

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования  
«Санкт-Петербургский горный университет»

*На правах рукописи*

**БААТАРХУУ ГАНТУЛГА**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛМАЗНОГО БУРЕНИЯ НА ОСНОВЕ  
ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ АНОМАЛЬНОГО ИЗНОСА АЛМАЗНЫХ КОРОНОК**

Специальность 25.00.14 – Технология и техника геологоразведочных работ

**ДИССЕРТАЦИЯ**

**на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:  
доктор технических наук,  
профессор В.Г. Гореликов**

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ – 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕХАНИЗМА УГЛУБКИ СКВАЖИНЫ.....	16
1.1 Классификация твердых горных пород и особенности механизма их разрушения при алмазном бурении.....	16
1.2 Анализ теоретических и экспериментальных методов определения количества алмазов, контактирующих с забоем скважины.....	18
1.3 Методы экспериментального определения количества алмазов, контактирующих с горной породой.....	27
1.4 Классификация и анализ конструктивных особенностей алмазных коронки .....	30
1.5 Существующие технологии приработки алмазного породоразрушающего инструмента.....	35
1.6 Анализ механизма углубки забоя скважины за 1 оборот коронки.....	37
1.7 Анализ механизма заполирования и методов его предупреждения.....	47
1.8 Анализ механизма прижога алмазных коронок и методов его предупреждения.....	52
Выводы по главе 1. ....	54
ГЛАВА 2 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ.....	58
2.1 Методика определения количества алмазов, находящихся в контакте с поверхностью забоя.....	58
2.2 Метод исследований факторов, определяющих износостойкость алмазных коронок.....	59
2.3 Метод исследований температуры в зоне контакта коронки с забоем скважины.....	60
2.4 Планирование эксперимента.....	62
2.5 Определение достаточного числа опытов.....	64
2.6 Экспериментальные исследования и методы обработки	

экспериментальных данных.....	65
ГЛАВА 3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА УГЛУБКИ СКВАЖИНЫ И АНОМАЛЬНОГО ИЗНОСА АЛМАЗНЫХ КРОНОК.....	69
3.1 Исследование схемы контакта алмазной коронки с забоем скважины.....	69
3.2 Исследования механизма приработки алмазных коронок.....	73
3.3 Исследование факторов, определяющих износ алмазных коронок.....	78
3.4 Исследования механизма заполирования и прижога алмазных коронок.....	81
3.5 Расчет времени предупреждения заполирования алмазных коронок.....	85
3.6 Исследование информативных признаков аномального износа алмазных коронок.....	88
Выводы по главе 3.....	90
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА И ОПРОБОВАНИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ТЕХНОЛОГИИ УГЛУБКИ СКВАЖИНЫ В ТВЕРДЫХ ПОРОДАХ.....	92
4.1 Изготовление экспериментального образца алмазной коронки.....	92
4.2 Расчет времени приработки забоя под алмазную коронку.....	93
4.3 Определение механической скорости бурения при приработке алмазных коронок.....	95
4.4 Технология приработки алмазной коронки.....	97
4.5 Методические рекомендации по бурению скважин в твердых горных породах.....	100
4.6 Стендовая и производственная оценка работоспособности опытной коронки.....	101
4.7 Опробование метода распознавания предупреждения аномального износа.....	117
Выводы по главе 4.....	121

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	122
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	124

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Повышение эффективности алмазного бурения, в первую очередь, связывается с увеличением износостойкости алмазного породоразрушающего инструмента и предупреждением его аномальных форм износа в процессе углубки скважины. Как в Российской Федерации, так и за рубежом, выполнен значительный объем исследований, связанный с изучением особенностей технологии алмазного бурения и конструктивных параметров алмазного породоразрушающего инструмента. В результате накоплен достаточно большой материал по исследованиям, которые направлены на изучение работы единичного алмаза, механизма разрушения горной породы в процессе углубки скважины, приработки алмазной коронки и, соответственно, конструктивных параметров алмазных коронок и технологии бурения твердых горных пород IX-XII категорий по буримости. На базе результатов этих исследований определены оптимальные конструкции алмазных коронок, даны рекомендации по технологии алмазного бурения, включая методы контроля и распознавания аномального износа коронок в процессе углубки скважины. Однако сложность механизма разрушения горной породы алмазными коронками, наличие множества факторов, определяющих этот процесс, существенно затрудняют аналитические расчеты по определению количества алмазов, контактирующих с горной породой и выполняющих работу по разрушению горного массива. Также достаточно затруднительно проведение экспериментов по изучению механизма разрушения горных пород, в связи с чем гипотезы, объясняющие работу алмазных коронок, носят достаточно противоречивый характер. В основу известных экспериментов по определению количества алмазов, контактирующих с горной породой, закладывается метод отпечатков [4]. При этом забой скважины рассматривается как идеально гладкая поверхность, а матрица коронки – как шероховатое тело. В результате таких исследований установлено, что в начальной стадии приработки алмазной коронки с поверхностью забоя контактирует не более 20% алмазов от их общего числа. По

мере приработки коронки и увеличения осевой нагрузки число контактирующих алмазов увеличивается до 70-100%. Исходя из таких исследований при приработке алмазной коронки предлагается постепенно, в течение 15-18 мин., увеличивать частоту вращения и осевую нагрузку [1, 4, 5, 85]. Авторы таких рекомендаций исходят из необходимости предохранять острые углы алмазов от скалывания и разрушения. Однако на практике при такой технологии приработки коронки часто возникает заполирование алмазов. Поэтому возникло расхождение между рекомендуемой технологией приработки и технологией, применяемой на практике. Это расхождение, на наш взгляд, возникло по следующей причине: для армирования коронок стали применять алмазы, прошедшие предварительную обработку в виде дробления, овализации и др.; в результате этого уменьшилась разновысотность алмазов, используемых для армирования коронок и повысилась их прочность. С учетом этих изменений необходимо совершенствование технологии приработки алмазного породоразрушающего инструмента.

Развивая идею использования для контроля и регулирования процесса бурения критерия углубки за 1 оборот коронки, ряд исследователей предлагает рассматривать этот критерий как обобщенный показатель эффективности физических процессов, протекающих на забое скважины [13]. Однако в алмазных коронках на разных линиях резания находится неодинаковое число алмазов. Тогда приходится принимать условие, что во всех линиях резания в контакте с горной породой находится одинаковое количество алмазов. Практически, как показывают исследования, это маловероятное условие [69, 70].

Также к настоящему времени имеются определенные недостатки как в конструкции алмазных коронок, предназначенных для бурения твердых горных пород, так и в самой технологии бурения. Бурение скважин в твердых трещиноватых и плотных горных породах сопровождается различными осложнениями как технического, так и технологического характера. В конечном итоге это приводит к значительному снижению технико-экономических показателей алмазного бурения. К таким осложнениям, в первую очередь, следует отнести: уменьшение проходки за рейс из-за самозаклинивания раздробленных

частиц керна в колонковой трубе и в самой алмазной коронке, заполирование и прижог алмазных коронок, а также обрыв бурильных труб [19, 59]. Все это вместе приводит к вынужденному прекращению процесса бурения скважины и необходимости проведения дополнительных спуско-подъемных операций; а также к аномальному износу алмазных коронок и увеличению расхода алмазов на метр проходки [59].

По особенностям бурения все твердые горные породы можно разделить на твердые трещиноватые, плотные твердые горные породы IX-X категорий по буримости и плотные малоабразивные твердые породы XI-XII категорий по буримости [66]. В таблице 1 приведены объемы бурения в твердых монолитных и трещиноватых горных породах на месторождениях полезных ископаемых в условиях Монголии (на примере месторождения Эрдэнэт) [90, 91].

Таблица 1 – Распределение объемов алмазного бурения [90]

Твердые горные породы	Объемы алмазного бурения, %	В том числе, по категориям горных пород по буримости	
		IX-X	XI-XII
Монолитные Слаботрещиноватые	10	8	2
Трещиноватые Сильнотрещиноватые	30	25	5
Весьма и исключительно сильнотрещиноватые	60	50	10
Всего:	100	83	17

Из анализа данных таблицы 1 видно, что 10 % объема бурения приходится на монолитные, слаботрещиноватые горные породы и 90 % объемов алмазного бурения приходится на трещиноватые горные породы.

В таблице 2 приведены различные виды износа алмазных импрегнированных и однослойных коронок при бурении твердых горных пород [89].

Под нормальным износом понимается равномерное изнашивание матрицы по высоте, внутреннему и наружному диаметру. К механическому износу

Таблица 2 – Виды износа импрегнированных алмазных коронок

Вид износа	Распределение видов износа (%)
Нормальный износ	19
Технологический износ	7
Абразивный износ	58
Механический износ	9
Аварийный износ	7
Всего	100

отнесены скол секторов матрицы, законусованность матрицы и появление в матрице трещин; к технологическому износу отнесено зашлифование (заполирование) алмазов. К абразивному износу отнесены размыв корпуса коронки и секторов матрицы; образование канавки по торцу и боковым поверхностям матрицы. К аварийному износу автор относит смятие резьбовой части корпуса коронки и прижог. Детализация видов износа алмазных коронок приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Виды износа алмазных коронок

Вид износа	Распределение видов износа по типам коронок (%)	
	Импрегнированные	Однослойные
Равномерный	29	27
Износ по диаметру	6	5
Заполирование	5	8
Прижог	7	9
Образование канавок	48	38
Трещины и сколы матрицы	3	8
Прочие виды	2	5
Всего	100	100

Из данных таблиц 2 и 3 следует, что почти 30 % износа алмазных коронок приходится на заполирование и прижог.

В таблице 4 приведены технико-экономические показатели алмазного бурения в монолитных и трещиноватых горных породах в условиях Российской

Таблица 4 – Результаты отработки алмазных буровых коронок диаметром 0,059 м в плотных и трещиноватых горных породах [66]

Тип породоразрушающего инструмента	Степень трещиноватости горных пород	Проходка на коронку, м	Проходка за рейс, м	Расход алмазов, карат/м	Механическая скорость бурения, м/ч
Однослойная 01А3	Плотные	20,5	2,6	0,56	1,01
	Трещиноватые	11,6	2,2	0,86	0,72
Однослойная 01А4	Плотные	13,1	2,7	0,64	0,76
	Трещиноватые	4,9	2,4	1,42	0,65
Импрегнированная 02И3	Плотные	11,0	2,1	1,32	0,60
	Трещиноватые	6,6	1,7	2,22	0,56
Импрегнированная 02И4	Плотные	5,3	1,4	2,89	0,46
	Трещиноватые	4,0	0,8	3,71	0,45

Федерации [12, 66]. Как следует из анализа данных таблицы 4, при бурении в трещиноватых породах имеет место меньшая проходка за рейс, меньшая механическая скорость бурения и больший расход алмазов. Данные, представленные в таблицах 1-4, свидетельствуют об актуальности рассматриваемой проблемы.

Так как не всегда имеются условия для отработки заполированной алмазной коронки в более абразивных горных породах до полного ее износа, то часто приходится снимать коронку с дальнейшей эксплуатации преждевременно, что ведет к повышенному расходу алмазов.

Пытаясь ликвидировать заполирование, бурильщик выполняет «заточку» коронки на забое скважины либо увеличением осевой нагрузки, либо кратковременным прекращением циркуляции очистного агента. Часто это приводит к прижогу алмазного породоразрушающего инструмента; прижог возникает и при бурении в твердых трещиноватых породах IX-XII категорий по буримости. В 50 % случаев прижог является причиной различных аварий в скважине [21, 30].

В связи с этим актуальной задачей является разработка методов распознавания и предупреждения в процессе углубки скважины таких форм аномального износа алмазных коронок как заполирование и прижог. Из-за отсутствия таких рекомендаций не каждый бурильщик способен достаточно быстро оценить сложившуюся технологическую ситуацию по поступающей к нему информации о забойных процессах. В связи с этим довольно часто бурильщик запоздало реагирует на показания контрольно-измерительных приборов и принимает неправильные действия по управлению процессом бурения. Таким образом необходимо изучение информативных признаков различных технологических ситуаций и построение алгоритмов их распознавания и предупреждения с использованием серийной контрольно-измерительной аппаратуры.

Анализируя вышесказанное, следует отметить, что решение поставленной проблемы связано с исследованием механизма контактирования алмазных

коронки с забоем скважины, изучением механизма аномального износа алмазного породоразрушающего инструмента; разработкой и опробованием методических рекомендаций по распознаванию и предупреждению заполирования и прижога как в процессе приработки коронки, так и непосредственно в процессе бурения скважины в твердых монолитных и трещиноватых породах.

Работа выполнялась в Санкт-Петербургском горном университете. Основу работы составили теоретические, экспериментальные и опытно-производственные исследования, выполненные непосредственно самим автором, так и при его участии.

**Цель работы:** Совершенствование технологии алмазного бурения скважин в твердых горных породах.

**Идея работы:** Распознавание и предупреждение аномального износа алмазных коронок в процессе углубки скважины.

#### **Основные задачи исследований.**

1. Анализ механизма контактирования алмазов с забоем скважины с учетом его криволинейности.
2. Анализ конструктивных особенностей алмазных коронок, механизма их износа и технологии алмазного бурения.
3. Разработка методики исследований, планирование эксперимента и выбор бурового оборудования для выполнения стендовых исследований.
4. Исследование механизма износа алмазных коронок, выбор конструктивных параметров алмазных коронок и схемы циркуляции очистного агента.
5. Определение информационных признаков аномального износа алмазных коронок и разработка методических рекомендаций по технологии бурения скважин в твердых горных породах.

#### **Методы исследований.**

Анализ и обобщение литературы; планирование эксперимента; лабораторные и стендовые исследования механизма контактирования алмазных коронок с забоем скважины, температурного режима работы алмазных коронок;

анализ экспериментальных данных; проверка на сходимость теоретических и экспериментальных данных.

**Теоретические исследования** были направлены на изучение физического процесса взаимодействия алмазного инструмента с горной породой. При исследованиях использовались существующие закономерности теплофизических процессов, опытные данные других исследователей и результаты опытов, проведенных автором. При этом обработка данных производилась с использованием персональных компьютеров. Экспериментальные исследования разработанных методов и технических средств проводились с целью проверки их работоспособности и подтверждения теоретических принципов, заложенных в их основу.

**Основные научные результаты**, полученные лично соискателем:

1. Анализ современного состояния технических средств и технологии бурения скважин в твердых горных породах, позволивший сформулировать цель и задачи работ.

2. Методика исследований и определения количества алмазов, контактирующих с криволинейной поверхностью забоя скважины.

3. Аналитические исследования механизма приработки алмазных коронок, классификация и исследование форм аномального износа алмазных коронок, определение информативных признаков заполирования и прижога, методические рекомендации по их распознаванию и предупреждению в процессе углубки скважины.

4. Экспериментальные исследования и опробование методических рекомендаций для бурения скважин в твердых горных породах.

**Научная новизна** заключается в установлении закономерности изменения механической скорости бурения и мощности на приводе бурового станка при заполировании и предприжоге алмазных коронок, в выявлении механизма заполирования и предприжога алмазных коронок и установлении зависимости для времени ликвидации заполирования от параметров режима бурения и теплофизических характеристик матрицы алмазной коронки.

**Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** определяется современным уровнем теоретических исследований, обоснованным объемом экспериментальных исследований и удовлетворительной сходимостью теоретических и экспериментальных данных.

**Практическая значимость работы** заключается в следующем:

– полученное экспериментальное решение задачи о количестве алмазов, контактирующих с забоем скважины применимо при выборе технологии приработки алмазных коронок;

– выявленные информативные признаки аномального износа алмазных коронок позволяют однозначно распознавать заполирование и прижог алмазных коронок в процессе углубки скважины;

– разработанные рекомендации по технологии бурения твердых горных пород с применением модернизированных алмазных коронок и серийных контрольно-измерительных приборов позволяют существенно повысить технико-экономические показатели бурения скважин в твердых горных породах.

**Научные положения выносимые на защиту.**

**Первое защищаемое положение.** Заполирование и предприжог алмазных коронок однозначно распознаются по изменению механической скорости бурения и мощности, потребляемой электропривоприводом бурового станка: для заполирования характерно уменьшение мощности и механической скорости, для предприжога – увеличение мощности и механической скорости бурения.

**Второе защищаемое положение.** Разработанные методические рекомендации по предупреждению аномального износа алмазных коронок позволяют получить увеличение механической скорости (на 10-15 %), проходки за рейс и на коронку (на 15-25 %) за счет оперативного распознавания и предупреждения заполирования и предприжога.

**Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** обоснована результатами теоретических, экспериментальных и производственных исследований. О достоверности результатов исследований свидетельствует удовлетворительная сходимость расчетных величин с фактическими данными,

полученными в стендовых и производственных условиях, а также положительные результаты практического использования разработанных методов и рекомендаций по технологии углубки скважины при алмазном бурении.

**В процессе выполненных исследований впервые:**

1. Показано, что в начале приработки алмазных коронок в контакте с поверхностью забоя находится до 70-100 % объемных алмазов от их общего числа.

2. Установлено, что разновысотность выступания алмазов из тела матрицы не является интегральным показателем, определяющим число алмазов, находящихся в контакте с поверхностью забоя.

3. Дифференцировано влияние на механизм заполирования и прижога таких комплексных факторов как физико-механические свойства горных пород, параметры режима бурения и температуры в зоне контакта коронки с забоем скважины. Исследована методом плавких ставок температура в зоне контакта коронки с забоем при заполировании, прижоге и нормальном износе алмазной коронки.

4. Выявлены информативные признаки заполирования и прижога: признаками заполирования является одновременное постепенное снижение мощности, потребляемой электроприводом бурового станка, и механической скорости бурения в течение 2-3 мин; признаком прижога является резкое увеличение мощности в течение 20-30 с.

Личный вклад автора заключается в постановке всех задач исследований и разработке методов для их реализации, организации и личного участия в выполнении как теоретических, лабораторных, так и стендовых исследований; в разработке методов распознавания и предупреждения аномального износа в процессе углубки скважины.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались на XVI Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы буровой службы Монголии» (г. Улаанбаатар, 2014 г.); на XVII международной молодежной научной конференции «Севергеоэкотех-2016»

(г.Ухта, 2016 г.); на Международной научно-практической конференции «Бурение в осложненных условиях » (г. СПб., 2016 г.); на XVIII Международной научно-практической конференции «Бурение-2016» (г. Улаанбаатар, 2016 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 8 работ, в т.ч. две – в журналах рекомендованных ВАК, 2 статьи в журналах, индексируемых международной научной базой цитирования SCOPUS, и тезисы четырёх докладов.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 134 страницах машинописного текста, включая 31 рисунка, 46 таблиц, список использованной литературы, из 94 наименований.

# ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕХАНИЗМА УГЛУБКИ СКВАЖИНЫ

## 1.1 Классификация твердых горных пород и особенности механизма их разрушения при алмазном бурении

Все твердые горные породы можно разделить на твердые трещиноватые, плотные твердые горные породы IX-X категорий по буримости и плотные весьма твердые горные породы XI-XII категорий по буримости [1, 11, 39, 42, 49, 56, 66]. По степени трещиноватости выделяют следующие группы пород [54, 66]:

- слаботрещиноватые породы (ширина трещин меньше 1 мм);
- среднетрещиноватые породы (ширина трещин 1-5 мм);
- сильнотрещиноватые породы (ширина трещин больше 5 мм);
- очень сильнотрещиноватые породы (кern раздроблен и представлен угловатыми обломками).

Твердость и трещиноватость горных пород оказывают существенное влияние на износ алмазных коронок [1, 4, 20, 22, 42, 49, 52, 55, 66]. С увеличением степени трещиноватости горных пород работоспособность породоразрушающего инструмента существенно снижается. Влияние трещиноватости горных пород на износ матрицы алмазной коронки в очень твердых породах проявляется гораздо сильнее, чем менее твердых. Это объясняется особенными условиями механизма разрушения трещиноватых горных пород при алмазном бурении. В результате взаимодействия алмазной коронки с трещиноватой горной породой образуется большое количество крупных частиц шлама размером от 0,005 м до 0,01 м. Размер и количество образующегося бурового шлама зависят от параметров режима бурения, внутреннего диаметра колонковой трубы и диаметра столбика керна [53, 54, 55, 59].

Весьма твердые плотные горные породы X-XII категории характеризуются крайне низкой буримостью. При бурении таких твердых

плотных пород часто возникает заполирование алмазов, а действия бурильщика по предупреждению заполирования в процессе углубки скважины иногда приводят к возникновению прижога. Анализ показывает, что это плотные упруго-хрупкие породы *X-XII* категории по буримости с большим процентным содержанием таких карбидообразующих элементов как железо и кварц [11,19, 21] (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Горные пород, при бурении которых имеет место заполирование алмазов

Горная порода	Категория по буримости	Основные компоненты пород	Содержание компонента, %
Гранит	<i>IX-XI</i>	Кварц, полевой шпат	30; 60
Аплиты	<i>IX-X</i>	Кварц, полевой шпат	30; 60
Пегматит	<i>X-XI</i>	Кварц, полевой шпат	30; 60
Уртиты	<i>IX-X</i>	Нефелин	70-100
Кварциты	<i>X-XII</i>	Кварц	90
Джеспилиты	<i>XI-XII</i>	Кварц, железо	50; 50
Гранодиориты	<i>IX-XI</i>	Кварц, плагиоклаз	20; 70
Альбитофиры	<i>IX-X</i>	Кварц, альбит	40; 40
Железистые кварциты	<i>X-XII</i>	Железо, кварц	40; 60

Таким образом наиболее сложными для бурения являются трещиноватые горные породы и малоабразивные плотные горные породы *X-XII* категорий по буримости. Для повышения эффективности бурения скважин в таких горных породах целесообразно установить механизм взаимодействия алмазной коронки с горной породой: определить количество алмазов, контактирующих с горной породой на забое скважины; установить оптимальную схему циркулирования очистного агента и удаление шлама с забоя скважины; исследовать информативные признаки форм аномального износа алмазного породоразрушающего инструмента.

## 1.2 Анализ теоретических и экспериментальных методов определения количества алмазов, контактирующих с забоем скважины

### 1.2.1 Классификация методов

В таблице 1.2 приведена схема, в определенной мере классифицирующая существующие методы определения числа алмазов, участвующих в контакте и разрушении горной породы [15, 24, 26, 27, 64, 69, 86, 87].

Таблица 1.2 – Примерная классификация методов определения числа работоспособных алмазов

Группа методов	Подгруппа методов	Область применения
Расчетные методы	Детерминированные	Импрегнированные коронки
	Вероятностные	
Эмпирические методы	Лабораторные	Однослойные коронки
	Стендовые	

В данной классификации заложены два основных принципа, в соответствии с которыми выделяются группа теоретических (расчетных) и группа эмпирических (практических) методов. В свою очередь, в группе расчетных методов выделены подгруппы, в основе которых лежит методика расчетов с использованием как детерминированных, так и вероятностных методов. Как правило, в теоретических методах расчетным путем определяется число алмазов, гипотетически участвующих в разрушении горной породы. При эмпирических методах определяется число алмазов, находящихся в контакте с поверхностью забоя скважины. Среди эмпирических методов выделены лабораторные и стендовые. При лабораторных методах определяется число алмазов, находящихся в контакте с плоскостью, имитирующей забой скважины. В стендовых методах

исследование числа контактирующих алмазов осуществляется непосредственно при бурении блоков (например, блоков стекла), имитирующих горную породу.

### 1.2.2 Детерминированные методы

Наиболее простая детерминированная формула для расчета числа  $N$  алмазов, находящихся в контакте с горной породой при работе импрегнированной коронки, имеет вид:

$$N = m \cdot A \quad (1.1)$$

где  $m$  – средняя масса объемных алмазов в одном слое, кар.;  $A$  – зернистость объемных алмазов, шт/кар.

Используя формулу (1.1), автор работы [69] определяет нагрузку на контакте алмаза с горной породой. Расчет по формуле (1.1) носит достаточно приближенный характер.

Впервые детальный расчет числа режущих зерен для импрегнированных алмазных коронок выполнен в работе [27]. При расчете приняты следующие конструктивные, технологические и теоретические положения:

- все алмазы равномерно распределены по объему матрицы коронки;
- площадь контакта торца коронки с забоем не меняется во времени;
- торец коронки находится в сплошном контакте с забоем.

Число алмазов в  $1 \text{ мм}^3$  алмазосодержащего слоя матрицы определяется из выражения вида:

$$z \cdot r^3 = 0,25 \frac{K}{100} \quad (1.2)$$

где  $z$  – число зерен в  $1 \text{ мм}^3$ , шт;  $r$  – средний размер алмаза, мм;  $K$  – концентрация алмазов, %.

Из выражения (1.2.) следует:

$$z = 0,25 \frac{K}{r^3 \cdot 100} \quad (1.3)$$

С другой стороны, полагая  $z=z_p$  (т.е. числу алмазных зерен на ребре куба в  $1 \text{ мм}^3$ ), имеем:

$$z_p = \frac{1}{r} \sqrt[3]{\frac{0,25K}{100}} \quad (1.4)$$

Выделяя в объеме матрицы слой площадью в  $1 \text{ мм}^2$  и толщиной  $1/z_p$ , автор находит число  $z_n$  алмазов в этом слое:

$$z_n = \sqrt[3]{\left(\frac{0,25K}{100r^3}\right)^2} \quad (1.5)$$

Окончательное число алмазов на торце коронки определяется как:

$$z_T = \frac{\pi \cdot D_{cp} \cdot b \cdot z(1-a) \cdot \Delta}{a(1-z_p \cdot r)} \quad (1.6)$$

где  $D_{cp}$  – средний диаметр коронки, мм;  $b$  – ширина торца, мм;  $\Delta$  – величина углубки алмаза, мм;  $z_p$  – число алмазов на ребре куба объемом  $1 \text{ мм}^3$ , шт.

Величина  $a$  определяется из выражения вида:

$$a = \frac{2 \cdot D_{cp} \cdot \pi}{p \cdot l} \quad (1.7)$$

где  $p$  – число промывочных каналов, шт;  $l$  – длина промывочного канала, мм.

Из формулы (1.6.) следует, что число алмазных зерен, разрушающих горную породу, зависит от: размеров и числа промывочных канавок; концентрации и зернистости алмазов; параметров режима бурения, определяющих величину углубки алмазов в горную породу.

С учетом сказанного окончательно предлагается следующая формула:

$$z_T = \frac{3 \cdot V_{мех} (D_n^2 - D_e^2)}{16n \cdot D_{cp} \Delta \sqrt{2\rho\Delta}} \quad (1.8)$$

где  $V_{мех}$  – механическая скорость бурения, м/ч;  $D_n, D_e$  – наружный и внутренний диаметры коронки, мм;  $\rho$  – радиус округления алмазного зерна, мм;  $n$  – частота вращения породоразрушающего инструмента,  $\text{мин}^{-1}$ .

Данные расчета числа режущих зерен по формуле (1.8.) приведены в таблице 1.3, из которой следует, что число режущих алмазных зерен для коронок различного диаметра составляет 6 – 8 % от общего числа алмазов в рабочем слое.

Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с данными расчетов для алмазных шлифованных кругов [71].

Таблица 1.3 – Число режущих алмазных зерен для импрегнированных коронок

Типоразмер коронки	Характеристика объемных алмазов			Расчетное число режущих алмазных зерен в слое, шт	Общее число алмазных зерен в слое, шт
	масса, карат	зернистость, шт/карат	концентрация, %		
О2ИЗ-46	5,2	400-300	39	23	303
О2ИЗ-59	8,8	400-300	42	34	514
О2ИЗ-76	12,0	400-300	44	40	700
О2И4-59	8,8	300-150	42	20	234
О3И5-46	5,2	300-150	39	29	396

В исследованиях [64] число алмазов, находящихся в работе при бурении импрегнированными коронками, определяется исходя из следующих положений:

- алмазы имеют округлую форму;
- алмазы равномерно распределены по всему объему матрицы.

Число  $N_a$  зерен в алмазосодержащем слое высотой  $H_m$  и площадью  $F_m$  определяется из выражения:

$$N_a = G_a \cdot K_a \quad (1.9)$$

где  $G_a$  – общая масса алмазов;  $K_a$  – зернистость алмазов.

Так как все алмазы рассматриваются как округлые тела с диаметром оболочки  $d_0$ , то имеем:

$$d_0 = \sqrt[3]{\frac{F_m \cdot H_m}{N_a}} \quad (1.10)$$

Для дальнейшего анализа рассмотрим рисунок 1.1, на котором изображена часть матрицы и забоя скважины. Рассмотрим схему контактирования алмазов с забоем применительно к сечениям, отмеченным на рисунке 1.1. В сечении  $0-0$  с участком забоя могут контактировать только алмазы, не подверженные износу. Практически же таких алмазов нет. В сечении  $\omega_a-\omega_a$  все алмазные зерна с центром

$0_1$  будут иметь максимальные площадки притупления. Максимальное число обнаженных алмазов будет соответствовать сечению  $1/3d_a - 1/3d_a$ . Число алмазов в сечениях,

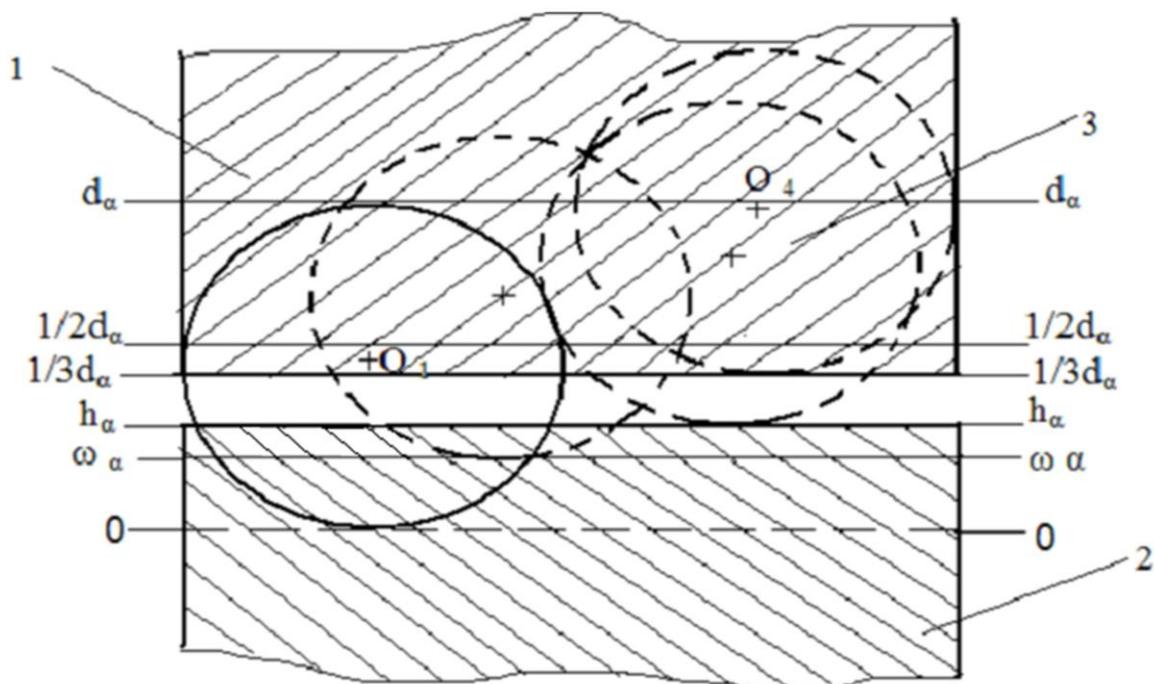


Рисунок 1.1 – Схема распределения алмазов матрице импрегнированной коронки [64]:

1 – матрица; 2 – алмаз; 3 – горная порода;  $(\cdot)0$ ; ...  $(\cdot)0_4$  – возможные точки расположения центров алмазных зерен;  $0-0$ ;  $\omega_a - \omega_a$ ;  $h_a - h_a$ ;  $1/3d_a - 1/3d_a$ ;

$1/2d_a - 1/2d_a$ ;  $d_a - d_a$  – сечения алмазосодержащего слоя матрицы

расположенных выше забоя, будет последовательно возрастать до сечения  $d_a - d_a$ , за счет уменьшения числа выкрашивающихся алмазов. Расчет числа алмазов  $N_1$ , находящихся выше сечения  $d_a - d_a$ , дает следующую формулу:

$$N_1 = \frac{6d_a \cdot G_a \cdot K_a}{\pi \cdot H_M} \quad (1.11)$$

где  $d_a$  – диаметр алмазного зерна, мм.

Для сечения  $1/2d_a - 1/2d_a$ , имеем:

$$N_2 = \left(\frac{6}{\pi} - \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{d_a \cdot G_a \cdot K_a}{H_M} \quad (1.12)$$

Принимая условно выкрашивание алмазов по мере их обнажения как равномерное, считается что зависимость рабочего числа алмазных зерен от

расстояния, на котором находится плоскость их сечения  $0-0$ , является линейной. Уравнение этой линейной зависимости имеет вид:

$$N_i = \frac{G_a K_a}{H_m} x_i + \left( \frac{6}{\pi} - 1 \right) \frac{d_a G_a K_a}{H_m} \quad (1.13)$$

где  $N_i$  – число алмазов в  $i$ -ом сечении, шт;  $x_i$  – расстояние до  $i$ -го сечения от нулевого сечения, мм.

Число алмазов, находящихся в контакте с горной породой в момент соприкосновения коронки с забоем скважины (сечение  $\omega_a - \omega_a$ ) определяется по формуле:

$$N\omega_a = \left[ \left( \frac{6}{\pi} - 1 \right) d_o + \omega_a \right] \frac{G_a K_a}{H_m} \quad (1.14)$$

Для сечения  $h_a - h_a$ , имеем.

$$Nh_a = \left[ \left( \frac{6}{\pi} - 1 \right) d_a + \omega_a + h_a \right] \frac{G_a K_a}{H_m}, \quad (1.15)$$

Формула (1.15) предназначена для расчета числа контактирующих алмазов в зависимости от глубины их внедрения и износа.

В работе [69] число алмазов разрушающих горную породу ("активные" алмазы), определяется через показатель буримости  $K_b$ .

При решении данной задачи принята следующие положения.

1. В контакте с горной породой находятся все торцевые алмазы; однако нагрузка на контактах не достаточна для разрушения, аналогичного разрушению мягкой горной породы резовыми коронками [69, 76].

2. При бурении алмазными коронками всегда имеет место процесс предварительного ослабления горной породы за счет сил трения; такое микроразрушение обеспечивает возможность только какой-то части торцевых алмазов производить объемное разрушение горной породы ("активные" алмазы).

3. Процесс разрушения горной породы алмазной коронкой носит упругохрупкий характер, при этом глубина  $h_n$  лунки разрушения много больше величины упругой деформации  $\delta$ .

4. Углубка за оборот носит непрерывный характер, число  $N_a$  алмазов

на окружности среднего радиуса определяется как:

$$N = h_{об}/h_a \quad (1.16)$$

где  $h_{об}$  – углубка за 1 оборот, мм;  $h_a$  – углубка одного алмаза, мм.

Используя перечисленные положения, число активных алмазов для импрегнированных коронок определяется зависимостью вида

$$N_a = 1,41 \times 10^6 (\rho - 0,9) R^{1,5} N^2 K^{0,4} / \rho \quad (1.17)$$

где  $R$  – радиус алмаза, мм;  $\rho$  – среднее расстояние между алмазами в линии резания, мм;  $N$  – число алмазов в линии резания, шт.

Выполненный расчет числа активных алмазов для коронки КИТ-59 показал, что их число находятся в пределах 8,2-10,5 % и зависят от величины показателя  $K_{об}$ .

### 1.2.3 Вероятностные методы

В работе [63] при расчетах усилия резания на алмаз, число работоспособных алмазов определяется с учетом вероятности попадания высоты выступания алмазных зерен в интервал высоты, определяемый средней толщиной среза единичным алмазом или углубкой инструмента за оборот.

$$f_{cp} = \frac{4M_{кр}}{(D+d)N_p\beta P(h^{cp})} \quad (1.18)$$

где  $f_{cp}$  – среднее усилие резания на алмазе;  $M_{кр}$  – крутящий момент, Н·м;  $D$  и  $d$  – наружный и внутренний диаметры коронки, см;  $N_p$  – расчетное число зерен на рабочей поверхности коронки, шт;  $\beta$  – коэффициент определяющий число работоспособных зерен на поверхности инструмента, большинство из которых находятся в контакте с горной породой;  $P(h^{cp})$  – вероятность попадания высоты выступания алмазного зерна в интервал высоты, определяемый средней толщиной среза породы единичным алмазом. Таким образом, в формуле (1.18) величина  $P(h^{cp})$  определяет число рабочих зерен в инструменте.

Авторами данной работы установлено что, вероятность того, что расстояние между зернами алмазов в линии резания и высота выступания алмазов из матрицы будут соответствовать их средним значениям, равна 0,012. Это свидетельствует, что для алмазных импрегнированных коронок при их изготовлении невозможно достичь равновысотности выступания алмазов из матрицы и одинаковых расстояний между ними в линии резания.

Аналогичная схема расчета использована в работе [35]. Применительно к импрегнированным коронкам используется усовершенствованный показатель вида:

$$\beta P(h_i^{cp}) = \frac{4 \times F \times 10^7}{0.375 \pi P_{mm} d_{cp} Z S_m K_a^2 h_B (N d_{cp})^{1/2} (\pi D_{cp} - m B_n)} \quad (1.19)$$

где  $F$  – осевая нагрузка на коронку, даН;  $P_{mm}$  – твердость горной породы, даН/мм<sup>2</sup>;  $d_{cp}$  – средневзвешенный размер алмазного зерна, мм;  $Z$  – плотность распределения алмазов на поверхности торца матрицы, шт/мм<sup>2</sup>;  $K$  – коэффициент, учитывающий форму алмазного зерна;  $h_B$  – высота выступания алмазов из матрицы, мм;  $N$  – число алмазных зерен в 1 карате, шт/кар;  $D_{cp}$  – средний диаметр матрицы, см;  $m$  – число секторов, шт;  $B_n$  – ширина промывочного канала по окружности среднего радиуса, см.

В работе [42] задача решается на основе аппарата имитационного моделирования, где алмазные зерна имеют случайные размеры и характеризуются случайным их расположением в матрице. По форме алмазы рассматриваются как шар, размеры которого являются случайной величиной с нормальным законом распределения:

$$M_x = \sqrt{x_{max} \times x_{min}}; \quad \delta = 0.11 M_x; \quad 2r = \frac{N}{M_x} \quad (1.20)$$

где  $M_x$  – математическое ожидание величины диаметра шарового алмаза;  $x_{max}$ ,  $x_{min}$  – границы диапазона зернистости алмазов основной фракции;  $\delta$  – среднеквадратическое отклонение;  $r$  – радиус алмазного зерна, мм.

Дальнейшие расчеты связаны с числом  $N_l$  алмазных зерен в 1 см<sup>3</sup> алмазного слоя.

$$N_1 = 4,4N_k \frac{K}{100} \quad (1.21)$$

где  $N_k$  – число алмазов в 1 карате;  $K$  – относительная концентрация алмазов, %.

Из выражения (1.21) для длины  $L$  ребра куба приходящегося на одно алмазное зерно, имеем:

$$L = \frac{1}{\sqrt[3]{4,4N_k K 10^{-2}}} \quad (1.22)$$

Тогда максимальное число  $N_a$  алмазов по всей площади  $S_k$  рабочего торца матрицы определится из выражения:

$$N_a = \frac{S_k}{L^2} = \frac{\pi}{4} (d_n^2 - d_s^2) \left( 1 - \frac{2L_n m}{\pi(d_n + d_s)} \right) \sqrt{(4,4N_k K 10^{-22}} \quad (1.23)$$

где  $d_s$ ,  $d_n$  – внутренний и наружный диаметры матрицы;  $L_n$  – ширина промывочного паза, см;  $m$  – число секторов, шт.

Алмазы, центры тяжести которых расположены ниже связки, выкрашиваются и участия в разрушении горной породы не принимают. В разрушении участвуют все алмазы, для которых выполняется условие:

$$h_i = r_i - z > 0 \quad (1.24)$$

где  $h_i$  – высота выступания алмаза из матрицы;  $r_i$  – радиус алмаза;  $z$  – уровень связки.

В этом случае доля фактического числа  $N_\phi$  алмазов, участвующих в разрушении, будет представлять отношение числа алмазов удовлетворяющих условию (1.24), к общему числу  $N_a$  алмазов. При расчетах числа  $N_\phi$  значения радиуса  $r_i$  алмазных зерен и глубины залегания центра тяжести алмазного зерна относительно верхней границы куба алмазного слоя с размером ребра 1 мм выбираются при помощи датчиков случайных чисел.

При реализации на ЭВМ имитационной модели применительно к алмазным коронкам диаметром 59 мм с синтетическими алмазами получены данные (таблица 1.4), анализ которых показывает, что число алмазов составляет 38—50 % от расчетного.

Таблица 1.4 – Результаты расчета числа алмазов на поверхности торца матрицы

Зернистость. мкм	Среднее число алмазов в 1 карате.	Концентрация алмазов в матрице. %	Средний диаметр алмазного зерна, мкм	Число алмазов. шт	
				На 1 см <sup>2</sup> площади матрицы <sup>x</sup>	По всей площади матрицы
250/200	7810	125	223,6	1226/469	3932
		150		1385/553	4637
		175		1535/654	5483
		200		1678/759	6364
315/250	4190	125	280,6	810/317	2658
		150		914/385	3228
		175		1013/455	3815
		200		1107/511	4284
400/315	2250	125	354,9	535/214	1794
		150		604/262	2196
		175		669/306	2565
		200		732/356	2985

В графе число алмазов на 1см<sup>2</sup> площади матрицы в числителе приведены расчетное  $N_A$ , в знаменателе фактическое  $N_\phi$  число алмазов на 1 см<sup>2</sup> площадки матрицы. Общая площадь поверхности матрицы – 838,53 мм<sup>2</sup>.

### **1.3 Методы экспериментального определения количества алмазов, контактирующих с горной породой**

В основу лабораторных исследований в работе [4] положен метод отпечатков. В качестве имитатора горной породы использовалась пластина из органического стекла, на которой наносились контуры коронки. На пластине, в пределах контура, размещалась алмазная коронка, на которую устанавливался груз в 5 и 20 даН. Затем проводилось смещение коронки на 0.5-1.0 мм путем ее вращения. В заключение коронка снималась с оргстекла, полученные отпечатки

алмазов на оргстекле заполнялись тушью и производился подсчет их числа (таблица 1.5).

Таблица 1.5 – Результаты эксперимента по определению числа отпечатков алмазов

Тип коронки	Число отпечатков алмазов при нагрузке на коронку, даН.	
	5	20
О1А3-59 (неприработанная)	13	20
А4ДП-59 (приработанная)	42	53

Из таблицы следует, что при нагрузке 5 даН у неприработанной коронки в контакте находится 12 % алмазов от их общего числа (в среднем, для коронок О1А3-59 общее число объемных алмазов составляет 102 шт); с увеличением нагрузки до 20 даН число контактирующих алмазов увеличивается до 20 % от их общего числа (рисунок 1.2.). Второй этап экспериментов включал исследование в процессе бурения скважины. На основе измерений высоты выступания алмазов из матрицы для коронки типа А4ДП рассчитано среднее число алмазов, контактирующих с забоем скважины в зависимости от глубины внедрения алмазов. При этом поверхность забоя принята гладкой, а коронки шероховатой. Анализ результатов расчета показывает, что в начальный момент времени с поверхности забоя контактирует ограниченное число алмазов, не превышающее 20 % от числа всех объемных алмазов. По мере увеличения глубины внедрения алмаза в породу, число контактирующих алмазов может достигать 80-100 %.

Для проверки расчетных данных проводились исследования при бурении производственных скважин. С помощью портативного профилемера производились замеры выступания алмазов из матрицы по средней линии резания одного и того же сектора коронки (да и после бурения). Установлено, что в начальный момент работы число контактирующих алмазов других линий резания этого же сектора увеличивается до 16-20 шт, а в конечный период отработки алмазной коронки в контакте находится до 70-100 % алмазов.

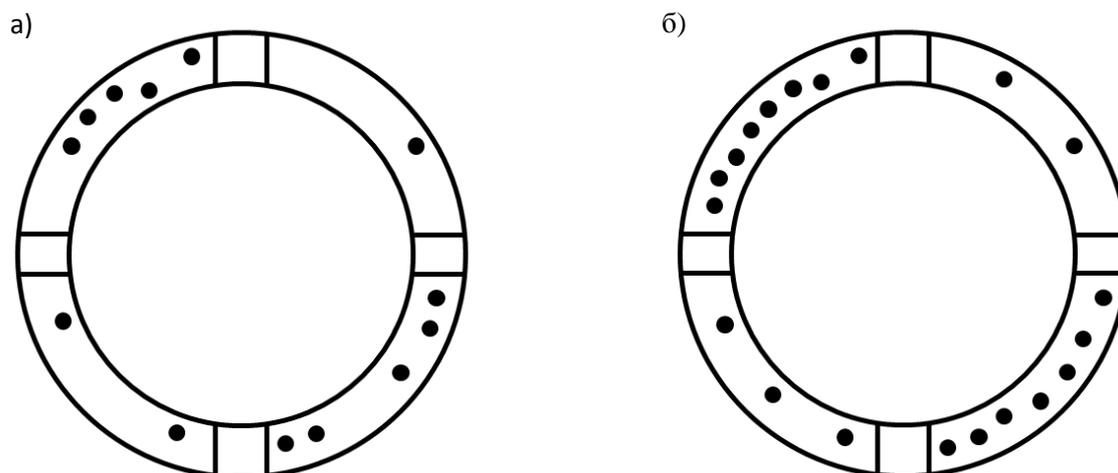


Рисунок 1.2 – Число отпечатков алмазов, контактирующих с контртелом  
(неприработанная коронка):

а)  $P=5$  даН; б)  $P=20$  даН

По результатам исследований установлено, что характер распределения значений выступания алмазов из матрицы соответствует нормальному закону. Проверка в производственных условиях закона распределения показала сохранение этой качественной стороны, то есть высота выступания алмазов из матрицы по мере их износа уменьшается, а нормальный закон распределения сохраняется.

В работе [15] исследования проводились на специальном стенде при горизонтальном бурении по блоку оптического стекла. Исследованию выполнялись в два этапа: 1 – бурение по принципу «сверления», когда длина бурильной колонны составляла 2 м; 2 – при бурении использовалась гибкая бурильная колонна 50 м. Применялись алмазные однослойные и импрегнированные коронки типа О1А3, К-О1, О2ИЗ, БС-О1. Со стороны забоя велась киносъемка. Анализ киноматериалов (на 1-м этапе) позволил установить следующие:

- породу разрушают одним и те же алмазы, расположенные на одном-двух секторах коронки;

- коронка нагружена не симметрично, что определяется изгибом колонковой трубы и характером вращения ее вокруг оси скважины;

– число алмазов, разрушающих горную породу, составляет 5-20 % от всех объемных алмазов: остальные алмазы находятся в упругом контакте с породой;

– с увеличением осевой нагрузки увеличивается число алмазов, разрушающих горную породу.

При включении в работу бурильной колонны (2-й этап) кинематика движения алмазной коронки значительно сложнее и связана с режимом вращения бурильной колонны.

#### **1.4 Классификация и анализ конструктивных особенностей алмазных коронок**

Известен ряд алмазных коронок (однослойных и импрегнированных), предназначенных для бурения твердых плотных и трещиноватых горных пород [1, 5, 9, 10, 12, 14, 16, 17, 18, 23, 34, 48, 50, 57, 59, 62, 75, 79, 80]. В зависимости от конструкций матрицы все эти коронки можно разделить на четыре основные группы [22]:

1. Коронки со стандартной толщиной матрицы.
2. Коронки с утолщенной матрицей.
3. Коронки с тонкостенной матрицей.
4. Коронки со сплошной матрицей.

В свою очередь среди алмазных коронок со стандартной толщиной матрицы можно выделить:

1. Коронки со стандартной секторной матрицей.
2. Коронки с измененной конструкцией секторов.

Наибольшее применение в практике алмазного бурения нашли коронки первой группы.

Алмазная коронка с утолщенной матрицей, показанная на рисунке 1.3., не нашла широкого применения в практике [66]. Такая коронка обладает большой износостойкостью и предназначена для бурения малоабразивных и абразивных трещиноватых пород VIII-X категорий по буримости.

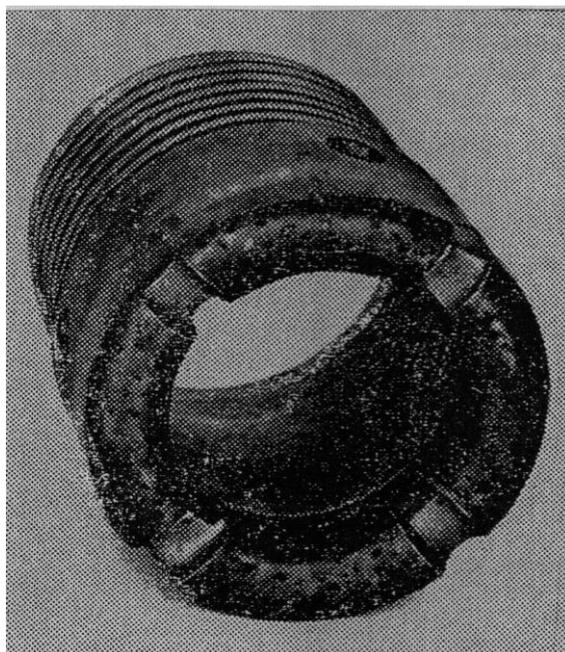


Рисунок 1.3 – Алмазная коронка с утолщенной матрицей [66]

Бурение коронкой с утолщенной матрицей приводит к увеличению объема разбуриваемой горной породы, увеличению энергозатрат и, в конечном счете, к снижению механической скорости бурения и требует достаточно больших осевых нагрузок [35, 63, 66]. Это объясняется большей площадью торцевой части матрицы.

Более эффективно для бурения трещиноватых горных пород применять коронки первой и четвертой группы. Основные среди них – это коронки с секторной и со сплошной матрицей [6, 7, 14, 19, 34, 45, 46, 50, 60, 61, 75, 82].

Коронки со стандартными секторами (однослойные и импрегнированные) (рисунок 1.4) весьма эффективно работают при бурении плотных твердых горных пород. Однако при бурении такими коронками в твердых оквацированных или железистых породах довольно часто возникает заполирование алмазов. Прекращение процесса бурения в данном случае приводит к уменьшению проходки за рейс и увеличению времени на спуско-подъемные операции. Попытки бурильщика ликвидировать заполирование в процессе бурения могут привести к возникновению прижога. При бурении в трещиноватых породах возникают большие ударные нагрузки на сектора матрицы.



Рисунок 1.4 – Алмазная коронка со стандартными секторами

Для уменьшения действия ударных нагрузок на набегающую часть секторов предлагаются коронки со скошенной набегающей частью сектора (рисунок 1.5). Это алмазные коронки типа БИТ [34, 36, 43, 59, 79, 80, 81, 82]. Такое выполнение секторов позволяет уменьшить как осевые нагрузки, так и ударные нагрузки на алмазную коронку.

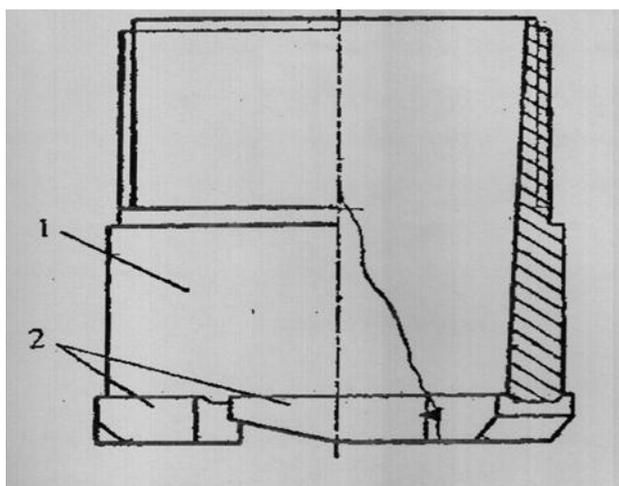


Рисунок 1.5 – Алмазная коронка со скошенными секторами

На наш взгляд, наибольшей износостойкостью при бурении трещиноватых

горных пород будут обладать коронки со сплошной матрицей [21, 23, 50]. Коронки со сплошным алмазосодержащим слоем предназначены для бурения в умеренно абразивных породах. Они выполняются без промывочных каналов в матрице. Объемные алмазы – крупные алмазы зернистостью 25 шт/карат [50], т.е. промывочная система коронки обеспечивается высотой выступания объемных алмазов из тела матрицы. При бурении такими коронками для исключения прижога бурение следует вести с расходкой бурового снаряда. Это, в свою очередь, приводит к снижению эффективности бурения (в первую очередь – к уменьшению механической скорости бурения). Также из-за высокого выступания алмазов из тела матрицы при бурении скважин в трещиноватых породах будет наблюдаться скалывание алмазов. Дополнительно следует отметить, что для импрегнированных коронок такая конструкция приведет к их прижогу. Известны коронки, в которых в промывочных каналах установлены вставки из легкоразрушаемого или легкоплавкого материала [57]. За счет этих вставок как бы образуется сплошная матрица и существенно снижается высота промывочных каналов.

Известны алмазные коронки со сплошной матрицей и промывочными каналами, выполненными в корпусе коронки [6, 19, 26, 59]. В таких коронках очистной агент циркулирует через промывочные каналы в корпусе коронки (рисунок 1.6), что способствует предупреждению прижога. Однако серийного выпуска таких коронок нет. Такие коронки наиболее эффективно работают в очень твердых горных породах. При бурении в менее твердых породах на торце матрицы скапливается шлам, что приводит к повышенному износу матрицы.

За рубежом разработкой алмазных коронок для геологоразведочного бурения занимается различные фирмы [88, 89, 93]. Основные из них: фирма "Крелиус" (Швеция), фирма "Диамант Боарт" (Бельгия), фирма "Аккер Дрилл" и фирма "Лонгир" (США). Фирма "Крелиус" предлагает 6 типов коронок "Диаборит" для конкретных комплексов горных пород [88]. Коронки отличаются конфигурацией профиля, типом матрицы и рекомендуются для определенного типа колонковых труб.



Рисунок 1.6 – Алмазная коронка со сплошной матрицей и промывочными каналами в корпусе коронки

Фирма “Диамант Боарт” [93] имеет достаточно большой опыт в конструировании бурового импрегнированного инструмента. Фирма существенно усовершенствовала свою продукцию за счет:

- 1) разработки новых матриц;
- 2) применения высококачественных синтетических алмазов различной зернистости;
- 3) разработки уникального способа равномерного распределения алмазов в матрице.

Фирма выпускает импрегнированные коронки с 5-ю типами матриц применительно к различным типам горных пород.

Матрица алмазных коронок, изготавливаемых в Китае имеет следующие формы:

– плоская – для всех комплексов твердых горных пород при бурении как с одинарными колонковыми трубами, так и с двойными; и для снарядов типа ССК;

– пилотная – для бурения перемежающихся по твердости горных пород и для бурения трещиноватых горных пород.

Перечисленные коронки относятся к секторным и всем им присущ общий недостаток – скалывание секторов при бурении скважин в трещиноватых породах.

В условиях Монголии для бурения скважин, в основном, используется оборудование и коронки российского и китайского производства как со стандартной толщиной матрицы та и специальные (для бурения по трещиноватым породам), рисунок 1.7 [90, 91, 92, 93, 94].



Рисунок 1.7 – Коронки с расширенными промывочными каналами

### **1.5 Существующие технологии приработки алмазного породоразрушающего инструмента**

В основу существующих рекомендаций по приработке алмазных коронок закладывается условие, что в начальный момент контактирования коронки с забоем в контакте с горной породой находится около 20 % объемных алмазов от общего их числа. В связи с этим рекомендуется постепенно увеличивать нагрузку на коронку и частоту вращения бурового снаряда, пока в контакт с горной

породой не войдет до 80 % алмазов. Из практики и теории алмазного бурения известно несколько вариантов приработки алмазных коронок, отличающихся критериями определения момента времени, когда данная операция считается законченной и имеет место выход на оптимальны или рабочий режим бурения. Наиболее общая технология приработки коронок любого типа заключается в следующем. После постановки на забой новой коронки в течение первых минут бурение ведется при низких частотах вращения (75-150 мин<sup>-1</sup>) и незначительных осевых нагрузках (100-105 даН). Время приработки может составлять от 3-5 до 15-20 минут [4, 11, 53, 83]. Затем, постепенно повышая нагрузку и частоту вращения, доводят их до оптимальных значений. Такая схема приработки возможна только при бурении скважин в мягких породах, так как низкие значения параметров режима бурения могут стать причиной заполирования алмазов при бурении в твердых горных породах. В работе [5] указывается, что приработка коронок должна заканчиваться после углубки скважины на 20-30 см в очень твердых горных породах и на 80-120 см для пород средней трещиноватости. Частота вращения не должна превышать 40-450 мин<sup>-1</sup>, осевая нагрузка подбирается так, чтобы обеспечивалась углубка  $(1,0-1,5) \cdot 10^{-3}$  мм за 1 об. коронки.

Недостатком данной схемы является длительное время приработки, что на практике часто приводит к заполированию алмазов.

Более детально параметры приработки даны в работе [83]. Указываются конкретные значения частоты вращения и нагрузки на коронку (таблица 1.6).

Таблица 1.6 – Рекомендуемые параметры приработки алмазных коронок [83]

Параметры режима приработки	Значение параметров в зависимости от процента алмазов, контактирующих с забоем		Величина приращения параметра	Интервал времени для изменения значений параметра, с.
	20 %	40 %		
Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	100-200	400-500	150	210-280
Нагрузка на коронку, даН	200-400	600-1000	50	20-40

Предлагаемая схема приработки коронок трудно реализуема при ручном режиме управления процессом алмазного бурения из-за необходимости менять осевую нагрузку через каждые 20-40 с. Кроме того при малых приращениях осевой нагрузки ( 50 даН) трудно избежать заполирования алмазов.

В работе [28] указывается, что для импрегнированных коронок приработку не проводят, нагрузку на коронку устанавливают в зависимости от твердости горных пород. Для однослойных алмазных коронок рекомендуется первая или вторая ступень частоты вращения, а нагрузка на коронку должна составлять 10-20 даН на 1см<sup>2</sup> торца коронки. Рекомендации носят достаточно общий характер, требуют пересчета значений осевой нагрузки в зависимости от площади торца матрицы, что в производственных условиях затруднительно.

Достаточно детальная технология приработки однослойных коронок приводится в работе [52]. Авторы обращают внимание на то, что время приработки зависит от качества алмазов и их зернистости. Для более крупных алмазов требуется большее время приработки (до 30 мин) Для коронок с более мелкими алмазами время приработки уменьшается до 15 мин. Отмечается, что прирабатывать следует не только новые коронки, но и повторно используемые. В этом случае рекомендуется первые 5-10 минут бурить с низкими нагрузками и частотами вращения. Однако из-за достаточно большого времени приработки коронок возможно заполирование алмазов.

## **1.6 Анализ механизма углубки забоя скважины за 1 оборот коронки**

Основные положения гипотезы «винтовой» углубки применительно к алмазному бурению заключается в следующем:

- разрушение горной породы по всей поверхности забоя и формирование забоя происходит за один оборот коронки;
- углубка коронки за один оборот определяется из выражения:

$$h = h_a N_A = \frac{V_{\text{мех}}}{n} \quad (1.25)$$

где  $h_a$  – углубка одного алмаза, м;  $N_A$  – число алмазов на линии резания, шт;  $V_{\text{мех}}$  – механическая скорость бурения, м/ч;  $n$  – частота вращения бурового снаряда,  $\text{мин}^{-1}$ .

Углубка по такой схеме показана на рисунке 1.8. Механизм углубки за 1 об.

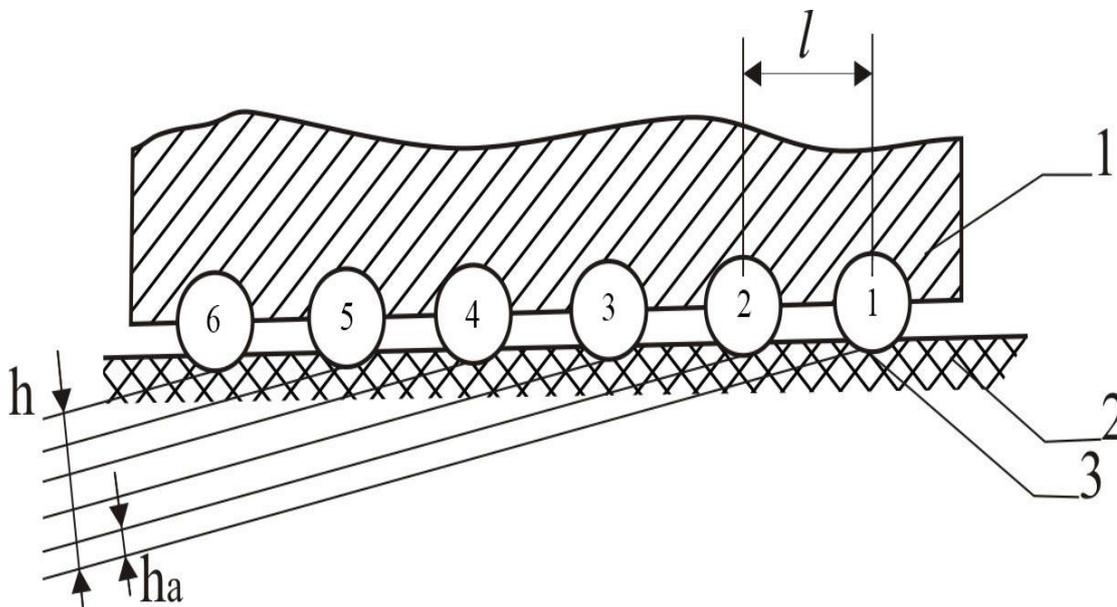


Рисунок 1.8 – Схема «винтовой» углубки забоя скважины за 1 оборот алмазной коронки:

1 – матрица; 2 – горная порода; 3 – алмазы; 1...6 – порядковые номера алмазов;  $h_a$  – углубка за 1 об. одного алмаза;  $h$  – суммарная углубка за 1 об.

представляет при этом винтовое движение, когда алмазы все время контактируют с новыми слоями горной породы. Следует отметить, что первоначальная схема винтовой углубки за 1 об. достаточно детально была исследована для условий бурения твердосплавными коронками. Согласно этой схеме коронка движется по винтовой поверхности, причем каждый резец снимает слой породы определенной толщины. Длина пути  $z$  каждого резца, пройденного за 1 оборот определяется из выражения вида

$$z = \frac{\pi(R+r)}{\cos \alpha} \quad (1.26)$$

где  $R$ ,  $r$  – наружный и внутренний радиусы коронки по резцам;  $\alpha$  – угол наклона винтовой линии.

Ввиду малых значений угла  $\alpha$  для практических расчетов принимается:

$$z \approx \pi(R+r). \quad (1.27)$$

Однако условие (1.26) исключает вертикальную составляющую винтового движения коронки, что не соответствует физическому смыслу механизма углубки скважины. Сравнительные характеристики различных схем винтовой углубки за 1 оборот с учетом рекомендуемых её числовых значений, различных комплексов горных пород и типов алмазного породоразрушающего инструмента (однослойных и импрегнированных коронок) даны в таблице 1.7 [13, 37, 42, 49, 52].

Таблица 1.7 – Сравнительная характеристика различных вариантов схемы «винтовой» углубки

Рекомендуемые условия применения		Рекомендуемые значения углубки, мм за 1 об.
Горные породы (твердость, буримость)	Типы алмазных коронок	
1	2	3
Породы средней твердости	Однослойные	0,11...0,14
Твердые породы	Однослойные и импрегнированные	0,07...0,09
Очень твердые породы	Импрегнированные	0,05...0,07
Твердые породы VIII-IX категорий по буримости	Однослойные	0,01...0,16
	Импрегнированные	0,01...0,11
Твердые породы, монолитные и трещиноватые	Однослойные и импрегнированные	0,1d
Мягкие породы	Однослойные и импрегнированные	0,25d
Твердые породы		0,10d
Трещиноватые породы		0,15d
Породы от средней твердости до очень твердых (VII-XII категорий)	Однослойные и импрегнированные	$h_{\min} < h < h_{\max}$
Породы от средней твердости до очень твердых (V-XII категорий)	Однослойные и импрегнированные	$h_{\min} < h < h_{\max}$
Твердые хрупкие породы	Однослойные и импрегнированные	$h_{xp} < h < h_{yn.xp.}$

В таблице 1.7 приняты следующие обозначения:  $d$  – условный диаметр алмазных зерен, мм.;  $h_{\min}, h, h_{\max}$  – минимальное, текущее и максимальное значение углубки за 1 оборот;  $h_{xp}, h_{уп.хр.}$  – то же для хрупких и упруго-хрупких пород.

По данным зарубежных исследований, рациональная углубка за 1 об. при бурении в твердых горных породах составляет 0,07-0,09 мм, а при бурении в породах средней твердости имеет более высокие значения, до 0,11-0,14 мм [49]. Применительно к буровым станкам с винтовой системой подачи (фирма «Бойлз Бразес Дрилл» углубка за 1 об. для однослойных коронок составляет 0,05-0,07 мм. При углубке меньше этих значений возникает заполирование алмазов, а при больших её значениях имеет место прижог алмазной коронки. Аналогичная схема принята и в ряде отечественных исследований [4, 12, 37].

При анализе углубок за 1 об. отмечается существенное колебание их значений. Так, например, даже при бурении в стендовых условиях по одной и той же породе (*VIII* категория по буримости) при неизменных параметрах режима бурения для одного и того же типа и диаметра коронок углубка за 1 об. колеблется от 0,1 до 0,6 мм. Углубка в стендовых условиях больше, чем при бурении в натуральных условиях (в скважине). Углубка за 1 об. для алмазных импрегнированных коронок колеблется от 0,01 до 0,11 мм; для однослойных – от 0,01 до 0,16 мм. Наложение на алмазные коронки высокочастотных колебаний вызывает увеличение углубки за 1 об. на 30-40 %. В этом случае механизм увеличения объясняется лучшим внедрением алмазов в горную породу под действием динамических нагрузок, а также улучшением условий охлаждения алмазов, поскольку имеет место увеличение ширины бороздок разрушения, образуемых алмазами. Расход алмазов сокращается в 1,3-1,5 раза. На основе анализа данных углубки за 1 об. по результатам бурения в породах различной твердости установлены следующие средние значения углубки для однослойных коронок [49].

- породы *VII-IX* категорий по буримости ... 0,09 – 0,11 мм;
- породы *X* и *XI* категорий по буримости ... 0,055 – 0,048 мм.

Отмечается увеличение углубки за 1 об. по мере уменьшения частоты вращения.

Применительно к производственным условиям гипотеза углубки за 1 об. детально исследована в работе [20]. Оптимальная углубка для однослойных и импрегнированных коронок принимается как величина, равная 0,1 от среднего диаметра алмаза (таблица 1.8).

Таблица 1.8 – Рекомендуемая углубка за 1 оборот [20]

Размеры алмазов, заложенных в коронку		Рекомендуемая углубка за 1 об., мм
зернистость, шт/кар	средний диаметр зерна, мм	
40-30	1,80	0,180
60-40	1,55	0,155
90-60	1,43	0,143
150-90	1,13	0,113
400-150	0,90	0,090

Исходя из этих данных, определены оптимальные значения углубок за один оборот для диапазона частот вращения от 87 до 780 мин<sup>-1</sup>. Основопологающим принимается условие, что бурение при углубке за оборот менее 0,02 мм приводит к заполированию алмазов, а при углубке более 0,18 мм вызывает прижог алмазных коронок. Для поддержания оптимальной углубки в течение рейса рекомендуется формула:

$$P_{Ti+1} = P_o \cdot \frac{h_{зад}}{h_{теки}} \quad (1.28)$$

где  $P_o$  – минимальная нагрузка, обеспечивающая заданную углубку  $h_{зад}$  в начале рейса;  $P_{Ti+1}$  – текущее значение нагрузки;  $h_{теки}$  – текущее значение углубки в конце интервала регулирования.

Повышение текущих нагрузок на коронку при бурении монолитных горных пород допускается до 4000 даН. При этом, соответственно фактической механической скорости бурения, увеличивается (или уменьшается) расход очистного агента. Для устранения самозаклинивания керна предлагается

кратковременное (на 1-5 сек) снижение нагрузки на коронку до 100-200 даН. Если в течение 2-3 попыток самозаклинивание керна не устраняется, бурение прекращается. Управление нагрузкой на коронку должно вестись через каждые 1-5 мин. Увеличение интервала регулирования вызывает нарушение связи механической скорости бурения с нагрузкой. Основанием для повышения нагрузки на коронку служит только снижение механической скорости бурения.

Дальнейшее развитие, в частности для высоких частот вращения коронки (до 2000 мин<sup>-1</sup>), рассматриваемая схема углубки получила в работах [4, 5, 60].

Для определения граничных условий углубки за 1 об. в случае единичного контакта «алмаз - горная порода» предложена формула вида

$$\frac{r}{4} - \left( \frac{r^2}{16} - \frac{\mu F_H}{\pi \sigma} \right)^{0,5} < h < \frac{r}{4}. \quad (1.29)$$

где  $r$  – радиус алмазного зерна, мм;  $\mu$  – коэффициент сопротивления движению алмазного зерна;  $F_H$  – нормальная нагрузка на единичное алмазное зерно, даН;  $\sigma$  – предел текучести горной породы, МПа.

Расчетные минимальные и максимальные значения углубки за 1 об. приведены в таблице 1.9. Бурение с углубкой за 1 об. ниже минимальных значений приводит к заполированию алмазов, а бурение с углубкой за 1 об. выше рекомендуемых максимальных значений вызывает прижог алмазных коронок.

Таблица 1.9 – Рекомендуемая углубка за 1 об. [60]

Категория горных пород по буримости	Размеры алмазов, заложенных в коронку		Рекомендуемая углубка за 1 об., мм	
	Зернистость, шт./кар	Средний диаметр зерна, мм	Минимальная $h_{\min}$	Максимальная $h_{\max}$
VII-VIII	20-12	1,95	0,034	0,39
	30-20	1,70	0,026	0,34
IX	50-30	1,50	0,020	0,33
	60-40	1,35	0,018	0,29
X	120-90	1,05	0,017	0,09
XI	150-120	0,95	0,015	0,08
XII	400-120	0,66	0,015	0,07

Следует отметить, что в указанных расчетах используется значение предела текучести  $\sigma$ , которое характерно для металлов. Для горных пород хрупких, упругих и даже упруго-пластичных, как правило, предел текучести не выделяют [30].

С учетом последнего замечания д.т.н. Горшковым Л.К. для расчета граничных значений углубки за 1 об. предложены уточненные формулы [29].

Для минимальной углубки  $h_{\min}$ :

$$h_{\min} = 0,25[r - (\frac{r^2 P_{III} - 2F_{\min}}{P_{III}})^{0,5}], \quad (1.30)$$

где  $P_{III}$  – твердость по штампу;  $r$  – радиус алмазного зерна;  $F_{\min}$  – минимальное значение нагрузки, обеспечивающее преодоление упругих деформаций и переход к необратимым, разрушающим деформациям породы.

Для максимальной углубки  $h_{\max}$ :

$$h_{\max} = 4,3 \cdot 10^{-2} \rho^{1/3} [\frac{a(D_H^2 - D_B^2)(1 - z_p r)}{(a - 1)z_p D_{CP}^2 b^2}]^{2/3}, \quad (1.31)$$

где  $\rho$  – радиус округления внедрившейся в породу части алмазного зерна;  $a$  – отношение длины средней окружности матрицы  $D_{CP}$  коронки к суммарной длине промывочных каналов;  $D_H$  и  $D_B$  – наружный и внутренний диаметры матрицы коронки;  $z_p$  – число режущих алмазов на торце матрицы;  $b$  – ширина торца матрицы коронки.

Допустимые значения углубки  $h$  выбираются из условия:

$$h_{\min} < h < h_{\max}. \quad (1.32)$$

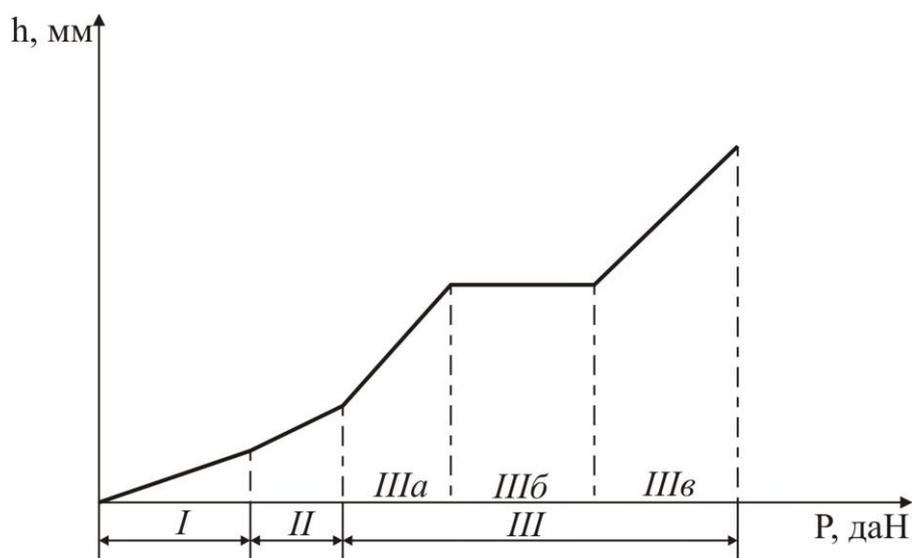
На основе предложенных формул определены рекомендуемые глубины внедрения алмазов в породу забоя скважины для коронок диаметром 59 мм различных типов (таблица 1.10).

В работе [2] принято, что оптимальная величина внедрения коронки за 1 об. для однотипного породоразрушающего инструмента есть величина постоянная на всем диапазоне частот вращения. Эта величина прямо пропорциональна

Таблица 1.10 – Рекомендуемые глубины внедрения объемных алмазов [30]

Категория пород по буримости (твердость по штампу, МПа)	Зернистость объемных алмазов (тип коронки)	Рекомендуемая глубина внедрения алмазов $h$ , $10^{-5}$ м
VII-VIII (30)	20-10 (04А3)	0,080
	30-20 (07А3)	0,070
IX (45)	60-40 (А4ДП)	0,045
	90-60 (01А3)	0,045
X (55)	150-120 (02ИЗ)	0,040
	400-150 (02ИЗ)	0,025
XI (65)	150-120 (02ИЗ)	0,040
	400-150 (02ИЗ)	0,025

линейному размеру зерна объемных алмазов и обратно пропорциональна их зернистости. Принято также, что абсолютное значение углубки за 1 об. зависит только от нагрузки на коронку, а объемное разрушение горной породы – от величины углубки (рисунок 1.9).

Рисунок 1.9 – Зависимость углубки  $h$  за 1 об. от осевой нагрузки  $P$  [2]:

I, II, III – зоны усталостного, поверхностного и объемного разрушения; IIIа, IIIб, IIIв – участки зоны объемного разрушения, соответствующие заполированию алмазов, повышенному их износу и прижогу коронки

Выделяются три зоны разрушения: I – зона поверхностного разрушения; II – зона усталостного разрушения; III – зона объемного разрушения.

В зоне III выделяется три участка объемного разрушения; на участке IIIа имеет место неэффективное объемное разрушение, при котором из-за недостаточной нагрузки возникает заполирование; на участке IIIа из-за большой осевой нагрузки имеет место повышенный износ алмазной коронки; эффективным является участок IIIб объемного разрушения, где алмазная коронка работает в режиме между заполированием и повышенным износом. Для этого участка характерно постоянное значение механической скорости бурения в зависимости от нагрузки на коронку.

Для определения оптимальной углубки за оборот предложена номограмма, на которой отражена связь физико-механических свойств буримых горных пород, размера алмазов и их зернистости с механической скоростью бурения. В основу выбора оптимального значения углубки положены условия:

– оптимальная углубка за 1 об. при бурении в мягких горных породах составляет  $0,25d$  ( $d$  – диаметр алмаза);

– при бурении в твердых и очень твердых горных породах углубка за 1 об. составляет  $0,15d$ ;

– при бурении в трещиноватых горных породах углубка за 1 об. составляет  $0,1d$ .

Перечисленные условия более полно отражают связь углубки за 1 об. с физико-механическими свойствами разбуриваемых горных пород. В то же время такая схема углубки применима только для диапазона частот вращения, в котором выражается линейная зависимость механической скорости бурения от частоты вращения.

Дифференцирование показателя углубки за 1 об. в пределах одной группы пород предложено в работе [3], где показывается, что для твердых хрупких пород оптимальная величина углубки будет меньше, чем для упруго-хрупких. Объясняется это тем, что объем разрушаемого материала в хрупких породах будет увеличиваться за счет скола породы в глубину. В связи с этим при бурении

в таких породах углубка должна быть меньше, чем при бурении упруго-хрупких пород.

Экспериментальные исследования механизма углубки скважины как нестационарного процесса описаны в работе [15]. Анализ работы алмазной коронки показал, что кинематика её движения является достаточно сложной, связана с режимом работы бурильной колонны и характеризуется:

- степенью разработки ствола скважины;
- наличием поперечных перемещений коронки относительно забоя;
- вертикальными колебаниями коронки вплоть до её отрыва от забоя.

В зависимости от параметров режима бурения для пары «коронка – порода» выделены три режима работы алмазной коронки:

- 1) режим равномерного вращения;
- 2) режим крутильных автоколебаний 2-го рода;
- 3) режим крутильных автоколебаний 1-го рода (при этом режиме возможно прекращение вращения коронки).

При наличии третьего режима работы алмазной коронки накопление шлама под её секторами приводит к перемещению коронки в вертикальном направлении. В это время шлам перемещается в промывочный канал и коронка опять входит в рабочий режим. Изменение режима работы коронки определяется степенью сближения матрицы с забоем. Существует определенное значение углубки за 1 об. при котором происходит изменение режима работы коронки.

Одной из причин нестандартности забойных процессов является также неравномерность распределения осевой нагрузки между секторами коронки.

Следует указать, что к настоящему времени в теории и исследованиях твердосплавного бурения имеются данные, позволяющие также несколько по иному рассматривать механизм углубки скважины [21]. Так, исследования механизма углубки применительно к твердосплавным долотам отражены в работе [70]. С помощью специальной системы, фиксирующей осевое перемещение, измерялось внедрение долота в горную породу за 1 об. долота: наряду с участком забоя, на которых имеется проходка, зафиксированы участки холостого хода.

## 1.7 Анализ механизма заполирования и методов его предупреждения

Изучение механизма углубки скважины и повышение эффективности технологии алмазного бурения невозможно без исследования форм аномального износа алмазных коронок. Как было показано во введении при бурении в твердых горных породах к основным формам износа алмазного породоразрушающего инструмента относятся заполирование и прижог.

Исследованию и разработке методов предупреждения заполирования посвящен ряд работ [2, 4, 19, 21, 25, 30, 40, 73].

В работах [11, 40] отмечается, что при температуре 500-900 °С при бурении твердых горных пород с большим содержанием кремния заполирование может возникать за счет окислительных и диффузионных процессов в системе “алмаз-очистной агент – горная порода”.

В результате исследования площадок износа установлено, что процесс заполирования интенсивно проявляется при прохождении алмазом пути, в среднем, около 300 м. Существенное влияние на интенсивность образования площадок износа оказывает вид промывочной жидкости. Установлено, что процесс заполирования зависит от нагрузки на алмазную коронку и вида очистного агента и, несколько в меньшей степени, от частоты вращения бурового снаряда [11]. Заполированию алмазов предшествует их фрагментационный износ. Путем фотографирования на площадках алмазов обнаружены линии скольжения, ориентированные по направлению вращения бурильной колонны.

За критерий заполирования принималась длина рейса, при которой наблюдалось уменьшение механической скорости в три раза по сравнению с первоначальной:

$$V_t = \frac{1}{3} V_0 , \quad (1.33)$$

где  $V_t$  – текущая механическая скорость бурения, м/ч;  $V_0$  – начальная механическая скорость бурения, м/ч.

Для предупреждения заполирования предлагается увеличивать нагрузку на породоразрушающий инструмент и одновременно снижать частоту вращения.

Следует отметить, в указанных работах:

- 1) недостаточно полно исследован механизм и признаки заполирования;
- 2) при температуре 500-900 °С не может наблюдаться диффузионного износа алмазов. В работе [58] показано, что при этой температуре за счет адгезионных процессов наблюдается повышенный износ алмазной коронки и повышенная механическая скорость бурения. Также при этих температурах проводится бурильщиком заточка алмазной коронки “всухую” на забое скважины, а исследователями указывается, что наименьший путь до заполирования алмаз имеет место при работе “всухую”;
- 3) отсутствуют рекомендации по устранению заполирования;
- 4) отсутствуют рекомендации по методам своевременного распознавания заполирования.

В работах [4, 19] причинами заполирования указываются недостатки в применяемой технологии бурения и физико-механические свойства горных пород. Причем определяющими заполирование признаками горных пород являются их высокая твердость, низкий коэффициент пластичности, малая вариация твердости. Указывается также, что это, в основном, горные породы с повышенным содержанием кварца. Механизм заполирования интерпретируется при этом следующим образом. В результате микроударного взаимодействия алмаза с горной породой имеет место скол острых вершин алмаза. Затем вследствие упругой реакции забоя, притупленный алмаз работает в режиме упругого оттеснения и скольжения по поверхности забоя. Таким образом механизм заполирования алмазных коронок связан с механизмом разрушения упругой твердой горной породы, причем интенсивность процесса заполирования увеличивается при понижении нагрузки на породоразрушающий инструмент.

Чтобы предупредить заполирование авторами работ рекомендуется бурение в начале рейса вести при минимальной нагрузке на алмазную коронку. Затем постепенно увеличивать осевую нагрузку таким образом, чтобы обеспечить

оптимальную механическую скорость бурения. Значение текущей нагрузки  $F$  на породоразрушающий инструмент выбирается из соотношения:

$$F = F_0 \cdot \frac{V_0}{V_t}, \quad (1.34)$$

где  $F_0$  – начальная нагрузка на коронку, даН.

Частота вращения  $n$  выбирается с учетом коэффициента пластичности горных пород:

$$n = n_0 K, \quad (1.35)$$

где  $n_0$  – исходная частота вращения для данной горной породы, мин<sup>-1</sup>;  $K$  – коэффициент пластичности горной породы.

Анализ формулы (1.35) показывает, что частота вращения должна быть тем меньше, чем меньше коэффициент пластичности и выше твердость горной породы.

Недостатком рассмотренного метода можно считать сложность определения коэффициента пластичности горных пород, так как механические свойства горных пород существенно меняются в пределах одного образца. Формула (1.34) пригодна для определения осевой нагрузки на однослойные алмазные коронки, где процесс бурения рекомендуется вести с постепенным увеличением нагрузки на коронку [1, 4, 38, 51, 52, 74]. Кроме обоснованного выбора режимных параметров бурения, предлагаются для бурения в условиях заполирования специальные алмазные коронки, отличительной особенностью которых является повышенная пористость и твердость матрицы, определенный выпуск алмазов.

Общим недостатком предлагаемых методов является отсутствие рекомендаций по распознаванию заполирования.

Аналогичные рекомендации для предупреждения заполирования, связанные с увеличением нагрузки и уменьшением частоты вращения, даются в работе [69]. В результате наблюдений за износом коронок и изменением механической скорости бурения выявлено, что горные породы, при бурении в которых возникает заполирование алмазов, неоднородны по физико-механическим свойствам. Повышенный износ корпуса и матрицы коронок скважин

свидетельствует о высокой абразивности горных пород. В то же время заполирование алмазов указывает на малую абразивность разбуриваемых пород. Общим для этих пород является преобладание таких породообразующих минералов, как кварц, пирит, арсенопирит и т.п.

В качестве неостатков проведенных исследований можно также указать на отсутствие исследований о выявлении признаков заполирования и методических рекомендаций по распознаванию заполирования.

В работах [28, 29, 33, 44, 84, 85] механизм заполирования связывает с высокими температурами в зоне взаимодействия алмазов с горной породой. Причинами заполирования указываются конструктивные особенности коронок, физико-механические свойства горных пород, вид и расход очистного агента.

Предлагаемые методические рекомендации для предупреждения заполирования заключаются в подборе необходимого породоразрушающего инструмента. Эффективная работа такого инструмента связывается с температурой в зоне контакта алмазов с горной породой, которая должна составлять менее 400 °С.

В работе [19] теоретическими исследованиями показано, что температура в зоне контакта коронки с забоем скважины при заполировании составляет 300-400°С. Однако выполненные расчеты не подтверждены экспериментальными исследованиями.

В работе [73] предлагается размерная электрохимическая заточка алмазного инструмента. В основу заточки положен принцип анодного растворения матрицы алмазной коронки в растворе электролита при пропускании через электролит постоянного тока. Изменением параметров электрохимической заточки регулируется величина выпуска алмазов. В качестве электролита используется 10% - ный раствор NaCl. Заточка может производиться в полевых и стационарных условиях. Величина выпуска алмазов зависит от физико-механических свойств разбуриваемых горных пород, от зернистости алмазов. Например, для бурения монолитных железистых кварцитов, джеспилитов, яшм величина рекомендуемого

выпуска для импрегнированных коронок составляет 0,08 – 0,1 мм. Задаваясь величиной выпуска алмазов, время заточки определяют по формуле:

$$t = \frac{h \cdot S}{\beta \cdot I}, \quad (1.36)$$

где  $h$  – высота обнажения алмазов, м;  $S$  – площадь торца матрицы, м<sup>2</sup>;  $I$  – сила электрического тока, А;  $\beta$  – коэффициент, учитывающий состав и концентрацию электролита.

Недостатками предлагаемого метода, на наш взгляд, являются:

- 1) отсутствие рекомендаций по распознаванию начала заполирования;
- 2) необходимость подъема бурового снаряда для замены заполированных коронок;
- 3) заточенные электрохимическим методом алмазные коронки в процессе бурения снова заполировываются.

Перспективным является метод предупреждения заполирования с использованием диаграмм мощности, потребляемой электроприводом бурового станка [58, 83]. Для ликвидации заполирования предлагается заточка алмазной коронки кратковременным увеличением нагрузки на коронку или кратковременным выключением промывочного насоса. Процесс ликвидации контролируется по характеру записи мощности. Признаком ликвидации заполирования является стабилизация уровней мощности и механической скорости.

Недостатком способа можно указать длительное время распознавания заполирования из-за отсутствия датчика механической скорости бурения.

Проблема заполирования отмечается и в зарубежной литературе [87]. Указывается, что при бурении по жильному кварциту заполирование наблюдалось через 20 см углубки. Некоторого увеличения механической скорости добивались путем повышения нагрузки на породоразрушающий инструмент. Однако окончательное разрешение проблемы связывается с разработкой конструкции коронки с самозатачивающейся матрицей.

## 1.8 Анализ механизма прижога алмазных коронок и методов его предупреждения

Исследованию механизма прижога алмазных коронок и разработке методов и технических средств для его предупреждения посвящен ряд работ [19, 21, 30, 58, 83].

Метод предупреждения прижога алмазных коронок при увеличении крутящего момента выше заданного значения реализован в ограничителе крутящего момента. В состав прибора, в котором реализован указанный метод, входят трансформатор тока, показывающий прибор, соединительные кабели .

Крутящий момент определяется по формуле:

$$M_{кр} = K \frac{N}{n}, \quad (1.37)$$

где  $N$  – мощность, потребляемая электродвигателем бурового станка, кВт;  $n$  – частота вращения бурового снаряда,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $K$  – коэффициент пропорциональности.

Как известно [83], увеличение крутящего момента может наблюдаться как при прижоге алмазных коронок, так и при кратковременных прихватах и вибрациях бурового снаряда. Независимо от причины, вызвавшей увеличение крутящего момента, осуществляется отключение электродвигателя бурового станка. Кроме того, метод исключает возможность заточки заполированной коронки путем увеличения нагрузки на коронку; так как при этом наблюдается увеличение крутящего момента, электродвигатель бурового станка автоматически выключается.

Интерес представляют методы предупреждения прижога, изложенные в работах [58, 83]. Эти методы разработаны на основе изучения механизма прижога алмазных коронок.

В работе [58] исследовалось влияние режимных параметров на температуру матрицы коронки и на интенсивность износа. Определено, что при нормальном режиме бурения с промывкой температура в матрице составляет 100-200 °С. При

определенных условиях наблюдается резкое увеличение температуры в матрице и интенсивности износа. Существует постоянная величина произведения  $F \cdot n = const$ , при которой происходит увеличение температуры в 4-5 раз. При этом на торце матрицы коронки наблюдаются следы прижога. Механизм прижога связывается с размягчением материала матрицы. Размягчаясь, матрица теряет свои прочностные свойства; большая часть алмазов преждевременно выпадает. Для объяснения механизма работы алмазной коронки выдвинута гипотеза разрушения горной породы в режиме “сухого” и “мокрого” трения. Пусть  $h_1$  – глубина внедрения алмаза в горную породу,  $h_2$  – глубина приповерхностного слоя, нарушенного сетью микротрещин, по которым происходит его “смачивание”. Если  $h_2 > h_1$ , имеет место нормальный износ коронки. Если  $h_2 < h_1$ , то наблюдается режим повышенного износа алмазной коронки.

Метод предупреждения прижога заключается в правильном выборе нагрузки на породоразрушающий инструмент. Для этого устанавливается максимально возможная частота вращения бурового снаряда; плавно увеличивается нагрузка на коронку. При резком увеличении мощности следует снизить нагрузку на коронку. Признаком отсутствия прижога является постоянство во времени мощности, потребляемой электроприводом бурового станка.

В данном методе можно отметить следующие недостатки:

- 1) повышение температуры связывается только с произведением режимных параметров  $F \cdot n$  не учитывает влияние расхода очистного агента;
- 2) отсутствуют исследования по определению времени развития прижога.

Наиболее полно механизм прижога, его признаки и методы предупреждения исследованы в работе [83]. Установлены два этапа развития прижога алмазных коронок. Первый этап связан только с увеличением мощности, потребляемой электроприводом бурового станка, при этом на матрице из-за ее спекания со шламом возникают шламовая корка и локальные участки оплавления поверхностного слоя матрицы. Износ матрицы еще незначителен.

На втором этапе, характеризующемся знакопеременным изменением уровня мощности, потребляемой электроприводом бурового станка, матрица коронки изнашивается полностью.

В результате исследований установлено:

- интенсивность прижоговых процессов возрастает с увеличением уровня режимных параметров;
- механическая скорость в процессе прижога близка к нормальной;
- возможны ситуации, в которых при выключенном промывочном насосе не наблюдается прижога;
- оплавление матрицы коронки может произойти за 10-30 с.

Механизм прижога объясняется тем, что при определенной механической скорости шлам не удаляется из-под торца матрицы. Так как разрушение горной породы продолжается, накапливаемый шлам спрессовывается. Образуется шламовая подушка, наличие которой способствует “сухому” трению. Разогретый шлам передает тепло матрице. Нагретая матрица начинает плавиться. На основе исследований разработаны методические рекомендации по предупреждению прижогов с использованием самопишущих ваттметров Н-395. При этом, если наблюдается непрерывное увеличение мощности в течение 15 с, следует приподнять буровой снаряд над забоем скважины и промыть скважину.

В качестве наиболее эффективного метода предлагается разработка специальных автоматических устройств распознавания прижога [51, 52].

Однако отсутствие исследований изменения механической скорости как признака для распознавания прижога приводит к тому, что иногда прижог невозможно отличить от ряда технологических ситуаций: самозаклинивание керна, прихвата бурового снаряда, изменение категории горных пород по буримости, которые тоже характеризуется увеличением мощности.

## **Выводы по главе 1**

На основе выполненного анализа можно отметить:

1. В приведенных теоретических и экспериментальных работах по определению числа алмазов, контактирующих с забоем, не учитывается криволинейность поверхности забоя. Определенное в таких опытах число алмазов, находящихся в контакте с породой (для однослойных коронок), относится только к алмазам, расположенным не более, чем на двух окружностях резания. Последнее обстоятельство объясняется тем, что профиль коронки имеет округленную форму, а забой скважины имитировался в экспериментах плоской поверхностью. Подобная методика исследований не позволяет определить число контактирующих алмазов, которые расположены по другим окружностям резания. Как результат таких исследований, утверждается, что в начальной стадии приработки алмазной коронки с поверхностью забоя скважины контактирует ограниченное число алмазов: не более 20 % от заложенного их количества; с ростом нагрузки и по мере увеличения глубины внедрения алмазов в горную породу число контактирующих алмазов увеличивается и достигает 70-80 % от общего количества объемных (торцевых) алмазов [24].

2. При приработке коронки рекомендуется постепенно, в течение 15-18 мин., увеличивать частоту вращения и нагрузку на коронку. В основе этих рекомендаций лежит принцип необходимости предохранения острых углов алмазов от преждевременного скалывания и разрушения. На практике, однако, особенно при бурении твердых горных пород, при таком режиме приработки коронки часто возникает заполирование алмазов. Поэтому применяемая в производственных условиях технология приработки отличается от рекомендуемой: так, например, переход к рабочим значениям частот вращения и нагрузок выполняется в течение всего 2-3 мин.

3. Исследования, развивающие идею использования для управления процессом бурения критерия углубки за 1 оборот коронки, предлагают рассматривать его (этот критерий) как показатель физических процессов, протекающих на забое. Первоначально же критерий углубки за 1 оборот рассматривался как условный показатель, численно равный произведению числа алмазов, находящихся на средней окружности коронки, на величину углубки

одного алмаза. Однако в матрице алмазных коронок на окружностях разных диаметров находится, как правило, неодинаковое число алмазов. Например, у коронок типа А4ДП на первой окружности (первой линии резания, начиная от внутренней поверхности матрицы) имеется 24 алмаза, на второй – 28 алмазов, то есть общая углубка алмазов на первой линии должна составить  $24 h_a$ . Таким образом, чтобы использовать формулу (1.25) для объяснения процесса формирования забоя скважины и других физических забойных процессов, необходимо соблюдать условие, при котором коронка находится в постоянном контакте с забоем и на всех линиях резания в контакте с горной породой находится одинаковое число алмазов. Практически, как показывает ряд этом маловероятно [15, 69].

4. Следует отметить, что, если по формуле (1.25) определять углубку для коронок диаметром 46 и 76 мм, то углубка за 1 об., независимо от площади кольцевого забоя, окажется минимальной для коронок диаметром 46 мм и максимальной – для коронок диаметром 76 мм. В практике же высокие скорости бурения обеспечиваются, наоборот, при меньших диаметрах породоразрушающего инструмента, для чего рекомендуемая величина внедрения алмаза (по цитируемой гипотезе) у коронок меньшего диаметра должна быть существенно больше, чем у коронок большего диаметра. Согласно гипотезе о соответствии объема шлама и межзеренного пространства, это должно вызывать повышенный износ инструмента малого диаметра, что в стандартных производственных условиях не наблюдается.

5. Отклонения от рекомендуемых значений углубки за 1 об. приводят к таким формам аномального износа алмазных коронок, как заполирование и прижог. Исходя из этого, исследования процесса углубки скважин должны быть увязаны с исследованиями механизма возникновения заполирования и прижога алмазных коронок, разработкой методов и технических средств для их распознавания и предупреждения.

6. Признаками появления заполирования являются снижение механической скорости на одну треть от первоначальной, уменьшение силы резания на 30-40 % от первоначальной, постепенное снижение забойной мощности.

7. Признаком прижога является резкое увеличение мощности. Минимальное время развития прижога определяется 10-30 с.

Наиболее эффективным методом распознавания и предупреждения заполирования и прижога алмазных коронок является метод с использованием диаграмм мощности, потребляемой электроприводом бурового станка. Однако имеют место и другие технологические ситуации, при которых наблюдается повышение мощности: самозаклинивание керна, прихвата бурового снаряда, изменение категории горных пород по буримости и т.д., которые тоже характеризуется увеличением мощности. Кроме того, эффективность использования этого метода зависит от опыта и квалификации бурильщика.

### **Задачи исследований**

1. Разработка методики исследований, планирование эксперимента и выбор бурового оборудования для выполнения стендовых исследований.

2. Исследование схемы углубки скважины и определение количества алмазов, контактирующих с забоем скважины с учетом криволинейности поверхности забоя.

3. Определение времени приработки алмазных коронок и выбор параметров технологического режима приработки алмазных коронок.

4. Исследование механизма износа алмазных коронок, выбор конструктивных параметров алмазных коронок и схемы циркуляции очистного агента.

5. Определение информативных признаков аномального износа алмазных коронок и разработка методических рекомендаций по технологии бурения скважин в твердых горных породах.

## ГЛАВА 2 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для решения поставленных задач использовались следующие методы исследований: анализ и обобщение литературных данных; теоретический анализ процессов, происходящих на контакте алмазного породоразрушающего инструмента с горной породой; производственный эксперимент и статистический анализ экспериментальных данных, проверка на сходимость расчетных данных с экспериментальными данными [31, 32, 65, 67, 76, 78].

Теоретические исследования были направлены на изучение физических процесса взаимодействия алмазного породоразрушающего инструмента с горной породой с учетом существующих гипотез и схем [8, 12, 26, 48]. При теоретических исследованиях использовались существующие закономерности теплофизических процессов при трении, опытные данные других исследователей и результаты опытов, проведенных непосредственно автором. Теоретические исследования были направлены на изучение механизма контактирования алмазов с поверхностью забоя скважины, выявления основных факторов, определяющих механизм заполирования и прижога алмазных коронок. Оценка экономической эффективности применения разработанных методических рекомендаций осуществлялась методом сравнительных расчетов по результатам, полученным как в стендовых, так и производственных условиях. При этом обработка данных проводилась с использованием мини-ЭВМ.

### **2.1 Методика определения количества алмазов, находящихся в контакте с поверхностью забоя**

Исследования проводились в два этапа. На первом этапе определялось количество алмазов, контактирующих с горизонтальной плоскостью. В основу положен метод отпечатков, широко применяемый при исследованиях [4]. Исследование числа отпечатков алмазов на криволинейной поверхности,

соответствующей поверхности забоя скважин, выполнялись с использованием специально разработанного для этого устройства (рисунок 2.1). Основные узлы устройства: осевой стержень 1; втулка 2; коронка 3; имитатор 4 горной породы. Методика работы заключалась в следующем. На втулку устанавливается алмазная коронка. Вращением коронки формируется забой скважины. При такой конструкции исключается горизонтальное смещение коронки. Как имитатор горной породы использовались графит и оргстекло.

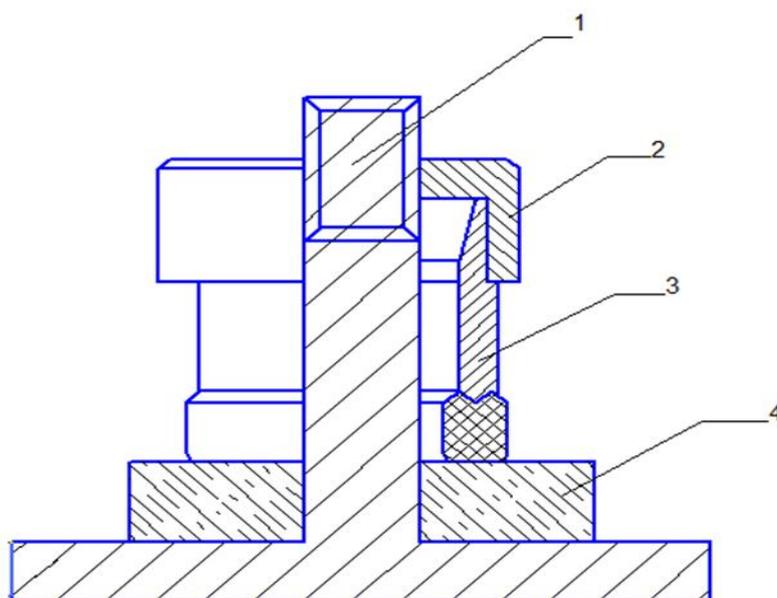


Рисунок 2.1 – Устройство для формирования поверхности забоя скважины:  
1 – осевой стержень; 2 – втулка; 3 – алмазная коронка; 4 – блок горной породы

## 2.2 Метод исследований факторов, определяющих износостойкость алмазных коронок

Исследования проводились с целью выявления факторов, определяющих износостойкость алмазных коронок при бурении твердых горных пород. Для этого использовался метод отсеивающего эксперимента [32, 65].

Источниками информации являлись литературные данные, технические отчеты и экспертные оценки. Выбранные факторы сводились в анкеты и

анализировались экспертами. На основе анкет, заполненных экспертами, составлялась таблица для априорного ранжирования факторов.

Для статистической оценки степени совпадения мнений экспертов использовался дисперсионный коэффициент конкордации. Коэффициент определялся по формуле [32]:

$$C = 12S/m^2(k^3 - k), \quad (2.1)$$

где  $C$  - коэффициент конкордации;  $S$  - сумма квадратов отклонений от средней суммы рангов;  $m$  - число экспертов;  $k$  - число исследуемых факторов.

Для оценки значимости коэффициента конкордации использовался  $\chi^2$ -критерий:

$$\chi^2 = C m(k - 1), \quad (2.2)$$

Расчетное значение критерия сравнивалось с табличным значением при заданном уровне значимости и числе степеней свободы  $f$ :

$$f = k - 1, \quad (2.3)$$

Если расчетное значение оказывалось больше табличного, то принималось, что совпадение мнений экспертов не было случайным.

Необходимое число экспертов определялось по формуле:

$$m = (c\bar{a}_{mi} - b) / \bar{a}_{mi}(1 - c), \quad (2.4)$$

где  $c$  - мера влияния суждения эксперта на групповое суждение;  $\bar{a}_{mi}$  - среднеарифметическое рангов  $i$ -го фактора;  $b$  - оценка дополнительного  $(m+1)$ -го эксперта.

### **2.3 Метод исследований температуры в зоне контакта коронки с забоем скважины**

Для измерения температуры в зоне контакта алмазной коронки с забоем скважины предлагается использовать метод плавких вставок. Данный метод используется для измерения температурных полей в труднодоступных местах. К ним относится забой скважины. Для исследований температурного поля в

промылочные каналы матрицы перекрывались латунными вставками, в которых выполнялись глухие отверстия, а в них зачеканивались плавкие вставки. Плавкие вставки представляют собой короткие цилиндрики из олова, свинца, алюминия. Плавки подбираются таким образом, чтобы диапазон температур их плавления перекрывал прогнозируемые значения температур. Температуру в месте измерения определяют как среднюю между температурами плавления двух соседних вставок. В нашем случае температура определялась в диапазоне от расплавленной вставки до неоплавленной вставки. Точность метода составляет 1-6% и тем выше, чем меньше разность температур плавления двух соседних вставок. Такой метод применим как для однослойных, так и для импрегнированных коронок.

Для расчета температур при которых возникают заполирование и предприжог коронок предлагается использовать метод тепловых источников. Основные положения метода заключаются в следующем [68]. Движущийся или неподвижный тепловой источник, действующий временно или непрерывно может быть представлен как система точечных мгновенных источников теплоты. Если источник действует в течение времени  $\tau$ , то его можно представить в виде системы мгновенных точечных источников, вспыхивающих и гаснущих с весьма большой частотой, когда период времени между вспышками  $\Delta t \rightarrow 0$ . В этом случае импульсы следуют друг за другом с бесконечно малым промежутком времени и в пределе образуют непрерывно функционирующий источник. Движение источника также имитируют рядом последовательных вспышек и гашений мгновенных импульсов, последовательно возникающих в различных точках траектории перемещения источника.

Таким образом, в соответствии с принципом суперпозиции, сложные источники представляют в виде той или иной системы, состоящей из мгновенных точечных источников теплоты. Поэтому и температурное поле, возникающее под действием источника сложной формы, получают методом суперпозиции полей, возникающих под действием каждого из мгновенных точечных источников.

Математическое выражение, описывающее температурное поле тела в точке с координатами  $x, y, z$ , которое возникает под действием мгновенного точечного источника, имеет вид [68]:

$$t(x, y, z, \tau) = \frac{Q}{\lambda \cdot \sqrt{a} \cdot (4\pi \cdot \tau)^{3/2}} \cdot \exp\left[-\frac{R^2}{4a\tau}\right], \quad (2.5)$$

где  $Q$  – количество теплоты, внесенной в тело источником;  $\tau$  – время, прошедшее от момента теплового импульса.

Параметр  $R$  представляет собой расстояние от теплового источника до точки тела, в которой определяется температура и определяется по формуле:

$$R = \sqrt{(x - x_u)^2 + (y - y_u)^2 + (z - z_u)^2}, \quad (2.6)$$

где  $x_u, y_u, z_u$  координаты теплового источника.

Также при расчетах будем учитывать следующее положение: если тепловой источник расположен на поверхности полупространства, то он вызывает в полупространстве температуру в два раза большую чем такой же тепловой источник, находящийся в неограниченном теле

## 2.4 Планирование эксперимента

Введем основные понятия методики планирования эксперимента [31, 32]. План эксперимента – совокупность данных, определяющих число, условия и порядок реализации опытов.

Эксперимент – система операций, воздействий и (или) наблюдений, направленных на получение информации об изучаемом объекте при исследовательских испытаниях.

Объект эксперимента – система, представленная буровым станком, бурильной колонной и блоком горной породы.

Входные контролируемые и управляемые факторы – осевая нагрузка на породоразрушающий инструмент и частота вращения бурового снаряда.

Уровнем фактора называют его величину, т.е. фиксированное значение из

возможного диапазона его изменения. В соответствии с рекомендациями по технологии бурения твердых горных пород диапазон изменений частоты вращения составляет 300-800 мин<sup>-1</sup>, а диапазон изменений для осевой нагрузки – 400-1000 даН. Указанные значения принимаем за уровни факторов. Совокупность этих значений будет называться факторным пространством. Уровни факторов представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Уровни факторов

Факторы	Уровни факторов			Интервал варьирования
	-1	0	+1	
P, дан	400	700	1000	300
n, мин <sup>-1</sup>	300	500	700	200

За выходную переменную (функция отклика) принимается механическая скорость бурения.

Точка плана – точка факторного пространства, в которой предполагается проводить опыт.

Матрица плана – стандартная форма записи условий проведения эксперимента в виде прямоугольной таблицы, стороны которой отвечают опытам, а столбцы - факторам.

Данные эксперимента – информация в любой форме, получаемая в процессе проведения эксперимента. К ним будут относиться: интервал бурения; время бурения указанного интервала. Далее по этим параметрам эксперимента будет определяться механическая скорость бурения.

Поскольку число факторов минимально и равно двум, а вид регрессионной модели заранее неизвестен, в качестве плана проведения эксперимента выберем полный факторный эксперимент.

Верхнему уровню при реализации полного факторного эксперимента соответствует максимально допустимое значение фактора (нормированное значение равно +1), а нижнему уровню - минимально допустимое значение фактора (нормированное значение равно -1).

Полная матрица планирования, включая базовые функции и функции отклика, приведена в таблице 2.2

Таблица 2.2 – Матрица проведения эксперимента

Номер опыта	Базисные функции				Функция отклика
	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_1X_2$	$Y_{cp}$
1	+1	+1	+1	+1	
2	+1	+1	-1	-1	
3	+1	-1	+1	-1	
4	+1	-1	-1	+1	

## 2.5 Определение достаточного числа опытов

Для определения необходимого числа опытов при нескольких измерениях одного и того же параметра учитывались:  $P$  – доверительная вероятность;  $\varepsilon$  – требуемая точность, выраженная в долях среднеквадратичной ошибки  $\delta$  [32].

Так как среднеквадратическая ошибка нам неизвестна, следовательно необходимое количество опытов будем определять в зависимости от доверительной вероятности  $P$  и отношения требуемой точности  $\varepsilon$  к среднеквадратической ошибке  $\delta$  (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Данные для определения необходимого количества повторений опыта

Оценка точности в долях среднеквадратической ошибки	Доверительная вероятность		
	0,90	0,95	0,99
	Число повторений опыта		
3,0	2	3	4
2,0	3	4	5
1,0	5	7	11
0,5	13	18	31

Опыт показывает, что в решении практических задач, связанных с конструированием режущего инструмента (или в нашем случае – породоразрушающего инструмента) достаточно отношение требуемой точности к среднеквадратической ошибке принять равным 3. На основе этого по таблице 2.3 определяем число опытов при доверительной вероятности 0,95.

## **2.6 Экспериментальные исследования и методы обработки экспериментальных данных**

Экспериментальные исследования проводились с целью проверки теоретических расчетов и работоспособности предлагаемых конструкций алмазных коронок. Результаты экспериментов фиксировались в табличных формах, на бумажных носителях (графическая информация) и обрабатывались с использованием микро-вычислительной техники. Обработка полученных данных: исключение ошибочных результатов опытов; определение среднего, дисперсий, размаха выборки; оценка существенности различия между двумя средними значениями; определение дисперсии воспроизводимости, ошибки эксперимента выполнялась в соответствии с методами математической статистики [31, 32, 65]. После бурения скважины анализировалось состояние кернового материала. Результаты наблюдений фиксировались в специальном журнале, где дополнительно к перечисленным параметрам указывались: дата; номер опыта; тип и номер алмазной коронки; состояние матрицы и алмазов после бурения. По окончании бурения в каждом опыте фотографировался керновый материал. За единственный опыт принимался рейс, длина которого определялась высотой разбуриваемых блоков и составляла от 0,2 до 0,5 м. Критерием вида износа алмазной коронки являлось текущее состояние алмазов и матрицы. Экспериментальные работы выполнялись, на буровом стенде СПГУ (рисунок 2.2). Основные характеристики бурового станка.

Частота вращения шпинделя: минимальная – 57, максимальная – 1180 $\text{мин}^{-1}$ .

Ход шпинделя – 560 мм.

Максимальное усилие подачи – 45 кН.

Тип привода бурового станка – электрический.

Габариты – 2220\*900\*1800 мм.



Рисунок 2.2 – Буровой стенд

Ниже бурового станка расположен блок горной породы на специальной площадке, которая позволяет перемещать блок (рисунок 2.3).

Это обеспечивает возможность вести бурение по всей площади блока горной породы. Стенд оснащен контрольно-измерительными приборами, обеспечивающими измерение следующих параметров: осевой нагрузки на породоразрушающий инструмент; частоты вращения бурового снаряда;

крутящего момента; расхода и давления промывочной жидкости; мощности, потребляемой электроприводом бурового станка; механической скорости бурения. Погрешность измерения составляет плюс (минус) четыре процента. В процессе бурения фиксируются размеры алмазной коронки (наружный и внутренний диаметры и высота матрицы) с помощью штангенциркуля;



Рисунок 2.3 – Блок горной породы

проходка за рейс (по мерной шкале шпинделя бурового станка); время чистого бурения (по секундомеру); нагрузка на породоразрушающий инструмент; частота

вращения бурового снаряда; расход очистного агента; мощность при бурении.

После бурения скважины анализировалось состояние кернового материала. Результаты наблюдений фиксировались в специальном журнале, где дополнительно к перечисленным параметрам указывались: дата; номер опыта; тип и номер алмазной коронки; состояние матрицы и алмазов после бурения.

Для бурения предусматривалось изготовление партии экспериментальных и серийных коронок. Горная порода – гранитные блоки. Трещиноватые породы имитировались цементным блоком, в котором цементировались крупные фракции гранитного щебня.

## ГЛАВА 3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА УГЛУБКИ СКВАЖИНЫ И АНОМАЛЬНОГО ИЗНОСА АЛМАЗНЫХ КОРОНОК

### 3.1 Исследование схемы контакта алмазной коронки с забоем скважины

Для исследования числа алмазов, контактирующих с забоем, поверхность которого в скважине является криволинейной, рассмотрим следующие возможные схемы [21, 22, 24]:

- 1) Контакт коронки с забоем осуществляется алмазами, расположенными по одной окружности резания;
- 2) Контакт коронки с забоем осуществляется алмазами, расположенными по нескольким окружностям резания.

В первом случае схему контакта можно рассматривать как контакт коронки с плоским телом, плоскость поверхности которого проходит через вершины алмазов, находящихся в контакте с забоем. Анализ такого контакта начнём с рассмотрения плоского тела, по длине которого расположен ряд (резцов) алмазных зёрен (рисунок 3.1) Введём следующие обозначения:  $P$  – точка, соответствующая центру тяжести тела;  $h_i$  – высота выступания алмазов из тела. Пусть для рассматриваемого случая  $h_1 = h_3 < h_2$ . Тогда в первую очередь в контакт с плоскостью  $L$  вступит алмаз №2 (рисунок 3.1 а). Так как схема контакта условно принята линейной, то как минимум, тело должно контактировать с плоскостью  $L$  в двух точках. Место нахождения второй точки контакта будет зависеть от того, где расположен центр тяжести тела. Если он находится справа от алмаза №2 (рисунок 3.1 а), то справа от центра тяжести будет находиться вторая точка контакта. Так как справа от центра тяжести тела из всех алмазов наибольшую высоту выступания имеет алмаз №3, то он и будет находиться в контакте с плоскостью (рисунок 3.1 б). При таком варианте алмаз №1, имеющий высоту выступания такую же, как и алмаз №3, не окажется в контакте с плоскостью. Наоборот, в контакте с плоскостью может оказаться алмаз, находящийся справа

от центра тяжести тела, у которого высота выступания из матрицы окажется меньше  $h_3$ . Для этого условия необходимо, чтобы этот алмаз находился как можно дальше справа от алмаза №3, а алмаз №3 находился как можно ближе к алмазу №2.

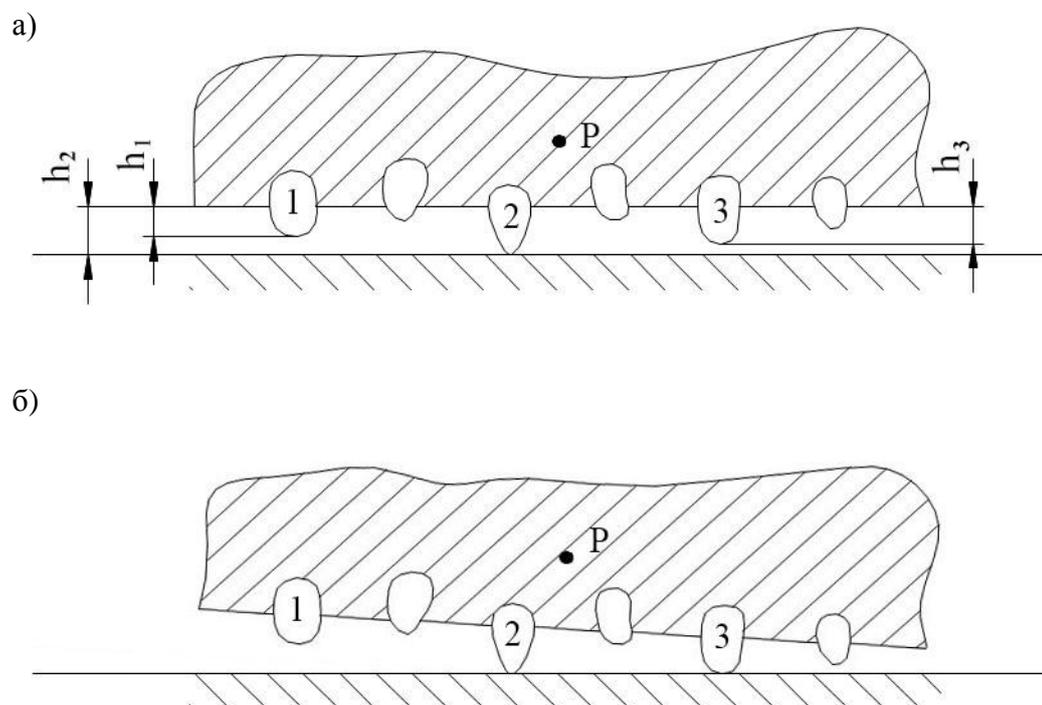


Рисунок 3.1 – Схема контактирования алмазов, расположенных на одной линии, с плоскостью:

а) начальный момент контакта; б) конечный момент контакта; 1, 2, 3 – условные номера алмазных зерен;  $h_1$ ,  $h_3$ ,  $h_2$  – высоты выступания алмазов из тела матрицы.

Таким образом, установили, что в контакте обязательно должны находиться алмазы, которые имеют наибольшую высоту выступания. Так как алмазная коронка является объёмным телом, то его контакт с плоскостью должен осуществляться как минимум в трёх точках. При этом центр тяжести алмазной коронки должен находиться в пределах площади треугольника, вершинами которого являются эти три точки. В противном случае эта алмазная коронка не будет находиться в устойчивом положении. Высота выступания алмазов из матрицы в данных трёх точках не обязательно должна быть одинаковой. Поэтому

неправомочно определять число алмазов, контактирующих с горизонтальной плоскостью, исходя из равенства величин выступания алмазов из тела матрицы алмазной коронки.

В случае контакта по второй схеме (рисунок 3.2) из-за криволинейной формы забоя в контакте могут оказаться алмазы, расположенные по нескольким окружностям резания. Так, например, в контакте с забоем могут находиться алмазы, расположенные по двум линиям резания (алмазы обозначенные цифрой 2). В этом случае число алмазов одной линии резания, находящихся в контакте с забоем, не будет зависеть от величины выступания из матрицы алмазов другой линии резания. Число алмазов будет определяться степенью шероховатости забоя и величиной их выступания из матрицы по каждой окружности резания.

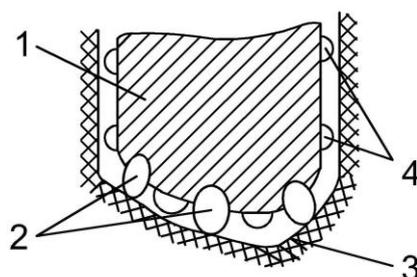


Рисунок 3.2 – Схема возможного контакта коронки с забоем скважины:

1 – матрица коронки; 2 – объемные алмазы; 3 – забой скважины;  
4 – подрезные алмазы.

Для однослойных коронок число контактирующих с забоем алмазов будет определяться формулой [8]:

$$N = K \cdot N_{cp} , \quad (3.1)$$

где  $N$  – число контактирующих алмазов для всей коронки;  $N_{cp}$  – среднее число алмазов, контактирующих с забоем по окружности резания;  $K$  – число окружностей резания.

Аналогичная схема применима и к импрегнированным коронкам.

Для расчёта по формуле (3.1) используем данные работы [4], в которой показано, что для не приработанных коронок типа ОИАЗ в контакте с плоским телом находится около 20 % объемных алмазов от всего их числа. Так как торец

матрицы таких коронок имеет округлённую форму профиля, то можно утверждать, что данные относятся к алмазам одной, максимум – двух окружностей резания, проходящих по наиболее выступающей части торца матрицы. Тогда для коронок указанного типа 20 % от 100-104 штук алмазов (в среднем 20 алмазов) относятся только к алмазам одной-двух окружностей резания.

При контакте коронки с забоем по одной окружности (линии резания) это число алмазов составит около 10 % от всех объемных алмазов. Следовательно, если коронка будет контактировать с забоем, профиль которого соответствует профилю матрицы, то в контакте будут находиться алмазы, лежащие на всех окружностях резания. С учётом формулы (3.1) число контактирующих алмазов будет соответствовать 50-100 % алмазов от общего их количества в коронке.

Экспериментальные исследования последней схемы проводились в лабораторных условиях. Забой скважины моделировался легко формирующимся материалом (парафином и оргстеклом). В первом опыте изношенной коронкой типа А4ДП –59 под её матрицу (близкую плоской форме) формировался забой. После этого на искусственный забой под нагрузкой (4 даН) устанавливалась новая коронка этого же типа и фиксировалось число отпечатков алмазов. В последующих двух опытах забой формировался под профиль матрицы прирабатываемой коронки. Каждый опыт повторялся по 3 раза; средние значения результатов опытов приведены в таблице 3.1.

Анализ полученных данных показал: при профиле забоя, близкому к плоскому, в контакте находились алмазы двух линий резания, что объясняется имеющимися различиями в формах профиля изношенной и новой (прирабатываемой) коронок. При профиле забоя, близком к профилю матрицы прирабатываемой коронки, в контакте с оргстеклом находилось до 50 % алмазов 5-ти линий резания, в контакте с парафином – до 70 %. При увеличении нагрузки в два раза- в контакт с оргстеклом вступали до 70 % алмазов, а в контакт с забоем, моделируемым парафином все 100 % алмазов.

Таблица 3.1 – Число отпечатков алмазов на имитируемом забое (по данным лабораторных исследований)

№ опыта	Нагрузка на коронку, даН	Число отпечатков алмазов в секторах коронки				Суммарное число линий резания	Процент от суммарного числа объемных алмазов в коронке
		первом	втором	третьем	четвертом		
1	4	9	9	10	12	2	32
2	4	27	27	21	22	5	70
3	8	32	32	32	32	5	100

### 3.2 Исследования механизма приработки алмазных коронок

В процессе бурения скважин достаточно часто при приработке алмазных коронок по рекомендуемым методикам возникает заполирование алмазной коронки. Согласно таким рекомендациям приработку коронок следует выполнять в течение 15-18 мин [83] с постепенным увеличением частоты вращения и осевой нагрузки. Как правило, бурильщики не придерживаются таких рекомендаций.

.Расхождение между рекомендуемой и практической технологиями приработки возникло по следующей, кроме других, причине. Для армирования коронок широко используются алмазы, прошедшие предварительную обработку (дробление, овализацию, полирование и т.д.). В результате такой обработки величина разновысотности в одной группе зернистости существенно уменьшается и, кроме того, увеличиваются прочностные характеристики зерен алмаза. С учетом этого фактора исследуем механизм формирования забоя на стадии приработки коронки, а именно, рассмотрим возможность комплексного соблюдения следующих условий [4, 5, 83]:

1) рекомендуемые значения углубки на алмаз при приработке коронки составляют  $(1,0 - 1,5) \cdot 10^{-3}$  мм;

2) в начальной стадии приработки коронки (частота вращения  $100 - 200 \text{ мин}^{-1}$ , нагрузка на коронку  $400 - 500 \text{ даН}$ ) в контакте с забоем находится 20 % объемных алмазов от общего их числа;

3) по мере приработки коронки (повышение частоты вращения до  $400 \text{ мин}^{-1}$  и нагрузки на коронку до  $1000 \text{ даН}$ ) увеличивается глубина внедрения алмазов в горную породу и к концу приработки алмазной коронки в контакте с забоем находится до 80 % алмазов.

Итак, для углубки за один оборот ( $h$ ) и механической скорости бурения ( $V_{\text{мех}}$ ) можно записать:

$$h = h_a \frac{20N}{100k}, \quad V_a = h_a \frac{20N}{100k} n, \quad (3.2)$$

где  $h_a$  – углубка за один оборот на алмаз;  $n$  – частота вращения бурового снаряда;  $k$  – число окружностей резания.

Учитывая рекомендации о начале приработки коронки с частоты  $200 \text{ мин}^{-1}$ , определим по формуле (3.2) механическую скорость, которая должна быть при приработке коронки А4ДП-59 (число торцевых алмазов  $N = 128$  шт., число окружностей резания  $k = 5$ ) при  $h = 0,0015 \text{ мм}$  имеем  $V_{\text{мех}} = 0,09 \text{ м/ч}$ . В практике бурения при приработке коронки такие механические скорости не имеют места. Кроме того, весьма маловероятно, что 20 % контактирующих алмазов будут равномерно распределены по всем окружностям резания и разрушать горную породу по всей площади забоя скважины.

С другой стороны известно, что для коронок типа А4ДП-59 максимальное значение углубки за один оборот при нормальном режиме бурения составляет  $0,155 \text{ мм}$  [1, 13]. Тогда, при условии контакта с забоем всех алмазов, углубка на 1 алмаз составит  $h_a = 0,155/128 = 1,21 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$ . Эта величина соответствует диапазону рекомендуемых значений углубок на алмаз при приработке коронок. Отсюда следует, что по мере приработки коронки углубка на алмаз уже соответствует оптимальным значениям углубок при нормальном режиме бурения и не должна изменяться. Однако, сказанное противоречит принятым выше

условиям. Эти противоречия вытекают из того, что в исследованиях числа алмазов, контактирующих с забоем при приработке коронки, полагалось, что углубка забоя формируется за один оборот и забой рассматривался, как идеально гладкое тело.

Для увязки отмеченных противоречий предлагается иная схема формирования забоя скважины, при следующих основных положениях [24, 25]:

1) забой скважины рассматривается как криволинейная, негладкая (шероховатая) поверхность, профиль которой соответствует профилю матрицы коронки, отработанной в предыдущем рейсе;

2) при формировании забоя под новую коронку число алмазов, контактирующих с забоем, зависит от формы износа ранее отработанной коронки. Время приработки забоя под новую коронку зависит от формы износа матрицы ранее отработанной коронки, а максимальный интервал проходки при этом не превышает высоты матрицы коронки;

3) при приработке коронки в контакте с забоем находятся практически все алмазы, что позволяет формировать забой по всей его ширине;

4) в процессе приработки коронки разрушение забоя по всей его площади происходит за несколько оборотов коронки.

При приработке забоя под однослойную коронку, в зависимости от износа матрицы ранее отработываемой коронки, возможны следующие варианты контакта алмазов матрицы с забоем:

– в контакте с поверхностью забоя находятся алмазы, находящиеся на одной линии (окружности) резания;

– в контакте находятся алмазы, расположенные по нескольким линиям резания;

– в контакте находятся алмазы, расположенные по всем линиям резания.

Рассмотрим первый вариант. Для упрощения анализа примем форму поверхности забоя плоской. Рассмотрим поперечный разрез матрицы с симметричным расположением линий резания и плоский забой скважины (рисунок 3.3).

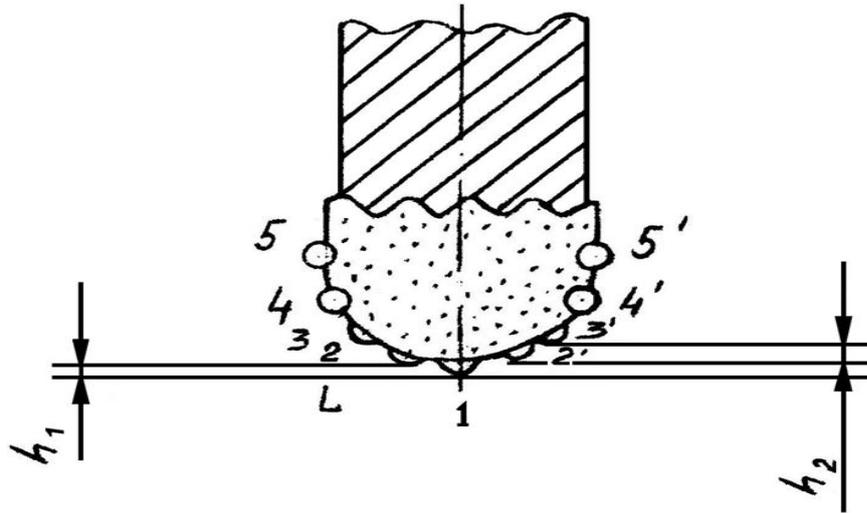


Рисунок 3.3 – Схема контактирования коронки с плоским забоем скважины:

1, 2, ... 5 – алмазные зерна;  $h_1$ ,  $h_2$  – высота выступания алмазов из матрицы.

Так как забой плоский, первыми в контакт с ним войдут алмазы, расположенные по первой линии резания. После углубки алмазов первой линии на величину  $h_1$  в контакт с забоем войдут алмазы второй линии резания. При этом количество алмазов во второй линии резания, вошедших в контакт с забоем, не будет зависеть от величины выступания из матрицы алмазов, расположенных по первой линии резания. Число алмазов во второй линии резания, вошедших в контакт с забоем, будет определяться только степенью разновысотности их выступания из матрицы.

После углубки алмазов первой линии резания на величину  $h_1 + h_2$  и алмазов второй линии резания на величину  $h_2$ , в контакт с забоем войдут алмазы, расположенные по третьей линии резания. Число алмазов, вошедших в контакт с забоем, также не будет зависеть от величин выступания из матрицы алмазов первой и второй линий резания. На этом процесс приработки забоя под прирабатываемую коронку можно считать законченным.

На каждом этапе процесса приработки забоя под коронку осевая нагрузка ( $P$ ) на забой должна меняться в соответствии с выражением вида:

$$P = P_a N_i, \quad (3.3)$$

где  $P_a$  – рекомендуемая нагрузка на один алмаз, даН;  $N_i$  – число алмазов, контактирующих с забоем на  $i$  – ом этапе приработки коронки.

При этом время приработки на первом, втором и третьем этапах составит:

$$t_1 = h_1/V_{\text{мех1}}, \quad t_2 = (h_1 + h_2)/V_{\text{мех2}}, \quad t_3 = (h_1 + h_2 + h_3)/V_{\text{мех3}}, \quad (3.4)$$

где  $V_{\text{мех1}}, V_{\text{мех2}}, V_{\text{мех3}}$  – соответственно механические скорости углубки скважины на первом, втором и третьем этапах приработки забоя под коронку.

Так как величины  $h_1, h_2, h_3$  составляют порядка 30-60 мкм и достаточно малы по сравнению с  $V_{\text{мех1}}, V_{\text{мех2}}, V_{\text{мех3}}$ , то бурильщик просто не в состоянии менять нагрузку на коронку в соответствии с формулой (3.4) через время  $t_1, t_2, t_3$ . Т.е.  $t_1, t_2, t_3$  представляют собой весьма малые интервалы времени, в течение которых можно выполнить операцию изменения осевой нагрузки.

Приработка забоя под алмазную коронку закончится с углубкой на величину, равную высоте ( $h_m$ ) матрицы коронки (рисунок 3.4).

Время данного процесса составит

$$T = [H - (h_1 + h_2 + h_3)]/V_{\text{мех}}, \quad (3.5)$$

где  $V_{\text{мех}}$  – механическая скорость углубки скважины на величину  $H$ ,  $\text{мин}^{-1}$ .

За это время  $T$  в контакт со стенками забоя войдут все подрезные алмазы (рисунок 3.4)

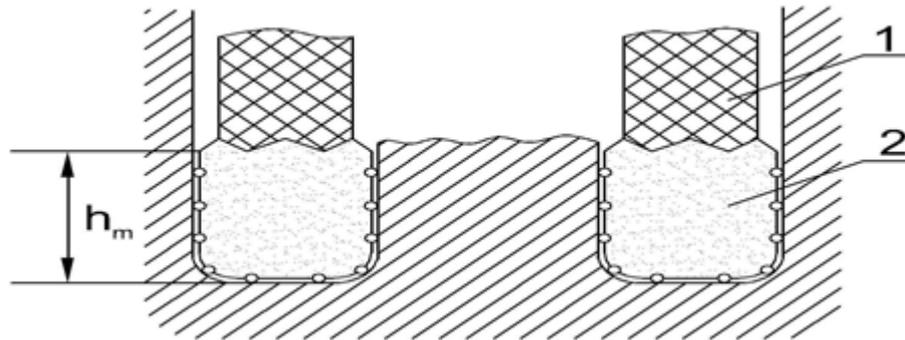


Рисунок 3.4 – Окончание приработки забоя под матрицу новой коронки

1 – корпус коронки; 2 – алмазосодержащая матрица.

Так как  $t_1, t_2, t_3$  достаточно малы, то для практических расчетов, имеем

$$T = H/V_{\text{мех}}. \quad (3.6)$$

Таким образом после приработки забоя под матрицу алмазной коронки в контакте с забоем скважины будет находиться 70 – 100 % объемных алмазов от всего их количества. Аналогичная схема постоянного вхождения алмазов в

контакт с забоем скважины будет иметь место и при других формах поверхности забоя (рисунок 3.5). Разница будет заключаться в том, что в контакт с забоем первыми могут войти алмазы, расположенные на любых линиях резания (рисунок 3.5).

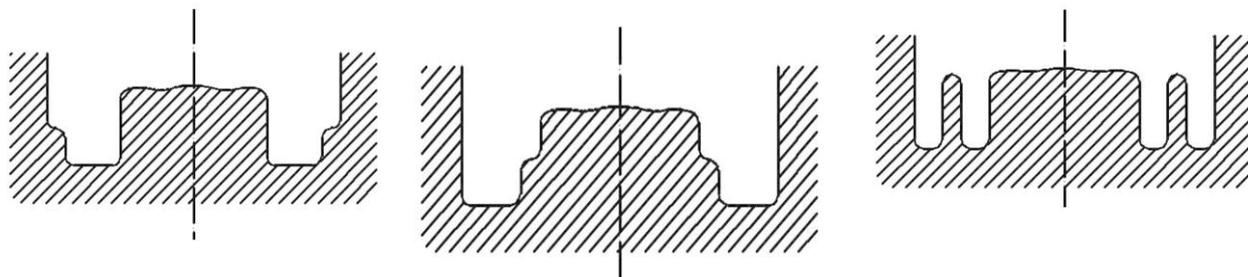


Рисунок 3.5 – Возможные формы забоя скважины

Но независимо от формы поверхности забоя, его приработка под алмазную коронку закончится после углубки на величину, равную высоте матрицы алмазной коронки. Дальнейшую приработку алмазной коронки следует выполнять при условии, что в контакте с забоем скважины будет находиться 70 – 100 % объемных алмазов от всего их количества.

### 3.3 Исследование факторов, определяющих износ алмазных коронок

Для теоретического исследования факторов, определяющих износ алмазных коронок при бурении твердых пород используем метод ранговой корреляции (метод ранжирования факторов). Из литературных источников [2, 3, 4, 20, 28, 43, 44, 54] выявлены следующие факторы, в той или иной мере способствующие возникновению заполирования и прижога алмазных коронок. Факторы представлены в таблице 3.2.

С использованием анкет было получено мнение 5 экспертов (таблица 3.3). Факторы ранжировались по степени возрастания их значимости.

Оценим степень согласованности мнений экспертов. Коэффициент

Таблица 3.2 – Факторы, определяющие износостойкость алмазных коронок

№ п/п	Код фактора	Наименование фактора
1	X1	Осевая нагрузка на алмазную коронку
2	X2	Частота вращения бурового снаряда
3	X3	Расход очистного агента
4	X4	Забойная мощность
5	X5	Твердость горной породы
6	X6	Абразивность горной породы
7	X7	Химическое средство алмаза с горной породой
8	X8	Твердость матрицы алмазной коронки
9	X9	Зернистость объемных алмазов
10	X10	Конструкция матрицы
11	X11	Температура в зоне контакта алмазов с горной породой
12	X12	Произведение частоты вращения и осевой нагрузки
13	X13	Время взаимодействия алмаза с горной породой
14	X14	Вид очистного агента

конкордации (степени согласованности мнений экспертов) составил:

$$C = 12 * 1987,5 / 25 * (2744 - 14) = 0,4$$

Расчетное значений критерия  $\chi^2$  при числе степеней свободы  $f = 12 - 1 = 11$ , составило:  $\chi^2 = 0,5 * 7 * 11 = 38,5$ .

Табличное значений критерия  $\chi^2$  при 5 % уровне значимости и числе степеней свободы  $f = 13$ , составляет 22,68 [65]. Поскольку табличное значение  $\chi^2 = 22,4$  меньше расчетного, то с 95 % доверительной вероятностью можно положить, что мнения экспертов в отношении степени влияния исследуемых факторов согласуются в соответствии с коэффициентом конкордации, равным 0,5.

Анализ диаграммы рангов (рисунок 3.6) показывает, что наиболее значимыми факторами являются температура в зоне разрушения горной породы; расход очистного агента; нагрузка на породоразрушающий инструмент; твердость горной породы.

Таблица 3.3 – Сводная анкета опроса экспертов

Порядковый номер эксперта	ФАКТОРЫ													
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14
1	4	6	5	8	7	1	2	11	9	10	3	12	13	14
2	12	13	3	11	1	10	4	8	7	9	5	2	6	14
3	3	6	2	7	8	9	11	4	5	10	1	12	13	14
4	2	3	5	4	6	12	11	10	7	8	9	13	14	1
5	2	7	5	10	3	4	11	8	9	6	1	12	14	13
Сумма рангов	23	35	20	40	27	36	37	41	37	43	19	51	60	56
Квадраты отклонений	210,25	6,25	306,25	6,25	110,25	2,25	0,25	12,25	0,25	30,25	272,25	182,25	506,25	342,25
Сумма квадратов отклонений	1987,5													
Расчетные ранги факторов	3	5	2	9	4	6	7	10	8	11	1	12	13	14

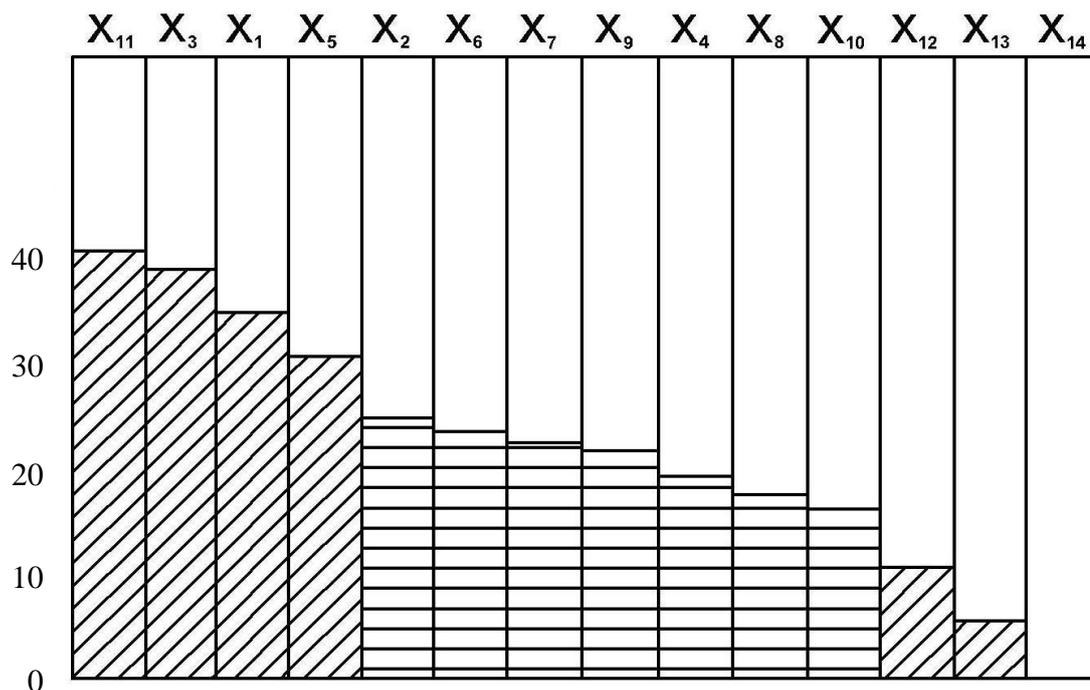


Рисунок 3.6 – Диаграмма рангов

В свою очередь, высокая твердость горной породы – одно из необходимых условий возникновения заполирования алмазных коронок, а такие факторы как осевая нагрузка и расход очистного агента тесно связаны с температурой в зоне контакта алмазной коронки с забоем скважины. Исходя из выполненных исследований за основной фактор принимается температура в зоне контакта алмазов с горной породой.

### 3.4 Исследования механизма заполирования и прижога алмазных коронок

В развитие исследований механизма аномального износа алмазных [23, 25] коронок авторами были проведены стендовые исследования механизма заполирования и прижога. Для измерения температуры в зоне контакта породоразрушающего инструмента использовали коронки типа А4ДП-59 специальной конструкции. Промывочные каналы в матрице коронки были перекрыты сплавом латуни, через который с торца матрицы высверливались глухие отверстия, куда устанавливались плавкие вставки: олова (температура

плавления 232 °С), свинца (327 °С), алюминия (660 °С), латуни (800 °С). При заполировании коронки, имело место оплавление оловянной вставки, что показывает о температуре менее 320 °С. Имело место постепенное снижение мощности. Средняя механическая скорость при заполировании составила 1,5 м/ч. При нормальном износе были оплавлены свинцовые вставки. Оплавление алюминиевой и латунной вставок отсутствовало. Это позволяет сделать вывод, что температура в зоне контакта алмазной коронки с забоем скважины соответствует диапазону 320-660 °С. Средняя механическая скорость при этом составила 2,3 м/ч. При предприжоге алмазной коронки имело место оплавление алюминиевой вставки и потемнение латунной вставки, на торце матрицы видны следы спекания шлама с алмазной коронкой. В этом случае торец матрицы алмазной коронки разогревался до температуры от 660 до 800 °С. Увеличение температуры свыше 800 °С соответствует возникновению прижога алмазной коронки. Результаты исследований представлены в таблице 3.4. Поверхность горной породы в зоне контактирования с алмазной коронкой при заполировании была гладкой (рисунок 3.7) При предприжоге – шероховатая. Прослеживаются следы взаимодействия алмазов с горной породой в виде бороздок и микровырывов горной породы. На рисунке 3.8 показана алмазная коронка со следами предприжога.



Рисунок 3.7 – Поверхность забоя при заполировании алмазной коронки

Таблица 3.4 – Результаты экспериментальных исследований

Условный номер опыта	Проходка, м	Время бурения, мин	Механическая скорость бурения, м/ч	Параметры режима бурения			Состояние плавких вставок	Характер изменения мощности э/привода	Состояние коронки (вид износа)
				нагрузка на коронку, даН	частота вращения, мин <sup>-1</sup>	расход очистного агента, л/мин			
1	2	4	6	7	8	9			11
№ 1	0,35	12		600	600	20	Оплавлена оловянная вставка	Постепенное снижение	Заполирование
№2	0,30	12		600	600	20			
№3	0,20	10		600	600	20			
№ 1	0,50	15		800	600	20	Оплавлена свинцовая вставка	Постоянный уровень	Нормальный износ
№2	0,40	12		800	600	20			
№3	0,40	13		800	600	20			
№1	0,50	7		1000	600	20	Оплавлена вставка алюминия, потемнела латунная	Постоянное с последующим скачкообразным увеличением	Повышенный со следами спекшегося шлама (предприжог)
№2	0,50	6		1000	600	20			
№3	0,50	7		1000	600	20			

Таким образом, выполненные исследования позволили установить величины температуры на торце матрицы алмазной коронки скважины для различных зон разрушения горных пород.



Рисунок 3.8 – Алмазная коронка со следами предприжога

На рисунке 3.9 указаны полученные величины температуры на торце матрицы для участка заполирования, нормального износа и предприжога и прижога коронки.

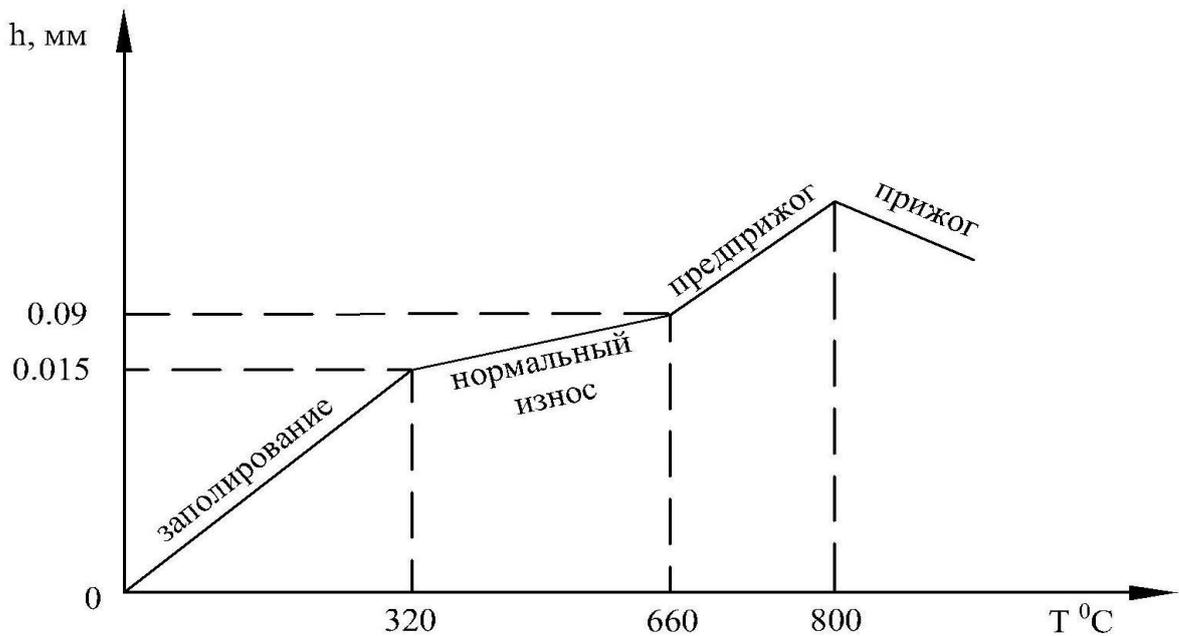


Рисунок 3.9 – Значения температуры на торце матрицы для различных зон разрушения горных пород

Верхней точке участка заполирования соответствует температура 320 °С, нормальному износу соответствует температура в диапазоне от 320 до 660 °С. Зона предприжога находится в диапазоне температур 660-800 °С. При температуре выше 800 °С развивается прижог алмазной коронки.

### 3.5 Расчет времени предупреждения заполирования алмазных коронок

Расчет времени предупреждения заполирования выполним на основе уравнения 2.5. Применим это выражение к расчету температурного поля при источнике одномерном, неограниченном, распределенном вдоль горизонтальной оси Z. Используя подстановку:

$$u = \frac{z - z_u}{\sqrt{4a\tau}}, \quad (3.7)$$

и интеграл вероятности Гаусса:

$$\int_{u_1}^{u_2} \exp[-p^2 u^2] \cdot du = \frac{\sqrt{\pi}}{2p} \cdot [\Phi \cdot (pu_2) - \Phi \cdot (pu_1)], \quad (3.8)$$

где  $\Phi(0) = 0$ ;  $\Phi(-\infty) = -1$ ;  $\Phi(+\infty) = 1$ ;  $dz_u = du \cdot \sqrt{4a\tau}$ ,  $p = 1$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp[-u^2] \cdot du \sqrt{4a\tau} = \sqrt{4a\tau} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot 2 = \sqrt{4\pi a\tau}, \quad (3.9)$$

преобразуем выражение 2.5 для расчета температуры при действии плоского теплового источника к виду:

$$t(y, \tau) = \frac{2Q \cdot \sqrt{a}}{\lambda \cdot \sqrt{\pi\tau}} \cdot \exp\left[-\frac{(y - y_u)^2}{4a\tau}\right]. \quad (3.10)$$

Считая, что тепловой источник расположен на поверхности торца матрицы алмазной коронки ( $y_u = y$ ), получим:

$$t(o, \tau) = \frac{2Q\sqrt{a}}{\lambda\sqrt{\pi\tau}}. \quad (3.11)$$

В дальнейших расчетах будем считать, что вся механическая работа алмазной коронки переходит в тепловую, получим среднюю интенсивность теплообразования:

$$q = nA/60F, \quad (3.12)$$

где  $F$  – площадь матрицы,  $\text{м}^2$ ;  $A$  – механическая работа коронки, Дж;  $n$  – частота вращения коронки,  $\text{мин}^{-1}$ .

Работу алмазной коронки за один оборот можно представить в виде:

$$A = \mu\pi dP, \quad (3.13)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения коронки о горную породу;  $P$  – осевая нагрузка на коронку, Н;  $d$  – средний радиус коронки, м.

С учетом формул 3.11-3.13 получаем формулу для расчета температуры, возникающей на торце матрицы за время  $\tau$ .

$$t(o, \tau) = \frac{\mu\pi d 2Pn \cdot \tau \sqrt{a}}{60F \lambda \sqrt{\pi}} \quad (3.14)$$

Решая это уравнение относительно  $\tau$ , получим уравнение для расчета времени, в течение которого на торце матрицы возникнет температура  $t(\tau)$ ,

$$\left( \frac{\mu\pi d 2Pn \tau \sqrt{a}}{60F \lambda t(\tau) \sqrt{\pi}} \right)^2 - \tau = 0, \quad (3.15)$$

отсюда следует

$$\tau = \left( \frac{30F \lambda \cdot t(\tau)}{\mu d P n \sqrt{\pi a}} \right)^2. \quad (3.16)$$

Из формулы 3.16 определим интервал времени, за который температура увеличивается от значения  $t_1$  (средняя температура для зоны заполирования) до  $t_2$  (температура при которой начинается предприжог):

$$\tau_2 - \tau_1 = \left( \frac{30F\lambda}{\mu d P n \sqrt{\pi a}} \right)^2 (t_2^2 - t_1^2) \quad (3.17)$$

В формуле 3.17 полагая  $\left( \frac{30F\lambda}{\mu d P n \sqrt{\pi a}} \right)^2 = b$ ,  $t_2 - t_1 = \Delta t$ ,  $\tau_2 - \tau_1 = \Delta \tau$ , получим формулу для расчета времени, за которое температура изменится на  $\Delta t$ ,

$$\Delta \tau = b(\Delta t)^2. \quad (3.18)$$

Контрольный расчет по формуле (3.18) выполним на основе следующих допущений:

- средняя температура возникновения заполирования – 280°С температура начала предприжога – 660°С;
- из-за наличия шлама контакт коронки с забоем осуществляется по всей площади торца матрицы;
- коэффициент трения не зависит от параметров режима бурения и для заполированных алмазных коронок составляет 0,03 - 0,06;
- параметры режима бурения, размеры алмазных коронок, площадь торца матрицы принимаем согласно [1, 4, 29].

Коэффициент теплопроводности матрица принимаем равным коэффициенту теплопроводности для меди. В таблице 3.5 приведены результаты расчета времени предупреждения заполирования, при котором исключается возникновение предприжога алмазных коронок. Расчет выполнен для алмазных коронок диаметром 59. Как показывает анализ данных таблицы 3.5 время предупреждения заполирования уменьшается с повышением параметров режима бурения. Для ручного управления процессом бурения при ликвидации заполирования максимальная частота вращения и осевая нагрузка принимаются 600 мин<sup>-1</sup> и 1000 даН.

Таблица 3.5 – Расчетные данные по времени ликвидации заполирования

Осевая нагрузка	Время ликвидации заполирования алмазных коронок, с. (при частотах вращения бурового снаряда)			
	300	400	500	600
400	143	100	73	56
600	63	43	32	25
800	107	60	35	25
1000	68	40	23	16
1200	15	10	8	7
1400	12	8	7	5

### **3.6 Исследования информативных признаков аномального износа алмазных коронок**

Ранее проведенными исследованиями [83] установлено, предприжог алмазных коронок сопровождается резким увеличением мощности, потребляемой приводом бурового станка, а заполирование связано с постепенным уменьшением мощности. Вместе с тем при алмазном бурении существует еще ряд технологических ситуаций, в которых имеет место увеличение или снижение мощности, потребляемой электроприводом бурового станка. К этим технологическим ситуациям относятся: бурение по трещиноватым горным породам; повышение категории горных пород по буримости; заполнение колонковой трубы керном; полный износ матрицы по высоте. Для установления отличительных признаков заполирования и предприжога проводились дополнительные исследования с использованием самопишущего ваттметра и измерителя скорости бурения. Для бурения использовались серийные алмазные однослойные и импрегнированные коронки диаметром 76 мм. Результаты исследований представлены в таблице 3.6.

Установлено, что для заполирования наряду с постепенным уменьшением мощности имеет место постепенное уменьшение механической скорости бурения (рисунок.3.10)

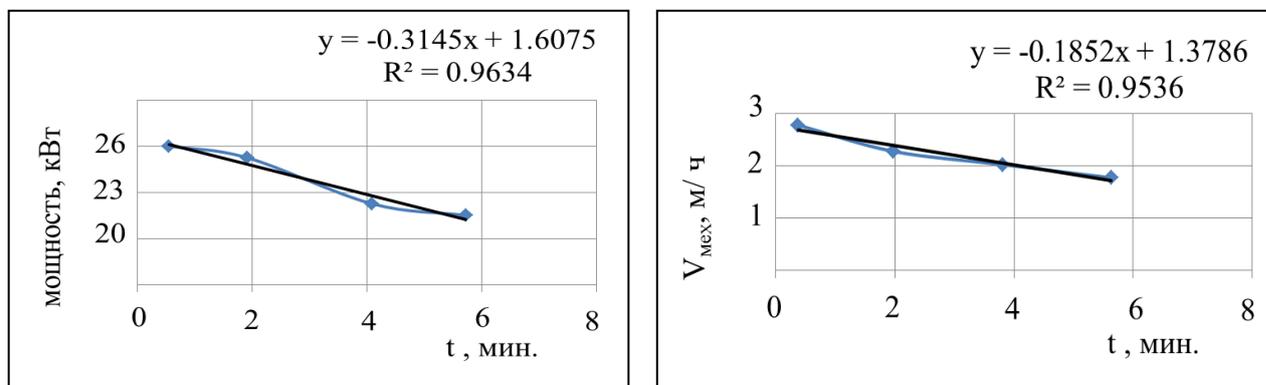


Рисунок 3.10 – Изменение мощности и механической скорости бурения при заполировании

Снижение мощности и механической скорости при заполировании и предприжоге с высокой степенью точности соответствует линейному уравнению.

Предприжог алмазных коронок сопровождается одновременно быстрым увеличением мощности и механической скорости бурения.

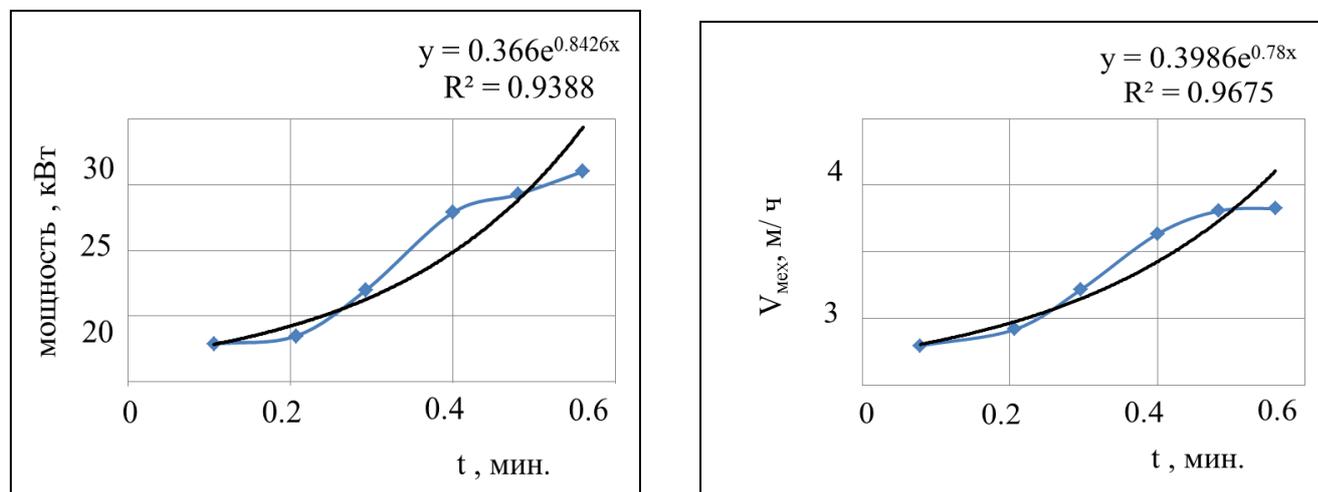


Рисунок 3.11– Изменение мощности и механической скорости бурения при предприжоге

На рисунке 3.12 показано изменение мощности и механической скорости при бурении по трещиноватым горным породам.

Для мощности характерно незначительное снижение с кратковременными увеличениями в момент самозаклинивания керна. Для механической скорости характерны резкие уменьшения с последующим увеличением до прежнего уровня.

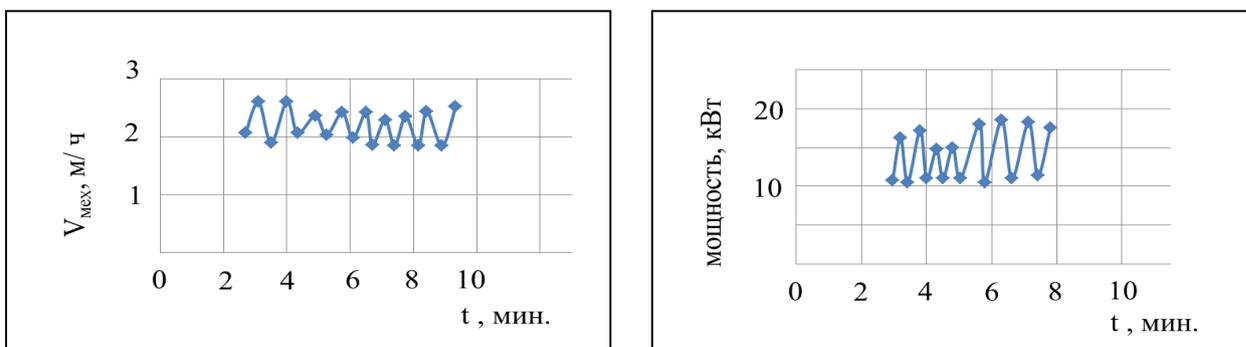


Рисунок 3.12 – Изменение механической скорости и мощности при бурении по трещиноватым породам

При полном износе матрицы технологическая ситуация характеризуется незначительным увеличением мощности и уменьшением механической скорости до нуля.

При уменьшении категории по буримости мощность уменьшается и далее стабилизируется на новом уровне. Механическая скорость бурения увеличивается. Если категория по буримости горных пород увеличилась, то мощность увеличивается, а механическая скорость уменьшается.

Полученные информативные признаки различных технологических ситуаций отражены в таблице 3.6.

Выявленные признаки заполирования и предприжога использованы при разработке рекомендаций по технологии бурения в твердых горных породах.

### Выводы по главе 3

1. Для алмазных коронок основным критерием, определяющим количество алмазов, контактирующих с забоем скважины, является соответствие профиля матрицы коронки профилю забоя скважины.

Таблица 3.6 – Информативные признаки технологических ситуаций

Технологическая ситуация	Характер изменения:	
	мощности	механической скорости
Бурение по трещиноватым породам	увеличение	снижение
Повышение категории горных пород по буримости	увеличение	снижение
Заполнение колонковой керном	Постепенное увеличение	Постепенное снижение
Обрыв бурового снаряда	Резкое снижение	отсутствует
Полный износ матрицы по высоте	увеличение	уменьшение
Заполирование	снижение	снижение
Предприжог	увеличение	увеличение

2. В начальной стадии приработки забоя под алмазную коронку в контакте с горной породой находится до 20 % объемных алмазов от всего их количества, по окончанию приработки забоя – до 70-100 %.

3. Время приработки забоя под алмазную коронку соответствует времени углубки скважины на величину, равную высоте матрицы алмазной коронки.

4. Основным параметром, определяющим заполирование и прижог алмазных коронок, является температура в зоне контакта коронки с забоем скважины, при заполировании она составляет не более 320 °С, при предприжоге она составляет от 660 °С до 800 °С, при прижоге более 800 °С. При нормальном режиме бурения соответствует температура 320–660 °С.

5. Заполирование однозначно распознается по постепенному уменьшению механической скорости бурения и мощности, потребляемой электроприводом бурового станка; предприжог – по быстрому увеличению мощности, потребляемой электроприводом бурового станка и механической скорости бурения (в течение 10-30 с.). Для ликвидации заполирования выполняется операция заточки алмазной коронки, время которой определяется в зависимости от параметров режима бурения.

## ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА И ОПРОБОВАНИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ТЕХНОЛОГИИ УГЛУБКИ СКВАЖИНЫ В ТВЕРДЫХ ПОРОДАХ

### 4.1 Изготовление экспериментального образца алмазной коронки

На основе выполненного анализа конструкций алмазных коронок и методов предупреждения заполирования и прижога в процессе углубки скважины были изготовлены экспериментальные (опытные) образцы однослойных коронок. Отличие экспериментального образца от серийных коронок заключалось в том, что в корпусе экспериментальной коронки выполнялись дополнительные промывочные каналы. Технические параметры экспериментальных коронок в сравнении с серийными представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Конструктивные параметры экспериментальных и серийных алмазных коронок

Наименование параметра	Опытная коронка		Серийная коронка	
	Матрица	Корпус	Матрица	Корпус
Наружный диаметр, мм	59	57	59	57
Внутренний диаметр, мм	42	44	42	44
Толщина, мм	8,5	6,5	8,5	6,5
Наличие промывочных каналов	есть	есть	есть	нет
Число промывочных каналов, шт.	4	4	4	0

Как следует из данных таблицы 4.1, опытная коронка отличается от серийной наличием в корпусе промывочных каналов. Причем промывочные каналы в корпусе выполнены конусными с небольшим расширением к наружной поверхности корпуса. Такая конструкция промывочных каналов исключает их перекрытие частицами крупного шлама. На рисунке 4.1 представлена опытная коронка, в корпусе которой выполнены конусные промывочные каналы. Отличие

данной коронки от существующих конструкций заключается в том, что промывочные каналы выполнены как в матрице, так и в корпусе коронки.



Рисунок 4.1 – Опытная коронка, в корпусе которой выполнены конусные промывочные каналы

Выбранная конструкция алмазной коронки обеспечивает циркуляцию очистного агента через промывочные каналы как в матрице, так и в корпусе коронки (рисунок 4.2)

#### **4.2 Расчет времени приработки забоя под алмазную коронку**

Расчет выполним для алмазных коронок диаметром 46, 59 мм, предназначенных для бурения в твердых горных породах. Для коронок этих диаметров высота матрицы составляет 10,0 мм. Расчеты выполнялись по формуле 3.6. Результаты расчета времени приработки забоя под алмазные коронки при различной механической скорости бурения приведены в таблице 4.2.

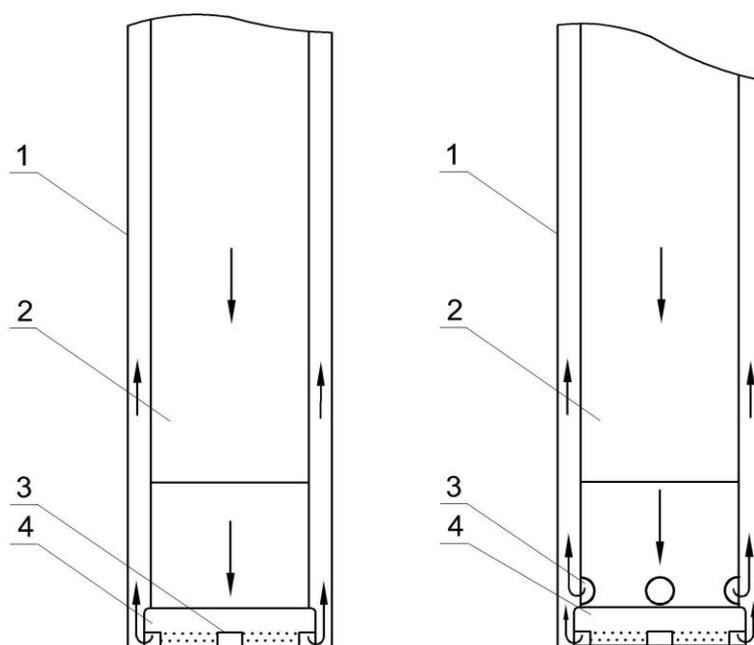


Рисунок 4.2 – Схема циркуляции очистного агента для серийной и опытной коронки:

1 – ствол скважины; 2-колонковая труба; 3-промывочные каналы в корпусе коронки; 4- матрица с промывочными каналами

Таблица 4.2 – Расчетные значения времени приработки забоя под алмазную коронку

Механическая скорость бурения, м/ч	Время приработки забоя под алмазную коронку, с.
	10
0,1	360
0,2	180
0,3	120
0,4	90
0,5	72
0,6	60
0,7	51
0,8	45
0,9	40
1,0	36

Анализ данных таблицы 4.2 показывает: при механической скорости бурения 0,1-0,2 м/ч время углубки на 10-12 мм составляет от 3 до 6 мин, что в практике бурения нереально. Следовательно, приработку забоя под коронку целесообразно выполнять при значениях механической скорости от 0,3 до 0,5 м/ч, что составляет во времени от 3 до 1 мин. Бурение с большей механической скоростью чревато появлением аномального износа матрицы коронки. Исходя из анализа, приработку забоя рекомендуется проводить в течение 1-3 мин. При этом значения механической скорости бурения должны составлять 0,3-0,6 м/ч.

### 4.3 Определение механической скорости бурения при приработке алмазных коронок

Для определения механической скорости бурения при приработке алмазных коронок используем существующие формулы для расчета механической скорости бурения [1, 28, 64]. Анализ этих формул, выполненный в работе [2], показывает, что все они дают примерно одинаковые значения. Исходя из этого для расчетов воспользуемся формулой А.К. Горшкова, в которой, в отличие от других формул, учитывается температурный режим работы алмазной коронки. Формула имеет вид:

$$V_{\text{мех}} = \frac{1,28 \times 10^{-2} \gamma h F n}{\pi v P_{\text{ум}}} \text{ м/с}, \quad (4.1)$$

где  $\gamma$  – коэффициент, учитывающий температурный нагрев алмазов;  $h$  – коэффициент, учитывающий колебания механической скорости бурения при изменении условий очистки скважины и режима его течения;  $F$  – нагрузка на коронку, кН;  $n$  – частота вращения,  $\text{с}^{-1}$ ,  $v$  – ширина торца матрицы, м;  $P_{\text{ум}}$  – твердость горной породы по штампу,  $\text{кН/м}^2$ .

Параметры режима приработки – нагрузку на коронку и частоту вращения – примем согласно рекомендациям [2, 4].

Значения механической скорости бурения, рассчитанные по формуле 4.1 и приведенные к величине углубки за 1 об., даны в таблице 4.3, а для частот вращения станков типа СКБ – в таблице 4.4.

Как показывает анализ данных таблиц 4.3, 4.4, расчетные значения углубки за 1 оборот коронки составляют 0,015-0,037 мм. В то же время из практики алмазного бурения известно, что при бурении твердых горных пород нижний предел величин углубок за 1 оборот должен быть не менее 0,015 мм, а верхний – не более 0,18 мм [2, 4]. Полученные значения углубок за 1 об. практически соответствуют рекомендуемому диапазону углубок.

Таблица 4.3 – Расчетные значения механической скорости и углубки за 1 об. при параметрах режимов бурения, рекомендуемых для приработки алмазных коронок

Параметры режима бурения		Механическая	Углубка за 1 об., мм
Нагрузка на коронку, даН	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Скорость, м/ч	
200	200	0,10	0,018
300	200	0,14	0,025
300	200	0,27	0,048
400	200	0,36	0,064
500	300	0,67	0,080

Таблица 4.4 – Расчетные значения механической скорости бурения и углубки за 1 об. при приработке алмазных коронок (применительно к станкам СКБ)

Тип бурового станка	Параметры режима приработки		Механическая скорость, м/ч	Величина отношения $V_{\text{мех}}/n$
	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Нагрузка на коронку, даН		
СКБ-4	155	200	0,14	0,015
	280	300	0,38	0,023
	390	400	0,70	0,037
СКБ-5	120	200	0,10	0,014
	257	300	0,35	0,023
	340	400	0,61	0,030
СКБ-7	100	200	0,09	0,015
	200	300	0,27	0,023
	300	400	0,84	0,029

На основе выполненных исследований предлагается приработку алмазных коронок проводить исходя из постоянства отношения механической скорости бурения к частоте вращения бурового снаряда. При этом, с целью исключения заполирования, нижнее значение этого отношения принимается равным 0,015 мм, оптимальная величина углубки за 1 оборот принимается равной [2, 4]:

0,1d . . . для трещиноватых твердых пород IX-XII категорий по буримости;

0,15d . . . для твердых монолитных горных пород IX-XII категорий по буримости .

Расчетные значения углубок за 1 об. при приработке алмазных коронок в различных группах горных пород приведены в таблицах 4.5, 4.6.

#### **4.4 Технология приработки алмазной коронки**

Приработку забоя под алмазную коронку предлагается выполнять следующим образом: буровой снаряд опускается на забой скважины; устанавливается частота вращения бурового снаряда 100-200 мин<sup>-1</sup> и минимальная нагрузка на породоразрушающий инструмент – 100-200 даН. При таких параметрах режима бурения углубка скважины ведется на глубину, соответствующую высоте матрицы алмазной коронки. В соответствии с данными таблицы 4.2 в зависимости от величины механической скорости бурения контролируется время приработки забоя. После углубки скважины на требуемую величину выполняется приработка алмазной коронки в следующей последовательности.

Устанавливается частота вращения в пределах 100-200 мин<sup>-1</sup>. Согласно рекомендациям таблиц 4.5-4.6 и в соответствии с зернистостью объемных алмазов прирабатываемой коронки, твердостью породы и частотой вращения бурового снаряда выбирается величина углубки за 1 оборот. Определяется значение механической скорости бурения, соответствующее выбранному значению углубки за 1 оборот. Устанавливается осевая нагрузка на коронку,

Таблица 4.5 – Рекомендуемые значения механической скорости бурения при приработке алмазных коронок в твердых трещиноватых горных породах

Зернистость объемных алмазов шт./карат	Средний диаметр алмазного зерна, мм	Категория горных пород по буримости	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>		
			100	120	155
40-30	1,80	IX	1,08	1,30	1,67
60-40	1,55	IX	0,93	1,12	1,44
90-60	1,43	IX-X	0,858	1,03	1,33
150-9	1,13	IX-XII	0,678	0,81	1,05
450-150	0,90	X-XII	0,54	0,65	0,84

Таблица 4.6 – Рекомендуемые значения механической скорости бурения при приработке алмазных коронок в монолитных твердых горных породах

Зернистость объемных алмазов шт./карат	Средний диаметр алмазного зерна, мм	Категория горных пород по буримости	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>		
			100	120	155
40-30	1,8	IX	1,62	1,94	2,51
60-40	1,53	IX	1,395	1,67	2,16
90-60	1,43	IX-X	1,287	1,54	1,99
150-90	1,13	IX-XI	1,017	1,22	1,58
450-150	0,90	X-XII	0,81	0,97	1,26

обеспечивающая поддержание полученного значения механической скорости бурения. Для контроля параметров режима бурения и механической скорости бурения используются контрольно-измерительные приборы для частоты вращения бурового снаряда, осевой нагрузки на коронку и механической скорости бурения. Если механическая скорость уменьшается или увеличивается, следует соответственно увеличивать или уменьшать нагрузку на коронку. Признаком окончания изменения нагрузки на коронку служит соответствие механической скорости табличным значениям.

#### **4.5 Методические рекомендации по бурению скважин в твердых горных породах**

На основе выполненных исследований разработаны методические рекомендации по повышению эффективности бурения скважин в твердых горных породах.

1. Для бурения используются серийные алмазные коронки в корпусе которых выполнены дополнительные промывочные каналы.

2. После спуска бурового снаряда в скважину осуществляется приработка забоя скважины под новую коронку. Время выполнения этой операции выбирается согласно таблице 4.2

3. Выполняется операция приработки алмазной коронки. В зависимости от зернистости объемных алмазов в соответствии с таблицами 4.5 и 4.6 выбирается оптимальная величина углубки за 1 оборот.

4. После приработки алмазной коронки в соответствии с геолого-техническим нарядом устанавливается частота вращения бурового снаряда.

5. Для принятой частоты вращения бурового снаряда подбирается осевая нагрузка, обеспечивающая поддержание выбранной величины углубки за 1 оборот и соответствующей ей механической скорости бурения.

6. По показаниям ваттметра в цепи питания электропривода бурового станка и измерителя скорости бурения контролируется процесс бурения.

В случае возникновения заполирования выполняется увеличение осевой нагрузки на коронку. Признаком окончания увеличения осевой нагрузки является восстановление механической скорости бурения до начального значения. Если увеличение нагрузки не приводит к стабилизации механической скорости бурения, то выполняется операция заточки алмазной коронки на забое скважины. Разработанные методические рекомендации позволяют распознавать и предупреждать возникновение заполирования алмазных коронок при бурении в плотных малоабразивных породах. При бурении в трещиноватых породах наличие дополнительных промывочных каналов в корпусе исключает выполнение операции «расходки» бурового снаряда из-за самозаклинивания керна в матричном кольце коронки, так как очистной агент будет циркулировать через промывочные каналы, выполненные в корпусе коронки.

#### **4.6 Стендовая и производственная оценка работоспособности опытной коронки**

На первом этапе опробования определялась в стендовых условиях работоспособность алмазной коронки с дополнительными каналами, выполненными в ее корпусе. Бурение выполнялось на бетонном блоке, имитирующем трещиноватые горные породы. Блок представлял собой зацементированные куски крупного гранитного щебня. Алмазный породоразрушающий инструмент: две серийные и две опытные однослойные алмазные коронки. Частота вращения бурового снаряда 390, 710 мин<sup>-1</sup>. Осевая нагрузка 500, 1000 даН. Очистной агент –техническая вода.

Ниже представлены исходные и обработанные результаты опытного бурения (таблицы 4.7 – 4.14) для получения регрессионной модели, устанавливающей связь между осевой нагрузкой, частотой вращения бурового снаряда и механической скоростью бурения.

Таблица 4.7 – Результаты экспериментального бурения серийной коронкой (эксперимент №1)

Параметры режима бурения			Первый опыт			Второй опыт			Третий опыт		
Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Осевая нагрузка, даН	Расход очистного агента, л/мин	Интервал бурения, м	Время с.	V мех, м/ч	Интервал бурения, м	Время, с.	V мех, м/ч	Интервал бурения, м	Время, с.	V мех, м/ч
390	500	20	0,00-0,05	15	12,0	0,00-0,05	18	10,0	0,00-0,05	14	12,9
390	500	20	0,05-0,10	18	10,0	0,05-0,10	14	12,9	0,05-0,10	15	12,0
390	500	20	0,10-0,15	26	6,9	0,10-0,15	23	7,8	0,10-0,15	20	9,0
390	500	20	0,15-0,20	29	6,2	0,15-0,20	22	8,2	0,15-0,20	19	9,5
390	500	20	0,20-0,25	28	6,4	0,20-0,25	20	9,0	0,20-0,25	26	6,9
390	500	20	0,25-0,30	30	6,0	0,25-0,30	26	6,9	0,25-0,30	22	8,2
390	500	20	0,30-0,35	16	11,3	0,30-0,35	16	11,3	0,30-0,35	15	12,0
390	500	20	0,35-0,40	14	12,9	0,35-0,40	14	12,9	0,35-0,40	14	12,9
390	500	20	0,40-0,45	45	4,0	0,40-0,45	35	5,1	0,40-0,45	42	4,3
390	500	20	0,45-0,50	43	4,2	0,45-0,50	33	5,5	0,45-0,50	38	4,7
Среднее значение V мех, м/ч					8,0				8,9	9,2	

Таблица 4.8 – Результаты экспериментального бурения серийной коронкой (эксперимент №2)

Параметры режима бурения			Первый опыт			Второй опыт			Третий опыт		
Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Осевая нагрузка, даН	Расход очистного агента, л/мин	Интервал бурения, м	Время с.	V мех, м/ч	Интервал бурения, м	Время, с.	V мех, м/ч	Интервал бурения, м	Время, с.	V мех, м/ч
390	1000	20	0,00-0,05	10	18,0	0,00-0,05	15	12,0	0,00-0,05	10	18,0
390	1000	20	0,05-0,10	12	15,0	0,05-0,10	12	15,0	0,05-0,10	12	15,0
390	1000	20	0,10-0,15	18	10,0	0,10-0,15	18	10,0	0,10-0,15	15	12,0
390	1000	20	0,15-0,20	16	11,3	0,15-0,20	22	8,2	0,15-0,20	14	12,9
390	1000	20	0,20-0,25	16	11,3	0,20-0,25	20	9,0	0,20-0,25	16	11,3
390	1000	20	0,25-0,30	13	13,8	0,25-0,30	22	8,2	0,25-0,30	14	12,9
390	1000	20	0,30-0,35	12	15,0	0,30-0,35	16	11,3	0,30-0,35	14	12,9
390	1000	20	0,35-0,40	10	18,0	0,35-0,40	14	12,9	0,35-0,40	13	13,8
390	1000	20	0,40-0,45	28	6,4	0,40-0,45	25	7,2	0,40-0,45	25	7,2
390	1000	20	0,45-0,50	32	5,6	0,45-0,50	27	6,7	0,45-0,50	21	8,6
Среднее значение V мех, м/ч					12,4				10,0		

Таблица 4.9 – Результаты экспериментального бурения серийной коронкой (эксперимент №3)

Параметры режима бурения			Первый опыт			Второй опыт			Третий опыт		
Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Осевая нагрузка, даН	Расход очистного агента, л/мин	Интервал бурения, м	Время с.	V мех, м/ч	Интервал бурения, м	Время, с.	V мех, м/ч	Интервал бурения, м	Время, с.	V мех, м/ч
710	500	20	0,00-0,05	16	13,8	0,00-0,05	12	15,0	0,00-0,05	11	16,4
710	500	20	0,05-0,10	14	12,9	0,05-0,10	13	13,8	0,05-0,10	15	12,0
710	500	20	0,10-0,15	25	8,6	0,10-0,15	15	12,0	0,10-0,15	16	11,3
710	500	20	0,15-0,20	23	7,8	0,15-0,20	20	9,0	0,15-0,20	14	12,9
710	500	20	0,20-0,25	25	8,2	0,20-0,25	22	8,2	0,20-0,25	12	15,0
710	500	20	0,25-0,30	27	8,6	0,25-0,30	18	10,0	0,25-0,30	11	16,4
710	500	20	0,30-0,35	14	12,9	0,30-0,35	10	18,0	0,30-0,35	14	12,9
710	500	20	0,35-0,40	15	12,0	0,35-0,40	12	15,0	0,35-0,40	11	16,4
710	500	20	0,40-0,45	35	6,0	0,40-0,45	28	6,4	0,40-0,45	15	12,0
710	500	20	0,45-0,50	40	5,1	0,45-0,50	34	5,3	0,45-0,50	10	18,0
Среднее значение V мех, м/ч					10,0				11,2	14,3	

Таблица 4.10 – Результаты экспериментального бурения серийной коронкой (эксперимент №4)

Параметры режима бурения			Первый опыт			Второй опыт			Третий опыт		
Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Осевая нагрузка, даН	Расход очистного агента, л/мин	Интервал бурения, м	Время с.	V мех, м/ч	Интервал бурения, м	Время, с.	V мех, м/ч	Интервал бурения, м	Время, с.	V мех, м/ч
710	1000	20	0,00-0,05	11	16,4	0,0-0,1	8	22,5	0,0-0,1	10	18,0
			0,05-0,10	15	12,0		10	18,0		8	16,4
710	1000	20	0,10-0,15	16	11,3	0,1-0,2	10	18,0	0,1-0,2	15	12,0
			0,15-0,20	14	12,9		13	13,8		15	12,0
710	1000	20	0,20-0,25	12	15,0	0,2-0,3	16	11,3	0,2-0,3	16	11,3
			0,25-0,30	11	16,4		14	12,9		17	12,9
710	1000	20	0,30-0,35	14	12,9	0,3-0,4	14	12,9	0,3-0,4	9	20,0
			0,35-0,40	11	16,4		13	13,8		7	15,0
710	1000	20	0,40-0,45	15	12,0	0,4-0,5	9	20,0	0,4-0,5	9	20,0
			0,45-0,50	10	18,0		10	18,0		8	18,0
Среднее значение V мех, м/ч					14,3				16,1	15,6	

Таблица 4.11 – Результаты экспериментального бурения опытной коронкой (эксперимент №1)

Параметры режима бурения			Первый опыт			Второй опыт			Третий опыт		
Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Осевая нагрузка, даН	Расход очистного агента, л/мин	Интервал бурения, м	Время с.	V мех, м/ч	Интервал бурения, м	Время, с.	V мех, м/ч	Интервал бурения, м	Время, с.	V мех, м/ч
390	500	20	0,00-0,05	18	10,0	0,00-0,05	19	19	0,00-0,05	20	20
390	500	20	0,05-0,10	20	9,0	0,05-0,10	22	22	0,05-0,10	17	25
390	500	20	0,10-0,15	21	8,6	0,10-0,15	20	20	0,10-0,15	20	20
390	500		0,15-0,20	23	7,8	0,15-0,20	19	19	0,15-0,20	22	22
390	500	20	0,20-0,25	25	7,2	0,20-0,25	20	20	0,20-0,25	20	20
390	500	20	0,25-0,30	26	6,9	0,25-0,30	25	25	0,25-0,30	27	27
390	500	20	0,30-0,35	18	10,0	0,30-0,35	18	23	0,30-0,35	20	20
390	500	20	0,35-0,40	21	8,6	0,35-0,40	22	22	0,35-0,40	23	23
390	500	20	0,40-0,45	30	6,0	0,40-0,45	23	23	0,40-0,45	25	25
390	500	20	0,45-0,50	24	7,5	0,45-0,50	21	21	0,45-0,50	20	20
Среднее значение V мех, м/ч					8,1				8,4		

Таблица 4.12 – Результаты экспериментального бурения опытной коронкой (эксперимент №2)

Параметры режима бурения			Первый опыт			Второй опыт			Третий опыт		
Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Осевая нагрузка, даН	Расход очистного агента, л/мин	Интервал бурения, м	Время с.	V мех, м/ч	Интервал бурения, м	Время, с.	V мех, м/ч	Интервал бурения, м	Время, с.	V мех, м/ч
390	1000	20	0,00-0,05	13	13,8	0,00-0,05	10	18,0	0,00-0,05	12	15,0
390	1000	20	0,05-0,10	10	18,0	0,05-0,10	11	16,4	0,05-0,10	10	18,0
390	1000	20	0,10-0,15	15	12,0	0,10-0,15	15	12,0	0,10-0,15	15	12,0
390	1000	20	0,15-0,20	15	12,0	0,15-0,20	14	12,9	0,15-0,20	15	12,0
390	1000	20	0,20-0,25	16	11,3	0,20-0,25	15	12,0	0,20-0,25	16	11,3
390	1000	20	0,25-0,30	18	10,0	0,25-0,30	17	10,6	0,25-0,30	13	13,8
390	1000	20	0,30-0,35	14	12,9	0,30-0,35	15	12,0	0,30-0,35	12	15,0
390	1000	20	0,35-0,40	15	12,0	0,35-0,40	12	15,0	0,35-0,40	14	12,9
390	1000	20	0,40-0,45	13	13,8	0,40-0,45	15	12,0	0,40-0,45	25	7,2
390	1000	20	0,45-0,50	15	12,0	0,45-0,50	14	12,9	0,45-0,50	20	9,0
Среднее значение V мех, м/ч					13,0				14,0	12,7	

Таблица 4.13 – Результаты экспериментального бурения опытной коронкой (эксперимент №3)

Параметры режима бурения			Первый опыт			Второй опыт			Третий опыт		
Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Осевая нагрузка, даН	Расход очистного агента, л/мин	Интервал бурения, м	Время с.	V мех, м/ч	Интервал бурения, м	Время, с.	V мех, м/ч	Интервал бурения, м	Время, с.	V мех, м/ч
710	1000	20	0,00-0,05	9	20,0	0,00-0,05	11	16,4	0,00-0,05	8	23
710	1000	20	0,05-0,10	9	20,0	0,05-0,10	9	20,0	0,05-0,10	9	20
710	1000	20	0,10-0,15	10	18,0	0,10-0,15	12	15,0	0,10-0,15	12	15
710	1000	20	0,15-0,20	12	15,0	0,15-0,20	11	16,4	0,15-0,20	10	18
710	1000	20	0,20-0,25	11	16,4	0,20-0,25	12	15,0	0,20-0,25	12	15
710	1000	20	0,25-0,30	12	15,0	0,25-0,30	10	18,0	0,25-0,30	12	15
710	1000	20	0,30-0,35	10	18,0	0,30-0,35	11	16,4	0,30-0,35	8	23
710	1000	20	0,35-0,40	12	15,0	0,35-0,40	10	18,0	0,35-0,40	8	23
710	1000	20	0,40-0,45	11	16,4	0,40-0,45	12	15,0	0,40-0,45	20	9
710	1000	20	0,45-0,50	10	18,0	0,45-0,50	11	16,4	0,45-0,50	12	15
Среднее значение V мех, м/ч					17,3				16,7	17,6	

Таблица 4.14 – Результаты экспериментального бурения опытной коронкой (эксперимент №4)

Параметры режима бурения			Первый опыт			Второй опыт			Третий опыт		
Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Осевая нагрузка, даН	Расход очистного агента, л/мин	Интервал бурения, м	Время с.	V мех, м/ч	Интервал бурения, м	Время, с.	V мех, м/ч	Интервал бурения, м	Время, с.	V мех, м/ч
710	500	20	0,00-0,05	11	16,4	0,00-0,05	12	15,0	0,00-0,05	13	13,8
710	500	20	0,05-0,10	10	18,0	0,05-0,10	10	18,0	0,05-0,10	10	18,0
710	500	20	0,10-0,15	12	15,0	0,10-0,15	15	12,0	0,10-0,15	15	12,0
710	500	20	0,15-0,20	15	12,0	0,15-0,20	12	15,0	0,15-0,20	15	12,0
710	500	20	0,20-0,25	14	12,9	0,20-0,25	15	12,0	0,20-0,25	13	13,8
710	500	20	0,25-0,30	12	15,0	0,25-0,30	14	12,9	0,25-0,30	15	12,0
710	500	20	0,30-0,35	13	13,8	0,30-0,35	16	11,3	0,30-0,35	15	12,0
710	500	20	0,35-0,40	11	16,4	0,35-0,40	12	15,0	0,35-0,40	16	11,3
710	500	20	0,40-0,45	15	12,0	0,40-0,45	10	18,0	0,40-0,45	15	12,0
710	500	20	0,45-0,50	12	15,0	0,45-0,50	14	12,9	0,45-0,50	12	15,0
Среднее значение V мех, м/ч					15,0				14,2	13,7	

Для проверки предлагаемых рекомендаций по технологии бурения твердых трещиноватых пород были построены регрессионные модели механической скорости бурения в зависимости от частоты вращения бурового снаряда и осевой нагрузки. Исходные данные для построения математической модели механической скорости бурения серийной коронкой представлены в таблице 4.15, для опытной коронки исходные данные представлены в таблице 4.16.

Таблица 4.15 – Обработанные результаты бурения серийной коронкой

Параметры режима бурения			Показатели	
Частота вращения, об/мин	Осевая нагрузка, даН	Расход очистного агента, л/мин	Интервал бурения, м	V мех., м/ч
390	500	20	0,0-0,5	8,5
390	1000	20	0,0-0,5	11,5
710	500	20	0,0-0,5	11,8
710	1000	20	0,0-0,5	15,4

Таблица 4.16 – Обработанные результаты бурения экспериментальной коронкой

Частота вращения, об/мин	Осевая нагрузка, даН	Расход очистного агента, л/мин	Интервал бурения, м	V мех, м/ч
390	500	20	0,0-0,0	8,1
390	1000	20	0,1-0,2	13,2
710	500	20	0,2-0,3	14,4
710	1000	20	0,3-0,4	17,2

Проверка опытов на воспроизводимость выполнена в табл. 4.17

Расчетные значение критерия Кохрена для серийной коронки составило 0,3761. Для опытной коронки оно составило 0,4357. Табличное значение критерия Кохрена составляет 0,7679 [65]. Определенные по результатам эксперимента значения критерия Кохрена меньше табличного, то гипотеза об однородности выборочных дисперсии принимается, и эксперимент можно считать воспроизводимым.

Таблица 4.17 – Оценка дисперсии воспроизводимости

Тип коронки	Механическая скорость бурения, м/ч				Дисперсия воспроизводимости
	$V_{\text{мех1}}$	$V_{\text{мех2}}$	$V_{\text{мех3}}$	$V_{\text{мех4}}$	
Серийная	8,7	11,6	11,8	15,3	0,7600
Опытная	8,2	13,2	17,2	14,4	0,2658

Для построения математической модели механической скорости бурения рассчитаем коэффициенты принятой математической модели. В таблице 4. 18 приведены расчетные коэффициенты регрессии полного факторного эксперимента.

Таблица 4.18 – Расчетные коэффициенты регрессии

Коэффициенты регрессии	Серийная коронка	Опытная коронка	Расчетные значения критерия Стьюдента	
			Для серийной коронка	Для опытной коронка
$b_0$	11,8	13,3	47,2	88,7
$b_1$	1,7	2,5	6,8	16,7
$b_2$	1,7	2,0	6,8	13,4
$b_{12}$	0,1	-0,6	0,4	-4

Табличное значение критерия Стьюдента для уровня значимости  $q = 0,05$  и при числе степеней свободы  $\nu = 8$ , составляет 1,86 [65, 78]. Исходя из этого коэффициенты  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  принимаем, как значимые. Коэффициенты  $b_{12}$  являются незначимыми, их принимаем равными нулю. Таким образом, регрессионная модель будет иметь вид:

#### 1. Для серийной коронки

$$V_{\text{мех}} = 11,8 + 1,7n + 1,7P \quad , \quad (4.2)$$

## 2. Для экспериментальной коронки

$$V_{\text{мех}} = 13,3 + 2,5n + 2,0P, \quad (4.3)$$

где  $n$ ,  $P$  – нормированные значения частоты вращения и осевой нагрузки на коронку.

Проверка адекватности регрессионной модели проводилась по критерию Фишера. В табл. 4.19 приведены расчетные значения функции отклика, полученные по формулам 4.2 и 4.3

Таблица 4.19 – Расчетные значения механической скорости бурения

Тип коронки	Механическая скорость бурения, м/ч			
	$V_{\text{мех1}}$	$V_{\text{мех2}}$	$V_{\text{мех3}}$	$V_{\text{мех4}}$
Серийная	8,2	12,6	11,9	15,4
Опытная	8,7	13,7	12,9	17,9

Численное значение дисперсии адекватности для экспериментальных коронок приведены в табл.4.20.

Таблица 4.20 – Критерии адекватности регрессионных моделей

Тип коронки	Критерии адекватности		
	Дисперсия адекватности	Расчетное значение критерия Фишера	Табличное значение критерия Фишера
Серийная	0,7795	0,9922	5,32
Опытная	1,7154	2,0828	5,32

Поскольку расчетные значения критерия Фишера меньше табличного ( при уровне значимости 0,95 ), полученные регрессионные модели могут быть использованы в практических расчетах. Таким образом, регрессионная модель механической скорости бурения для опытной коронки соответствует регрессионной модели для серийной коронки. Следовательно, разработанные методические рекомендации для бурения твердых пород опытными коронками

могут быть использованы в практике алмазного бурения. Полученные зависимости механической скорости бурения от параметров режима бурения показаны на рисунках 4.3, 4.4.

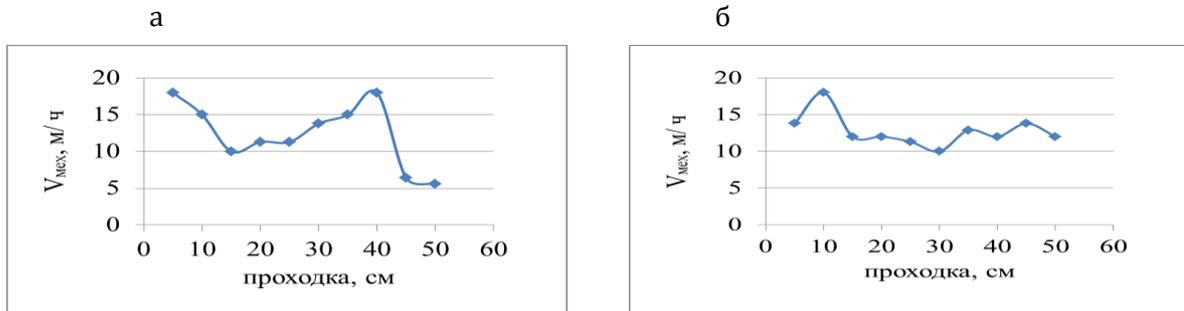


Рисунок 4.3 – Зависимость механической скорости бурения от параметров режима бурения для серийной коронки (а) и для опытной (б). (частота вращения 390 об/мин; осевая нагрузка 1000 даН).

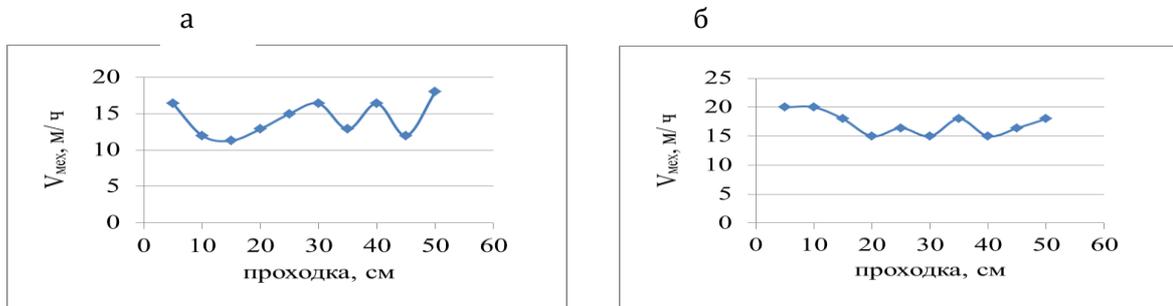


Рисунок 4.4 – Зависимость механической скорости бурения от параметров режима бурения для серийной коронки (а) и для опытной (б). (частота вращения 710 об/мин; осевая нагрузка 1000 даН).

По окончании опытов алмазные коронки обрабатывались до их полного износа. Проходка на серийную коронку составила 24 м, для опытной коронки проходка составила 29 м. Увеличение проходки на опытную коронку составило более 20 %. Это можно объяснить более эффективным удалением мелких фракций керна через промывочные каналы в корпусе коронки. Более высокие значения механической скорости и проходки на коронку можно объяснить тем, что при бурении опытной коронки исключается операция расходки бурового снаряда, так как при самозаклипании керна очистной агент продолжает циркулировать через промывочные каналы в корпусе коронки.

На втором этапе опробование работоспособности опытных коронок выполнялось при бурении плановых скважин. Сравнительные результаты отработки опытных и серийных коронок отражены в таблице 4.21.

Таблица 4.21 – Сравнительные результаты отработки опытных и серийных однослойных алмазных коронок

Тип и условный номер коронки	Интервал бурения, м		Проходка, м	Время бурения, мин	Механическая скорость бурения, м/ч	Параметры режима бурения			Причина окончания рейса
	от	до				нагрузка на коронку, даН	частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Расход очистного агента, дм <sup>3</sup> /мин	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	11
Опытные									
А4ДП:									
№ 1	50,6	53,6	3,0	31	5,8	1000-1400	460	40	Центральная фаска по торцу матрицы
№ 2	79,9	84,1	4,2	28	9,0	1000	800	40	Заполнение колонковой
	84,1	90,5	6,4	45	8,5	1000	800	40	Заполнение колонковой
	95,2	102,8	7,6	65	9,1	300-1000	800	40	Заполнение колонковой
	118,5	123,2	4,7	50	5,6	500-1000	800	40/22	Конец замера
	123,2	132,5	6,0	62	4,3	500-1500	800	22	Износ матрицы на высоте
Среднее на коронку			17,6		7,1	300-1800	800	40/22	

Продолжение таблицы 4.21

1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	
Серийные А4ДП: № 1	53,6	56,5	2,9	30	5,80	500-1000	800	40	Подклин	
	71,1	75,7	4,6	48	5,75	500-1000	800	40	Заполнение колонковой	
	75,7	79,9	4,2	42	6,00	500-800	800	40	Подклин	
	132,3	138,2	5,7	45	7,60	500-1000	800	40	Полный износ матрицы	
	№ 2	90,5	95,2	4,7	43	6,55	300-1200	800	40	Подклин
		102,8	109,2	6,4	60	6,40	500-1000	800	40	Заполнение колонковой
		138,2	144,0	5,8	50	6,96	500-1000	800	40/22	Износ матрицы на высоте
Среднее на коронку			17,2		6,4	300-1200	800	40/22		

Геологические условия: горные породы IX-X категорий по буримости, с различной степенью трещиноватости. Буровой станок – СКБ-5. На базе серийных коронок были изготовлены опытные коронки с дополнительными промывочными каналами в корпусе. В общей сложности было отработано 2 опытные коронки и 2 коронки серийной конструкции. Диапазоны параметров режима бурения, Среднее значение проходки на опытную коронку составило 17,6 м, на серийную коронку это значение составило 17,2 м. Механической скоростью бурения для опытных коронок составила 7,1 м/ч, для серийных – 6,4 м/ч. Выявлен механизм увеличения проходки за рейс и механической скорости при бурении опытными коронками. Анализ диаграмм мощности, потребляемой электроприводом бурового станка показал, что при бурении серийными коронками процесс увеличения мощности при самозаклинивании керна в матрице коронки более длителен во времени. Это объясняется тем, что при перекрытии керном или шламом промывочных каналов в матрице, прекращается циркуляция очистного агента. Коронка практически работает в режиме "сухого" трения до тех пор, пока в результате самоликвидации самозаклинивания керна восстанавливается циркуляция очистного агента. При бурении опытной коронкой в момент самозаклинивания керна весь очистной агент циркулирует через промывочные каналы в корпусе коронки. Режим работы коронки практически не меняется, обеспечивается стабильное охлаждение матрицы. Отличительной особенностью износа опытных коронок являются следы абразивного воздействия шлама на корпус коронки. Шлам, образующийся в данном случае не попадает снова под торец алмазной коронки, а выносится через отверстия в корпусе коронки. Также из рисунка 4.5 можно отметить, что в опытных коронках матрица изнашивалась на высоту промывочных каналов, однако прижога не наблюдалось. Это объясняется возможностью циркуляции очистного агента через промывочные каналы в корпусе коронки даже при полном износе матрицы. В результате выполненных исследований установлено, что выполнение дополнительных промывочных каналов в корпусе алмазных коронок повышает их работоспособность. Это объясняется тем, что при бурении в трещиноватых горных породах при самозаклинивании керна в коронке и

перекрытии шламом промывочных каналов в матрице, циркуляция очистного агента не нарушается. Весь очистной агент начинает циркулировать через промывочные каналы в корпусе коронки. Отпадает необходимость выполнения расходки бурового снаряда или уменьшения частоты вращения бурового снаряда.



Рисунок 4.5 – Отработанная опытная коронка  
1 – промывочный канал в корпусе коронки; 2 – следы абразивного воздействия шлама на корпус коронки

В сравнении с серийными коронками это способствует увеличению механической скорости бурения и проходки за рейс и на коронку. При этом упрощается управление процессом углубки скважины, исключаются непроизводительные затраты времени, связанные с ликвидацией самозаклинивания керна при бурении серийными коронками.

#### **4.7 Опробование метода распознавания и предупреждения аномального износа**

Для проведения исследований на буровом станке СКБ-5 дополнительно к имеющимся измерительным приборам был установлен измеритель скорости бурения. Исследования проводились при бурении скважин в интервале 100 –

200м. Горные породы – плотные граниты IX – X категории по буримости. Процесс заполирования контролировался по показаниям ваттметра и измерителя скорости бурения. При наличии устойчивого в течение 3 мин. снижения уровня мощности в механической скорости выключался буровой насос. Одновременно фиксировались начальная механическая скорость, механическая скорость при заполировании, механическая скорость после ликвидации заполирования. Выполнялось по три рейса опытной и серийной коронкой. Результаты эксперимента представлены в таблице 4.22. Следует отметить, что, при ликвидации заполирования путем кратковременного выключения бурового насоса, при наличии в корпусе алмазной коронки радиальных промывочных каналов, после включения бурового насоса циркуляция очистного агента восстанавливалась. В то же время при бурении серийной алмазной коронкой циркуляции очистного агента восстанавливалась не всегда. Это объясняется тем, что спекшийся шлам перекрывал промывочные каналы, а матрица коронки еще оставалась в работоспособном состоянии (рисунок 4.6).



Рисунок 4.6 – Серийная однослойная коронка с промывочными каналами, перекрытыми шламом

Таблица 4.22 – Данные опытного бурения

Тип коронки	Параметры режима бурения			Механическая скорость бурения, м/ч			Проходка на коронку, м	Примечание
	F, даН	n, мин <sup>-1</sup>	Q, л/мин	в начале заполирования	в конце заполирования,	после заточки		
Серийная однослойная	1000	715	20/0	3,2	1,6	2,9	2,0	На торце матрицы коронки прослеживается спекшийся шлам.
	1000	715	20/0	3,1	2,3	2,7	1,6	Циркуляция очистного агента после заточки всухую не восстанавливается.
	1000	715	20/0	3,6	2,1	3,3	1,8	На торце матрицы коронки имеют место следы спекшегося шлама.
Опытная однослойная	1000	715	20/0	3,4	2,9	1,8	2,5	На торце матрицы следы спекшегося шлама. Циркуляция очистного агента восстанавливается
	1000	715	20/0	3,5	3,1	3,2	3,0	На торце матрицы следы спекшегося шлама. Циркуляция очистного агента восстанавливается
	1500	715	20/0	3,6	3,1	3	3,5	На торце матрицы следы спекшегося шлама. Циркуляция очистного агента восстанавливается

Анализ результатов показывает, что применение серийных КИП позволяет достаточно оперативно распознавать заполирование и начало прижога алмазных коронок, принимать конкретные меры по их предупреждению.

Процесс предупреждения заполирования показан на рисунке 4.7. После углубки на 1,5 м отмечено постепенное снижение мощности и механической скорости бурения. Бурильщик выполнил операцию заточки путем выключения промывочного насоса и затем увеличил нагрузку на коронку. В результате этих операций произошло увеличение механической скорости бурения с последующей ее стабилизацией.

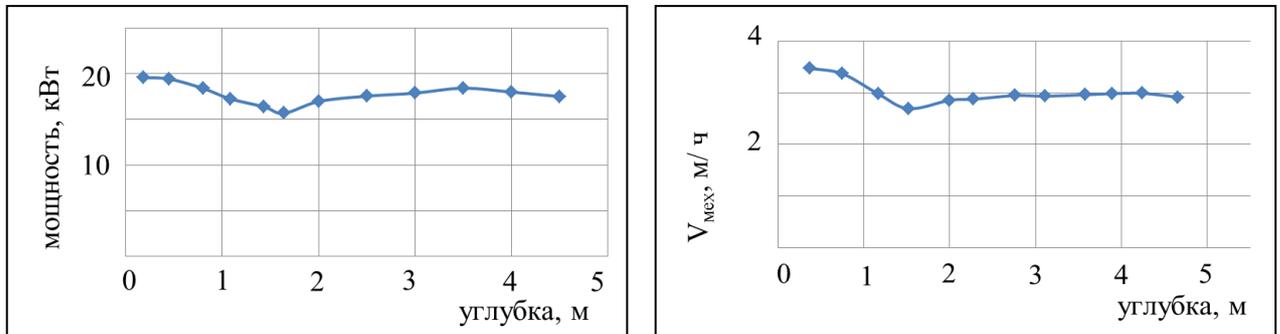


Рисунок 4.7 – Предупреждение заполирования в процессе бурения

Обработанные результаты опробования методических рекомендаций представлены в таблице 4.23.

Таблица 4.23 – Техничко-экономические показатели внедрения методических рекомендаций

Тип буровой коронки	Параметры режима бурения			Механическая скорость бурения, м/ч	Проходка за рейс, м
	F, даН	n, мин <sup>-1</sup>	Q, л/мин.		
Серийная	1500/2000	710	15/30	2,5	1,2
Опытная	1000/1500	710	15/30	3,0	2,8

Как показывает анализ данных таблицы 4.9 в результате внедрения методических рекомендаций по контролю и регулированию процесса бурения с использованием серийных КИП достигнуто повышение механической скорости бурения до 3,0 м/ч. (на 12 %), увеличение проходки за рейс до 2,8 м/ч ( на 23 %).

#### **Выводы по главе 4**

1. Для проведения экспериментальных исследований изготовлена опытная и серийная алмазные коронки. Опытная коронка отличается от серийной наличием в корпусе дополнительных промывочных каналов.

2. Установлено, что приработка забоя скважины под новую коронку должна выполняться при механической скорости 0,3-0,5 м/ч. Определено оптимальное значение углубки за 1 оборот при приработке алмазных коронок.

3. Применение алмазных коронок с дополнительными промывочными каналами в корпусе способствует предупреждению прижога как при самозаклинивании керна внутри матричного кольца, так и при ликвидации заполирования путем кратковременной заточки «всухую».

4. При бурении твердых трещиноватых пород коронкой с дополнительными промывочными каналами в корпусе исключается необходимость выполнения расходки бурового снаряда при самозаклинивании керна, что способствует увеличению механической скорости бурения.

5. В результате внедрения разработанных методических рекомендаций по контролю и предупреждению аномального износа алмазных коронок с использованием серийных КИП достигнуто повышение механической скорости бурения с 2,5 до 3,00 м/ч. (на 12 %) , увеличение проходки за рейс с 1,2 до 2,8 м/ч (на 23 %). Также было отмечено при исследованиях, что при бурение опытными коронками не приводило к заполированию и прижогу.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Установлены информативные признаки для однозначного распознавания заполирования и предприжога алмазных коронок: (для заполирования – одновременное уменьшение мощности и механической скорости бурения; для предприжога – одновременное увеличение мощности и механической скорости бурения).

2. Определены диапазоны температуры на торце матрицы при заполировании (до 320 °С), при нормальном износе алмазной коронки (320-660 °С), при предприжоге (660-800 °С).

3. С использованием метода мгновенных тепловых источников получено уравнение для расчета времени ликвидации заполирования в зависимости от параметров режима бурения и теплофизических характеристик материала матрицы алмазных коронок.

4. Для алмазных коронок основным фактором, определяющим количество алмазов, контактирующих с забоем скважины, является соответствие профиля матрицы коронки профилю забоя скважины. После приработки забоя под однослойную алмазную коронку в контакте с горной породой находится до 70-100 %.

5. Выполнение в корпусе серийных коронок дополнительных промывочных каналов способствует беспрепятственному восстановлению циркуляции очистного агента после ликвидации заполирования путем заточки коронки на забое скважины и не приводит к прижогу алмазных коронок.

6. Разработанные методические рекомендации по распознаванию и предупреждению аномального износа алмазных коронок способствуют повышению механической скорости бурения на 10-15 % и увеличению проходки на коронку на 15-20 %.

7. Дальнейшими задачами следует считать: исследование механизма удаления шлама с забоя скважины за счет действия центробежных сил; совершенствование конструкции корпуса алмазных коронок с целью уменьшения абразивного воздействия шлама, удаляемого через промывочные каналы в корпусе; разработку технических средств для автоматизированного распознавания и предупреждения аномального износа алмазных коронок.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Афанасьев, И. С. Справочник по бурению геологоразведочных скважин / И. С. Афанасьев, Г. А. Блинов, Н. Н. Бухарев и др. – СПб. : Недра, 2000. – 712 с.
2. Бабишин, В. А. Ресурсосберегающая технология алмазного бурения / В. А. Бабишин, В. А. Глоба, О. Л. Зайонц // Разведка и охрана недр. – 1988. – № 10. – С. 38–46.
3. Башкатов, Д. П. Исследование процесса алмазного бурения с позиций системного подхода / Д. П. Башкатов // Разработка и совершенствование методов и средств оптимизации и автоматизации процессов алмазного бурения : сб. науч. тр. – Л. : ВИТР, 1988. – С. 19–24.
4. Блинов, Г. А. Алмазосберегающая технология бурения / Г. А. Блинов, В. П. Васильев, М. Г. Глазов и др. – Л. : Недра, 1989. – 184 с.
5. Блинов, Г. А. Инструктивные указания по алмазному бурению геологоразведочных скважин на твердые полезные ископаемые / Г. А. Блинов, В. П. Васильев, О. С. Головин и др. – Л. : ВИТР, 1987. – 248 с.
6. Блинов, Г. А. Исследование влияния диаметра дополнительных промывочных каналов, выполняемых в корпусе алмазных коронок, на интенсивность теплофизического износа матрицы / Г. А. Блинов, В. Г. Гореликов // Породоразрушающий инструмент, армированный природными алмазами : сб. научн. тр. – Л. : ВИТР, 1989. – С. 80–84.
7. Богданов, Р. К. Исследование влияния формы профиля буровых коронок на эффективность разрушения горных пород / Р. К. Богданов, В. И. Опольский, А. А. Бугаев и др. // Породоразрушающий инструмент, армированный природными алмазами : сб. науч. тр. – Л. : ВИТР, 1989. – С. 89–96.
8. Богданов, Р. К. Гранулометрический состав шлама и его влияние на износ алмазного бурового инструмента / Р. К. Богданов, А. М. Исонкин, В. Н. Лившиц // Проблемы физико-химии и технологии дисперсных систем в бурении : Тез. докл. Межреспубликанской конф. – Екатеринбург, 1994. – С. 5–7.

9. Боярских, Г. А. Обоснование и выбор параметров и создание буровых коронок : автореферат дис. ... к-та. техн. наук. – Екатеринбург, 1997. – 20 с.
10. Будюков, Ю. Е. Алмазный породоразрушающий инструмент / Ю. Е. Будюков, В. И. Власюк, В. И. Спирин. – Тула : ИПП «Гриф и К», 2005. – 288 с.
11. Быченков, Е. И. Исследование износа алмазных импрегнированных коронок / Е. И. Быченков // Исследование и разработка методов и средств для реализации высокоэффективной ресурсосберегающей технологии геолого-разведочного бурения : сб. науч. тр. – Л., 1990. – С. 75–82.
12. Васильев, В. И. Влияние некоторых технологических факторов на износостойкость алмазных коронок / В. И. Васильев // Методика и техника разведки : сб. науч. тр. – Л. : ОНТИ ВИТР, 1976. – №108. – С. 10–12.
13. Васильев, В. И. Величина углубки породоразрушающего инструмента за 1 оборот как определяющий фактор разработки параметров режима высокоскоростного бурения / В. И. Васильев, В. А. Каулин, В. Н. Зорин // Разработка и совершенствование технологии алмазного бурения в сложных горно-геологических условиях : сб. науч. тр. – М. : ВПО «Союзгеотехника», 1983. – С. 36–43.
14. Волков, Л. С. Создание алмазного породоразрушающего инструмента / Л. С. Волков // Породоразрушающий инструмент, армированный природными алмазами : сб. науч. тр. – Л. : ВИТР, 1989. – С. 52–63.
15. Воробьев, Г. А. Режимы работы алмазной коронки и их исследование с помощью скоростной киносъемки / Г. А. Воробьев, Б. А. Новожилов, С. А. Варца // Изв. Вузов. Геол. и разведка. – 1988. – №9. – С. 123–128.
16. Власюк, В. И. Новые технологии в создании и использовании алмазного породоразрушающего инструмента / В. И. Власюк, Ю. Е. Будюков, Л. К. Горшков и др. – М. : ЗАО «Геоинформмарк», 2002. – 140 с.
17. Власюк, В. И. Менеджмент производства алмазного породоразрушающего инструмента / В. И. Власюк, В. Ф. Чихоткин. – М. : МГГА, 2000. – 59 с.

18. Воздвиженский, Б. И. Пути повышения эффективности колонкового алмазного бурения / Б. И. Воздвиженский, В. К. Володченко, Г. К. Воробьев и др. // Техн. и технол. геол.-развед. работ; орг. производства. Обзор ВИЭМС. – М., 1980. – 57 с.

19. Ву Ван Донг. Обоснование и разработка технологии алмазного бурения на основе изменения промывочной системы породоразрушающего инструмента : автореферат дис. ... к-та. техн. наук. – СПб., 2013. – 20 с.

20. Глазов, М. Г. Алмазосберегающая технология / М. Г. Глазов // Разведка и охрана недр. – М., 1983. – №4. – С. 28–31.

21. Гореликов, В. Г. Классификация методов расчета количества буровых алмазов, контактирующих с горной породой / В. Г. Гореликов, Баатархуу Гантулга // XVII международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2016». – Ухта. : Ухтинский государственный технический университет, 2016. – С. 1–5.

22. Гореликов, В. Г. Классификация износа алмазных коронок / В. Г. Гореликов, Баатархуу Гантулга // Международная научно-практическая конференция «Бурение в осложненных условиях». – СПб. : Санкт-Петербургский горный университет, 2016. – С. 25–26.

23. Гореликов, В. Г. Анализ и исследование механизма аномального износа алмазных коронок / В. Г. Гореликов, Ю. В. Лыков, Баатархуу Гантулга // Журнал «Экология и развитие общества». – 2017. – №1(20). – С. 11–15.

24. Гореликов, В. Г. Классификация и анализ методов расчета количества буровых алмазов, участвующих в разрушении горных пород / В. Г. Гореликов, Ю. В. Лыков, Баатархуу Гантулга // Магистрант, докторантын эрдэм шинжилгээний битээлийн эмхэтгэл. – 2014. – № 9/156. – С. 115–117.

25. Гореликов, В. Г. Аналитические исследования механизма углубки скважины при алмазном бурении / В. Г. Гореликов, М. Ю. Насонов, С. И. Протасов, Баатархуу Гантулга // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2017. – №5. – С. 24–29.

26. Гореликов, В. Г. Расчет объема межконтактного пространства пары «алмазная коронка – горная порода» / В. Г. Гореликов, Ю. В. Лыков, Баатархуу Гантулга // XVIII Международная научно-практическая конференция «Бурение-2016». – Улаанбаатар. : ШУТИС, 2016. – С. 73–74.

27. Горшков, Л. К. Определение количества и глубины внедрения режущих зерен при разрушении горных пород импрегнированными алмазными коронками / Л. К. Горшков. – Изв. Вузов. Геол. и разведка, 1975. – №1. – С. 128–135.

28. Горшков, Л. К. Рекомендации по технологии алмазного бурения с учетом действия температурного фактора / Л. К. Горшков, О. П. Медведев. – М. : Мингео РСФСР, 1983. – 105 с.

29. Горшков, Л. К. Современная технология бурения геологоразведочных скважин / Л. К. Горшков. – Л. : ЛГИ, 1983. – 101 с.

30. Горшков, Л. К. Температурные режимы алмазного бурения / Л. К. Горшков, В. Г. Гореликов. – М. : Недра, 1992. – 173 с.

31. Евланов, Л. Г. Экспертные оценки в управлении / Л. Г. Евланов, В.А. Кутузов. – [21]. . Экономика, 1978. – 120 с.

32. Евдокимов, Ю. А. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа / Ю. А. Евдокимов, В. И. Колесников, А. И. Теренин. – М. : Недра, 1980. – 150 с.

33. Жарков, С. Н. Анализ температурного режима работы алмазных коронок при бурении глубоких скважин / С. Н. Жарков // Разработка и совершенствование алмазного породоразрушающего инструмента : сб. науч. тр. – М. : ВПО «Союзгеотехника», 1989. – С. 31–35.

34. Загора, А. П. Разработка коронок с равноизносостойким профилем комбинированной матрицы для бурения скважин в монолитных и слаботрещиноватых породах : автореферат дис. ... к-та. техн. наук. – М., 1991. – 19 с.

35. Загора, А. П. О концепции оперативного прогнозирования технико-экономических показателей работы алмазного бурового породоразрушающего инструмента: научное издание / А. П. Загора, Р. К. Богданов, В. Ф. Чихоткин // 4-й

Международ. симп. по бурению скважин в осложн. условиях, Санкт-Петербург, 8-12 июня, 1998. - СПб : Изд-во С.-Петербург. гос. горн. ин-та, 1998. – С. 105

36. Загора, А. П. О регулировании износостойкости алмазной буровой коронки / А. П. Загора, В. Ф. Чихоткин // Изв. вузов. Сер. "Геология и разведка". – М., 1996. – № 5. – С. 134–135.

37. Зорин, В. Н. Обеспечение оптимальной углубки при бурении алмазным породоразрушающим инструментом / В. Н. Зорин // Исследование, разработка и внедрение технологии алмазного бурения скважин на твердые полезные ископаемые : сб. науч.тр. – М. : ВПО «Союзгеотехника», 1984. – С. 47–51.

38. Зимин, Б. В. Методические рекомендации по организации и технологии высокооборотного алмазного бурения / Б. В. Зимин, Т. П. Бронникова, С. А. Коробков и др. – Л. : ВИТР, 1990. – 66 с.

39. Ивженко, А. Н. Пути повышения эффективности бурения трещиноватых пород / А. Н. Ивженко // Синтетические алмазы и их применение в практике геологоразведочного бурения : сб. науч. тр. – Киев, ИСМ АН УССР, 1991. – С. 40–44.

40. Исаев, М. И. Основы прогрессивной технологии алмазного бурения геологоразведочных скважин / М. И. Исаев, П. П. Пономарев. – М. : Недра, 1975. – 287 с.

41. Исаев, М. И. Исследование процесса работы алмазной коронки при бурении трещиноватых и перемежающихся по твердости пород / М. И. Исаев, Г. И. Ширко, Е. И. Быченков и др. // Геология и разведка. – Л., 1971. – № 9. – С. 134–140.

42. Исонкин, А. М. Прогнозирование углубки за один оборот буровой коронки, оснащенной синтетическими алмазами / А. М. Исонкин, Р. К. Богданов // Создание и внедрение породоразрушающего инструмента с синтетическими алмазами и сверхтвердыми материалами : сб. науч. тр. – Л., ВИТР, 1987. – С. 19–26.

43. Исонкин, А. М. Влияние параметров режима бурения и прочностных характеристик алмазов на износ импрегнированных буровых коронок / А. М. Исонкин, Р. К. Богданов, В. Ф. Чихоткин // Изв. вузов. Сер. "Геология и разведка". – 1997. – № I. – С. 14–132.

44. Исонкин, А. М. Влияние интенсификации режимов бурения на свойства материала матрицы импрегнированных коронок. / А. М. Исонкин, Р. К. Богданов, В. П. Кебко // Свердловского горного ин-та : сб. науч. тр. – Свердловск, 1989. – Вып. 12. – С. 39–43.

45. Исонкин, А. М. Влияние размера секторов коронки на показатели ее работоспособности / А. М. Исонкин, Р. К. Богданов // НТИС. Научно-технические достижения и передовой опыт в области геологии и разведки недр. – М. : МГП "Геоинформарк", 1992. – Вып. 11. – С. 45–48.

46. Казика В. Ф. Основы расчета параметров импрегнированного слоя буровых коронок с гранулированными: автореферат дис. ... к-та. техн. наук. – СПб., 1999. – 25 с.

47. Казика, В. Ф. Исследование процесса разрушения горных пород и удаления продуктов разрушения при вращательном бурении / В. Ф. Казика // Совершенствование технических средств ССР и повышение эффективности их внедрения : сб. науч. тр. – Л. : ВИТР, 1987. – С. 109–107.

48. Казика, В. Ф. Исследования процесса бурения трещиноватых горных пород / В. Ф. Казика, В. Г. Гореликов, Ю. А. Бакаржиев // Создание и внедрение породоразрушающего инструмента с синтетическими алмазами и сверхтвердыми материалами : сб. науч. тр. – Л. : 1987. – С. 68–71.

49. Кардыш, В. Г. Новые данные по выбору и регулированию параметров режима алмазного бурения / В. Г. Кардыш, Б. В. Мурзаков, А. С. Окмянский. – Разведка и охрана недр, 1976. – №8. – С. 56–60.

50. Кичигин, А. Ф. Алмазный породоразрушающий инструмент для разрушения крепких горных пород / А. Ф. Кичигин, С. И. Игнатьев, Ю. И. Климов. – М. : Недра, 1980. – 253 с.

51. Козловский, А. Е. Оптимизация процесса бурения (Структура и элементы управления) / А. Е. Козловский. – СПб. : Изд-во СПб. картограф. фабрики ВСЕГЕИ, 2000. – 246 с.

52. Корнилов, Н. И. Технология бурения скважин алмазным инструментом при высоких скоростях вращения / Н. И. Корнилов, Г. А. Блинов П. Н. Курочкин. – М. : Недра, 1978. – 153 с.

53. Кочкарев, А. В. Современное представление о механизме самозаклинивания керна / А. В. Кочкарев, Д. Н. Башкатов. – М. : ВИЭМС, 1987. – 42 с.

54. Кочкарев, А. В. Разработка колонковых снарядов и технологии бурения, направленных на увеличение углубки за рейс при бурении скважин с отбором керна в условиях его самозаклинивания : автореферат дис. ... к-та. техн. наук. – М. : МГРИ, 1987. – 24 с.

55. Кубасов, В. В. Повышение эффективности бурения геологоразведочных скважин в твердых породах путем модернизации матриц алмазного породоразрушающего инструмента : дис. ... к-та. техн. наук. – М., 2015. –131 с.

56. Кудайкулов, С. К. Самозаклинивание керна при бурении наклонных скважин в трещиноватых породах / С. К. Кудайкулов // Избранные доклады. Материалы VIII международной конференции « Новые идеи науки о земле». – М., апрель 2005 г. – С. 81–83.

57. Кудайкулов, С. К. Алмазные буровые коронки высокой стойкости / С. К. Кудайкулов // Сб. IV Международной конференции «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природосберегающие технологии освоения недр». – М. : 2007. – С. 51–53.

58. Лившиц, В. И. Исследование работоспособности геологоразведочных коронок, импрегнированных синтетическими алмазами : автореферат дис. ... к-та. техн. наук. – Киев. ИСМ, 1975. –20 с.

59. Мпезо Мавамбо. Исследование влияния конструктивных параметров алмазной коронки на ее работоспособность / Мпезо Мавамбо // Записки горного института. – СПб. : 2002, – Т. 152. – С. 133–134.

60. Липатников, В. П. Исследование процесса высокооборотного алмазного бурения твердых горных пород / В. П. Липатников, В. И. Васильев, Н. И. Корнилов // Исследование, разработка и внедрение технологии алмазного бурения

скважин на твердые полезные ископаемые : сб. науч. тр. –Л. : ВИТР, 1984. – С. 32–39.

61. Опольский, В. И. Исследование закономерностей изменения формы промывочных каналов в алмазных буровых коронках. Совершенствование техники и технологии бурения скважин на твердые полезные ископаемые / В. И. Опольский, Р. К. Богданов // Межвуз. научн, темат. сб. Екатеринбург УГГА. – 1996. – Вып. 19. – С. 90–95.

62. Опольский, В. И. Исследование и разработка алмазных буровых коронок с равноизносостойкой рабочей поверхностью / В. И. Опольский, Р. К. Богданов // Сб. Бурение скважин в осложненных условиях / Докл. науч.-техн. конференц., посвященной 25-летию кафедры "Технология и техника геологоразведочных работ". – Донецк: ДОНГГУ, 1996. – С. 64–67.

63. Опольский, В. И. Определение усилий резания на импрегнированные коронки в зависимости от параметров ее рабочей поверхности / В. И. Опольский, А. А. Бугаев // сб. науч. тр. – Л. : ВИТР, 1987. – С. 86–93.

64. Пешалов, Ю. А. Оптимизация применения технических средств и технологии бурения разведочных скважин / Ю. А. Пешалов. – М., Недра, 1979. – 296 с.

65. Привало, К. И. Математические основы теории планирования эксперимента / К. И. Привало. – Курск, 2001. – 198 с.

66. Пономарев, П. П. Алмазное бурение трещиноватых пород / П. П. Пономарев. – Л. : Недра, 1985. – 144 с.

67. Романенко, В. Н. Основы исследовательской работы / В. Н. Романенко, Г. В. Никитина. – СПб., 1995. – 138 с.

68. Резников А. Н., Резников Л. А. Тепловые процессы в технологических системах. – М.: Машиностроение, 1990. – 288с.

69. Сахаров, А. В. Влияние зернистости и концентрации объемных алмазов на эффективность алмазного бурения / А. В. Сахаров, И. М. Гинзбург, Л. Г. Горшков // – Изв. Вузов. Горный журнал, 1988, – №5. – С. 73–77.

70. Свешников, И. А. Исследование процесса разрушения горных пород при бурении скважин / И. А. Свешников, Б. А. Олейников, А. В. Мельничук // Тезисы докладов третьей всесоюзн. Научно-техн. Конференции «Разрушение горных пород при бурении скважин РГП-82». Т.2 –Уфа, УНИ, 1982. С. 98-101.. – СПб., 2001. – 75 с.

71. Семко, М. Ф. Основы алмазного шлифования / М. Ф. Семко, А. И. Грабченко, А. Ф. Раб. – Киев : Техника, 1978. – 192 с.

72. Спивак, А. И. Разрушение горных пород при бурении скважин / А. И. Спивак, А. Н. Попов. – М. : Недра, 1986. – 208 с.

73. Спиринов В. И. Разработка рациональной технологии эксплуатации алмазных коронок с использованием электрохимической заточки: автореферат дис. ... к-та техн. наук. – Л. : ЛГИ., 1984. – 21 с.

74. Сулакшин, С. С. Бурение геологоразведочных скважин / С. С. Сулакшин. – М. : Недра, 1994. – 432 с.

75. Сыздыков, А. Х. Создание буровых коронок с синтетическими алмазами : автореферат дис. ... к-та техн. наук. – ЛГИ., 1988. – 21 с.

76. Тихомиров, В. Б. Планирование и анализ эксперимента. / В. Б. Тихомиров. – М. : Легкая индустрия, 1974. – 262 с.

77. Уржумов, А. И. Самозаклинование керн при бурении ССК-59 и его влияние на искривление скважины / А. И. Уржумов // Повышение эффективности технологии и техники бурения скважин : сб. науч. Тр. – Алма-Ата: КазПТИ, 1988. – С. 30–35.

78. Хастингс, Н. Справочник по статистическим распределениям / Н. Хастингс, Дж. Пинкок. – М. : Статистика, 1980. – 95 с.

79. Чихоткин, В. Ф. Создание эффективного бурового алмазного инструмента на основе изучения процесса взаимодействия его с горной породой : автореферат дис. ... к-та техн. наук. – Днепропетровск, 1996. – 32 с.

80. Чихоткин, В. Ф. Исследование техники и технологии бурения геологоразведочных скважин и разработка нового поколения алмазного породоразрушающего инструмента / В. Ф. Чихоткин. – М., 1997. – 241 с.

81. Чихоткин, В. Ф. Исследование влияния конструктивных параметров торца коронки БИТ на эффективность разрушения горных пород при бурении / В. Ф. Чихоткин, Р. К. Богданов, А. П. Загора // Бурение скважин в осложненных условиях : сб. науч. тр. – Донецк: ДОНГТУ, 1996. – С. 95–97.

82. Чихоткин, З. Ф. Влияние конструктивных особенностей промывочного канала импрегнированной коронки на разрушение горных пород / З. Ф. Чихоткин, Р. К. Богданов, А. П. Загора // Совершенствование техники и технологии бурения скважин на твердые полезные ископаемые : сб. науч. тр. – Екатеринбург УГГТА, 1996. – Вып. 19. – С. 68–78.

83. Шерстюк, О. И. Исследование и разработка метода оперативного управления процессом бурения скважин в твердых породах : автореферат дис. ...к-та техн. наук. – Л. : ЛГИ, 1982. – 23 с.

84. Яковлев, А. А. Математическое моделирование температурного поля в теле работающих алмазных коронок с различной формой матрицы / А. А. Яковлев, А. В. Козлов // Породоразрушающий инструмент, армированный природными алмазами : сб. науч. тр. – Л. : ВИТР, 1989. – С. 30–36.

85. Яковлев, А. А. Моделирование и анализ температурного режима алмазного породоразрушающего инструмента / А. А. Яковлев, А. В. Козлов // Тезисы докладов на 2-ом Международном симпозиуме по бурению скважин в осложненных условиях (4–9.06.92, СПб.). – СПб. : СПГИ (ТУ), 1992. – 35 с.

86. Gorelikov, V. G. Analytical and experimental study of the mechanisms of diamond bits interaction with rocks in the wellbore during sinking processes / V. G. Gorelikov, Yu. V. Lykov, Baatarkhuu Gantulga // International Journal of Applied Engineering Research. – 2016. – Volume 11, Number 10. – P. 7012–7016.

87. Gorelikov, V. G. Analytical research and classification of mechanism of diamond drilling-bits contact with rocks during well sinking / V. G. Gorelikov, Yu. V. Lykov, Baatarkhuu Gantulga // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Volume 87, Issue 2, Number 022012.

88. Woicik Michal. Technologiczne aspekty zuzywania sie diamentjw narzedziach wiertniczych / Woicik Michal // Techn. poszuk. geol. Geosinoptikai geotermia. – 1992, – 31, №3. – С. 25–31.

89. Ziela Antoni. Analiza z wykorzystaniem technikifilmowania. characterystycznych wlascwjsoci prasy przewodow wiertniczego z koronka diamentowa / Ziela Antoni, Rzyczniak Miroslaw, Glut Barbara // Zesz. nauk.Ag. // im Stanislaw Staszica Gor. – 1992, – 16, №1. – С. 5–15.

90. Төвхөө, Л. Манай эрдэмтэд: Өрөмдлөгийн нөхцөл, технологи, процессын оновчлол / Л. Төвхөө. – Улаанбаатар : ШУТИС-ийн Хэвлэлийн үйлдвэр, 2014. – 512 х.

91. Төвхөө, Л. Эрдэнэтийн зэс молибдений ордын хүрээнд чулуулгийн анцавжилтанд хийсэн судалгаа / Л. Төвхөө, Д. Түвшинбаяр, Ц. Дашдорж // Өрөмдлөгийн албаны тулгамдсан асуудлууд. – Улаанбаатар, 2006. – №1/8. – Х. 92.

92. Цэвээнжав, Ж. Геологи-хайгуулын өрөмдлөг / Ж. Цэвээнжав. – Улаанбаатар, 2012. – 72 х.

93. Продукция для разведочного бурения [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <https://www.atlascopco.com/ru-ru/mrba/products/rock-drilling-tools/core-drilling-tools/Exploration-drilling/Core-Drilling-Bits/Wireline-core-barrels211>.

94. Установки для разведочного бурения [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <http://www.oaomzk.ru/production/urb>.