способом могут вводиться данные, например, радиальной раскладки. Тип раскладки *Шахматная* следует понимать таким образом, что алмазы будут располагаться в шахматном порядке по линиям резания и радиальным рядам.

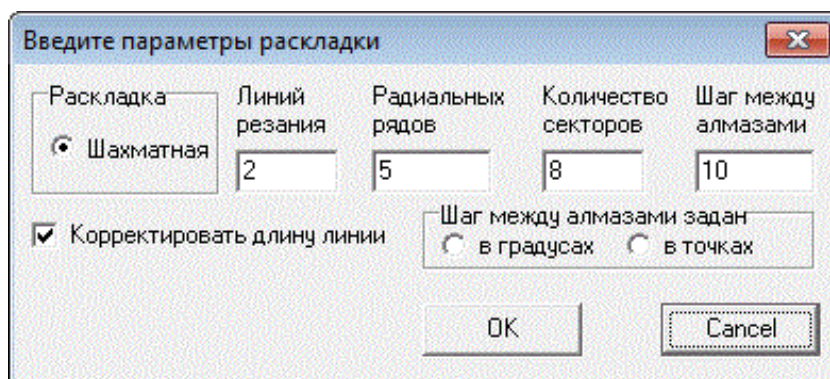


Рисунок А.3 – Окно ввода раскладки алмазов по шаблону

Поле флага «Корректировать длину линии» предназначено для обеспечения соответствия общего количества точек, которыми моделируется линия резания, с длиной одного сектора. При этом обеспечивается кратность общего количества точек на линии резания количеству точек в одном секторе коронки. Это позволяет

избежать первоначальных ошибок округления, связанных с дискретность модели.

После окончания ввода всех необходимых данных и нажатия кнопки ОК, данные раскладки появятся на главном окне.

Для удобства работы с программой, предусмотрена возможность сохранения данных раскладки в файл и последующая их загрузка из файла. Для сохранения данных о координатах алмазов, необходимо выбрать пункт главного меню *Раскладка – Экспорт в файл...*, для загрузки данных – пункт меню *Раскладка – Из файла...*

Проверить правильность введенных данных можно путем визуальной оценки расположения алмазов. Для этого служит пункт меню *Раскладка – Показать...*. На экране появится изображение алмазов на торце коронки, соответствующее заданным координатам (рисунок А.4). Вертикальная линия соответствует нулевому значению координат алмазов.

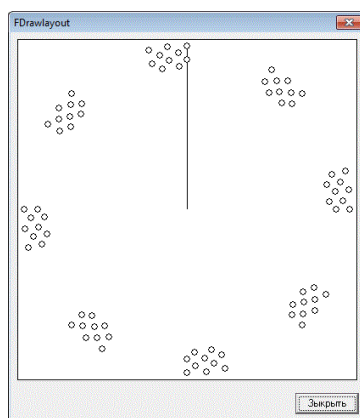


Рисунок А.4 – Окно контроля раскладки алмазов

После того как заданы все необходимые исходные данные, можно начать моделирование, вызвав в главном меню пункт *Моделирование – Начать...*. После этого на экране появятся два окна с результатами моделирования (рисунок А.5).

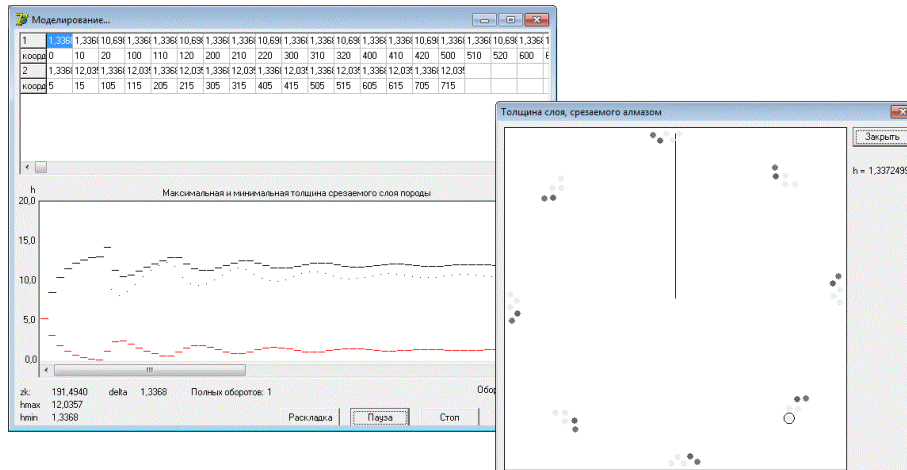


Рисунок А.5 – Окна с результатами моделирования

В верхней части первого окна (рисунок А.6) изображена таблица, отражающая текущее значение величины толщины слоя породы, срезаемого каждым алмазом коронки с соответствующей координатой, которая отображена строкой ниже. Номер линии резания указан в первом столбце таблицы.

Ниже таблицы расположен график изменения максимальной h_{max} (линия черного цвета) и минимальной h_{min} (линия красного цвета) толщины срезаемого слоя породы для всех алмазов с ростом угла поворота коронки.

В нижней части окна, отображаются значения текущей координаты нижнего торца коронки (z_k), величина последнего изменения координаты z_k ($delta$), текущие значения h_{max} и h_{min} , а также количество полных оборотов, совершенных коронкой.

Выбрав в главном меню «Файл» пункт «Новый проект» можно начать исследование движения коронки по забою с новыми данными.

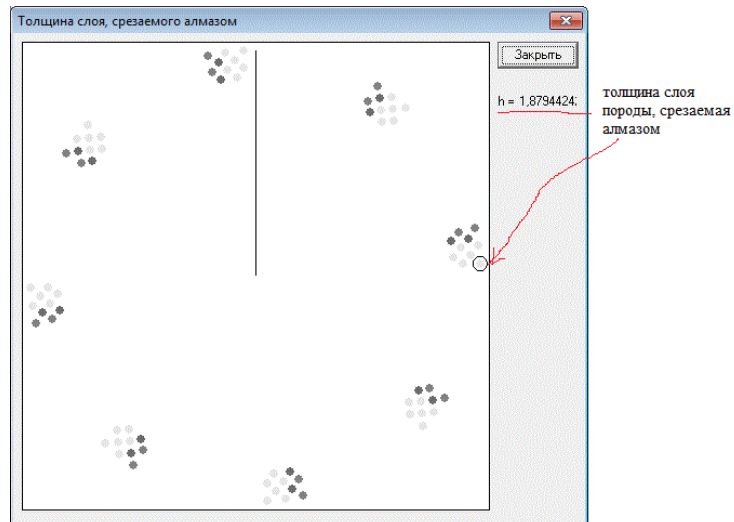


Рисунок А.8 – Демонстрация торца коронки во время бурения

Для выхода из программы необходимо выбрать в главном меню пункт *Файл – Выход*.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт внедрения результатов диссертационной работы

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Заст. директора
ІНМ НАН України
г.н. Клименко С.А.
2013 р.



“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Головний інженер
ДГП “Донецькгеологія”
Карелов М.І.
2013 р.



ТЕХНІЧНИЙ АКТ

виробничих випробувань дослідних бурових коронок типу БСО-1 виробництва
Інституту надтвердих матеріалів НАН України

Комісія у складі :

- | | | |
|--------------------|---|-----------------|
| 1 . Голова комісії | - начальник ГРП ДГП “Донецькгеологія” | Алефіренко А.М. |
| 2 . Члени комісії | - техрук ГРП ДГП “Донецькгеологія” | Резванов М.В. |
| | - старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів НАН України | Закора А.П. |
| | - аспірант кафедри ТТБС Донецького Національного технічного університету | Попова М.С. |

Склали цей акт про наступне.

У період вересня - жовтня 2013 р. на бурових об'єктах ДГП “Донецькгеологія” проводилися випробування бурових коронок типу БСО-1 діаметром 93 мм виробництва ІНМ НАН України за розробленою ІНМ сумісно з кафедрою ТТБС ДонНТУ конструкцією.

Роботи проводилися з метою перевірки працездатності бурових коронок, оснащених крупними термостійкими монокристаллами синтетичних алмазів розміром 1620/1250 мкм і розроблених в ІНМ НАН України сумісно з кафедрою ТТБС ДонНТУ за темою № 0966 .

Виготовлені ІНМ НАН України бурові коронки типу БСО-1 діаметром 93 мм кількістю 5 одиниць були передані на випробування у ДГП “Донецькгеологія” згідно акту здачі-приймання № 35 від 10 вересня 2013 р.

Випробування коронок типу БСО-1 діаметром 93 мм проводили при бурінні планових геологорозвідувальних свердловин на верстаті УКБ-4С в породах VII - IX категорій за

буримістю (пісковики, вапняки) з використанням одинарного колонкового снаряда. За базу порівняння були прийняті серійні бурові коронки типу 01А3 діаметром 93 мм. При цьому використовувалися такі режими буріння:

- частота обертання 435 хв.⁻¹;
- осьове навантаження 1200 даН;
- витрати промивної рідини 60 дм³/хв.

Результати порівняльних випробувань дослідних і серійних коронок наведені в таблиці.

Таблиця. Результати порівняльних випробувань коронок типу БСО-1 діаметром 93 мм та 01А3 діаметром 93 мм

| Тип інструменту | Кількість, шт | Середні показники буріння | |
|-----------------|---------------|----------------------------------|------------------------|
| | | Механічна швидкість буріння, м/г | Проходка на коронку, м |
| БСО-1 Ø 93 | 5 | 2,5 | 15,4 |
| 01А3 Ø 93 | 5 | 1,5 | 9,4 |

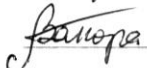
Наведені в таблиці результати виробничих випробувань свідчать, що бурові коронки типу БСО-1 діаметром 93 мм, оснащені крупними термостійкими монокристаллами синтетичних алмазів розміром 1620/1250 мкм, перевершують серійні коронки 01А3 діаметром 93 мм по механічній швидкості буріння в 1,67 рази і за проходкою на коронку (по зносостійкості) в 1,64 рази.

Комісія зазначає, що за результатами випробувань коронки типу БСО-1 діаметром 93 мм можуть бути рекомендовані для буріння свердловин в породах VII - IX категорії за буримістю.

Випробувані в умовах ДГП "Донецькгеологія" бурові коронки типу БСО-1 діаметром 93 мм в кількості 5 шт. повністю відпрацювали свій ресурс, не підлягають рекуперації і до подальшої експлуатації непридатні.

Від ІНМ НАН України

Ст. науковий співробітник

 Загора А.П.

Аспірант кафедри ТТБС ДонНТУ

 Попова М.С.

Від ДГП "Донецькгеологія"

Начальник ГРП ДГП "Донецькгеологія"

 Алсфіренко А.М.

Техрук ГРП ДГП "Донецькгеологія"

 Резванов М.В.