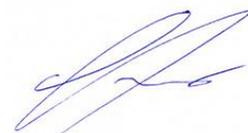


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Кузбасский государственный технический
университет имени Т. Ф. Горбачева»

На правах рукописи



Хуснутдинов Михаил Константинович

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШАРОШЕЧНОГО
ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ БУРЕНИЯ НЕКРУГЛЫХ
СКВАЖИН С УГЛОВЫМИ КОНЦЕНТРАТОРАМИ
НАПРЯЖЕНИЙ**

Специальность 05.05.06 – «Горные машины»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук Богомолов Игорь Дмитриевич доктор технических наук Буялич Геннадий Даниилович
--

Кемерово – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЗРЫВНЫХ СКВАЖИН НА ОТКРЫТЫХ РАЗРАБОТКАХ	11
1.1 Анализ влияния горно-геологических и горнотехнических условий на эффективность ведения буровзрывных работ	11
1.2. Характеристика известных решений по управлению энергией взрыва при дроблении горных пород	19
1.3 Современный уровень буровой техники и инструмента для образования взрывных скважин	30
1.4 Подходы к конструированию буровых исполнительных органов для образования некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений механическим способом	36
1.5 Выводы и задачи исследований.....	52
2 ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ И ПАРАМЕТРОВ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ СКВАЖИН, ШАРОШЕЧНОГО ИНСТРУМЕНТА И ИХ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ	54
2.1 Разработка моделей взаимосвязи конструктивных и кинематических параметров шарошечного бурового инструмента и формы и параметров забоя некруглой скважины с угловыми концентраторами напряжений	54
2.1.1 Определение взаимосвязей конструктивных и кинематических параметров инструмента	54
2.1.2 Определение взаимосвязей геометрии калибрующей кромки шарошки и геометрии некруглого поперечного сечения скважины	63
2.1.3 Определение конструктивных параметров шарошек по условию их размещения в некруглом поперечном сечении скважины	71
2.2 Макетные испытания шарошечного инструмента по образованию некруглой скважины с угловыми концентраторами напряжений.....	78

2.3 Обоснование рациональных параметров форм поперечного сечения скважин с точки зрения эффективности действия взрыва.....	81
2.3.1 Методика сравнительной оценки технических решений по нескольким критериям с помощью аддитивной функции полезности.....	81
2.3.2 Разработка и отбор критериев для сравнительной оценки форм поперечного сечения скважин	85
2.3.3 Сравнительная оценка форм поперечного сечения скважин по их параметрам	89
2.4 Обоснование рациональных конструктивных параметров шарошечного инструмента	92
2.4.1 Разработка и отбор критериев для сравнительной оценки шарошечного инструмента по конструктивным параметрам	93
2.4.2 Сравнительная оценка шарошечного инструмента по конструктивным параметрам	95
2.5 Выводы.....	98
3 ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ	
ШАРОШЕЧНОГО ИНСТРУМЕНТА С ЗАБОЕМ НЕКРУГЛОЙ	
СКВАЖИНЫ	101
3.1 Разработка модели формирования суммарного осевого усилия и оценка характера его изменения	101
3.2 Разработка модели формирования момента, отклоняющего инструмент от оси его вращения и оценка характера его изменения.....	111
3.3 Разработка модели формирования крутящего момента на буровом инструменте и оценка характера его изменения	117
3.4 Обоснование рациональных параметров шарошечного инструмента по его силовому взаимодействию с забоем некруглой скважины	120
3.5 Выводы.....	124

4	ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ И РАЗРАБОТКА СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ ШАРОШЕЧНОГО ИНСТРУМЕНТА.....	126
4.1	Сравнительная оценка шарошечного инструмента на основании комплексной оценки его эффективности для бурения взрывных скважин с различными формой и параметрами некруглого поперечного сечения	126
4.2	Разработка схемных решений шарошечного инструмента для бурения некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений	130
4.3	Разработка конструкции экспериментального образца шарошечного инструмента для бурения некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений	139
4.4	Апробация экспериментального образца шарошечного инструмента в промышленных условиях	143
4.5	Выводы.....	150
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	151
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	153
	ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	175

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Доля открытых горных работ в общей добыче угля в 2019 г. составила 75,7% – 334,1 млн т при сохранении ее роста. Объемы добычи сырой железной руды в 2016 г. составили 298 млн т и имеется тенденция их сохранения, при этом открытым способом добывается около 93 % железной руды. Основные объемы открытых горных работ связаны с применением взрывного дробления для подготовки горных пород к выемке – проведением буровзрывных работ. В связи с увеличением объемов добычи полезных ископаемых растут количество используемых взрывчатых веществ и, соответственно, объемы бурения взрывных скважин, например, на угольных разрезах Кузбасса в 2019 г. использовано 809,6 млн т взрывчатых веществ.

На крупных предприятиях, ведущих открытый способ добычи полезного ископаемого, затраты на буровзрывные работы достигают 30 % от общих затрат на добычу и ожидается их увеличение по мере углубления горных работ, при этом требования к буровзрывным работам в этой связи неуклонно растут в части сокращения затрат. В ближайшие годы доля крепких и крепчайших пород на крупных карьерах в вынимаемой горной массе превысит 75 %. Поэтому подготовка горных пород к выемке буровзрывным способом, особенно в условиях углубления открытых горных работ и повышения прочности горных пород, требует дальнейшего развития. При этом обеспечение рационального использования взрывчатых веществ для уменьшения затрат, а также достижения высокой производительности бурового станка по обуренной горной массе и качества взрывного дробления горной породы достигается повышением эффективности действия взрыва.

Одним из перспективных способов повышения эффективности действия взрыва является использование угловых концентраторов напряжений на стенке взрывной полости путем изменения формы ее поперечного сечения. Отсутствие научно-обоснованных решений в этой области является сдерживающим фактором развития буровзрывных работ на открытых разработках. Поэтому обоснование

параметров шарошечного инструмента, использование которого имеет наибольшее распространение на открытых разработках, для бурения скважин с угловыми концентраторами напряжений является актуальной задачей.

Степень разработанности. Исследованию процесса шарошечного бурения посвящены работы Буткина В. Д., Гилева А. В., Шигина А. О., Эйгелеса Р. М., Симонова В. В., Балицкого П. В., Юнина Е. К. и др., в которых определены эксплуатационно-технические показатели процесса шарошечного бурения, конструктивные, кинематические и силовые параметры шарошечного инструмента для бурения скважин круглого поперечного сечения. В настоящее время недостаточно полно исследованы параметры шарошечного инструмента для бурения некруглых скважин на открытых горных работах.

Цель работы – обоснование конструктивных, кинематических и силовых параметров шарошечного инструмента для бурения некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений.

Идея работы заключается в использовании оригинального инструмента для образования взрывных скважин с угловыми концентраторами напряжений при вращательном бурении.

Задачи работы:

- разработать модели взаимосвязей конструктивных, кинематических параметров шарошечного инструмента и формы и параметров забоя некруглой скважины с концентраторами напряжений;
- разработать модели влияния формы и параметров забоя некруглой скважины с концентраторами напряжений на формирование силовых параметров шарошечного инструмента;
- обосновать параметры шарошечного инструмента, путем разработки критериев функции полезности и комплексной сравнительной оценки эффективности шарошечного инструмента для бурения взрывных скважин с различными формой и параметрами некруглого поперечного сечения станками вращательного бурения для открытых горных работ;

- разработать схемные и конструктивные решения шарошечного инструмента для бурения некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений и провести в производственных условиях испытания его экспериментального пилотного образца.

Научная новизна заключается в том, что:

- установлено, что изменение угла наклона секущих плоскостей, образующих калибрующие кромки шарошек, по линии диаметра которых они пересекаются, приводит к изменению выпуклости или вогнутости стенок скважины некруглого поперечного сечения с угловыми концентраторами напряжений;

- определено, что для поперечного сечения скважины с двумя и четырьмя углами, при вогнутой или плоской форме забоя максимально возможное количество шарошек – 3, а для треугольного поперечного сечения – 2;

- впервые установлен характер изменения за один оборот момента, отклоняющего буровой инструмент от оси его вращения, осевого усилия и крутящего момента, при этом эти силовые параметры уменьшаются при увеличении выпуклости и притупления углов сопряжения стенок скважины, а момент, отклоняющий инструмент от оси его вращения, возникает при дробной кратности отношения количества углов поперечного сечения скважины к количеству шарошек;

- доказано, что при формировании угловых концентраторов напряжений на стенках скважины с плоской или вогнутой формой поверхности забоя наиболее эффективным по интегральному критерию функции полезности ($U=0,910$) является вариант, при котором происходит образование четырехугольного поперечного сечения скважины без притупления углов сопряжения ее стенок ($b=0$) трехшарошечным буровым инструментом, шарошки которого имеют наибольшее для такого поперечного сечения значение угла конусности ($\alpha=60^0$), при котором реализуется плоская или вогнутая форма поверхности забоя скважины, а относительный размах нормированных значений крутящего момента ($M'_o=0,0202$) получен при максимальном из рассмотренных значениях угла наклона секущих плоскостей к оси вращения шарошек, образующих калибрующие кромки шарошек ($\mu=80^0$).

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанные математические модели и схемные решения шарошечного инструмента для бурения некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений могут быть использованы в организациях, занимающихся исследованием и совершенствованием буровой техники, проектированием и разработкой бурового инструмента, образовательной деятельностью по направлению подготовки «Горное дело».

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач в работе произведен комплекс исследований, заключающийся в теоретическом обосновании параметров шарошечного бурового инструмента и апробации его экспериментального образца в промышленных условиях, при этом использованы следующие методы исследований:

- анализ литературных источников по теме исследования;
- методы математического моделирования при обосновании параметров шарошечного бурового инструмента;
- методы корреляционного анализа и выбора конкурирующих технических решений по интегральному критерию с использованием аддитивной функции полезности;
- пассивные методы экспериментальных исследований при определении работоспособности предложенного шарошечного бурового инструмента.

Научные положения, выносимые на защиту:

- основными конструктивными и кинематическими параметрами шарошечного бурового инструмента, которые определяют форму и параметры некруглого поперечного сечения скважины с угловыми концентраторами напряжений, являются количество одноконусных шарошек, углы их конусности, параметры расположения на них калибрующих кромок и передаточное отношение;
- силовые параметры шарошечного бурового инструмента определяются параметрами формы некруглого поперечного сечения скважины с угловыми концентраторами напряжений и отношением количества ее углов к количеству шарошек;

- обоснование конструктивных, кинематических и силовых параметров шарошечного инструмента для бурения некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений определяется с помощью функции полезности, частными критериями которой являются количество углов сопряжения стенок скважины, величина их притупления, угол конусности шарошек и относительный размах нормированных значений крутящего момента.

Личный вклад автора заключается:

- в получении зависимостей конструктивных и силовых параметров шарошечного бурового инструмента от формы и параметров некруглого поперечного сечения скважины с угловыми концентраторами напряжений;

- в обосновании параметров шарошечного инструмента, путем разработки критериев функции полезности и комплексной сравнительной оценки его эффективности для бурения некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений;

- в разработке схемных и конструктивных решений шарошечного инструмента для бурения некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений, создании экспериментального образца шарошечного инструмента и проведении его испытаний;

- в написании научных публикаций.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, обеспечиваются использованием хорошо проверенных в различных областях знаний методов корреляционного анализа и теории принятия решений с использованием аддитивной функции полезности, корректностью допущений при определении параметров шарошечного бурового инструмента и результатами его промышленной апробации.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Результаты работы были использованы при выполнении НИиОКР «Буровой инструмент нового поколения для получения скважин с некруглым поперечным сечением при ведении буровзрывных работ на горных предприятиях России» в рамках государственного контракта №054 от 01 июня 2012 года Федерального фонда содействия малых

форм предпринимательства в научно-технической сфере по программе УМНИК, а также при выполнении хоздоговорной научно-исследовательской работы с АО «СУЭК-Кузбасс».

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научно-практических конференциях: «Безопасность жизнедеятельности предприятий в угольных регионах» (Кемерово, 2000), «Динамика и прочность горных машин» (Новосибирск, 2003), «Влияние научно-технического прогресса на экономическое развитие Кузбасса» (Прокопьевск, 2007), «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности» (Кемерово, 2012), «Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов» (Новокузнецк, 2012), «Неделя горняка-2017» (Москва, 2017), «Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах» (Кемерово, 2017), «Четвертый международный горный симпозиум» (Кемерово, 2019), «Машиностроение и техносфера XXI века (Севастополь, 2020).

Публикации. По теме диссертации всего опубликовано 19 научных работ, в том числе 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК России, 4 патента РФ на изобретения и 1 патент РФ на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 177 страницах текста. Она состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы из 163 наименований, и содержит 63 рисунка, 25 таблиц и 1 приложение.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЗРЫВНЫХ СКВАЖИН НА ОТКРЫТЫХ РАЗРАБОТКАХ

1.1 Анализ влияния горно-геологических и горнотехнических условий на эффективность ведения буровзрывных работ

Основные объемы открытых разработок связаны с применением взрывного дробления для подготовки горных пород к выемке – проведением буровзрывных работ. Ведение буровзрывных работ на открытых разработках характеризуется возрастающими объемами и усложняющимися горно-геологическими условиями. Объем добычи угля в России открытым способом в 2019 г. составил 334,1 млн т [1], что составляет 75,7 % от общего объема добываемого угля. Объемы добычи сырой железной руды в 2016 г. составили 298 млн т и имеется тенденция их сохранения, при этом открытым способом добывается около 93 % железной руды [2].

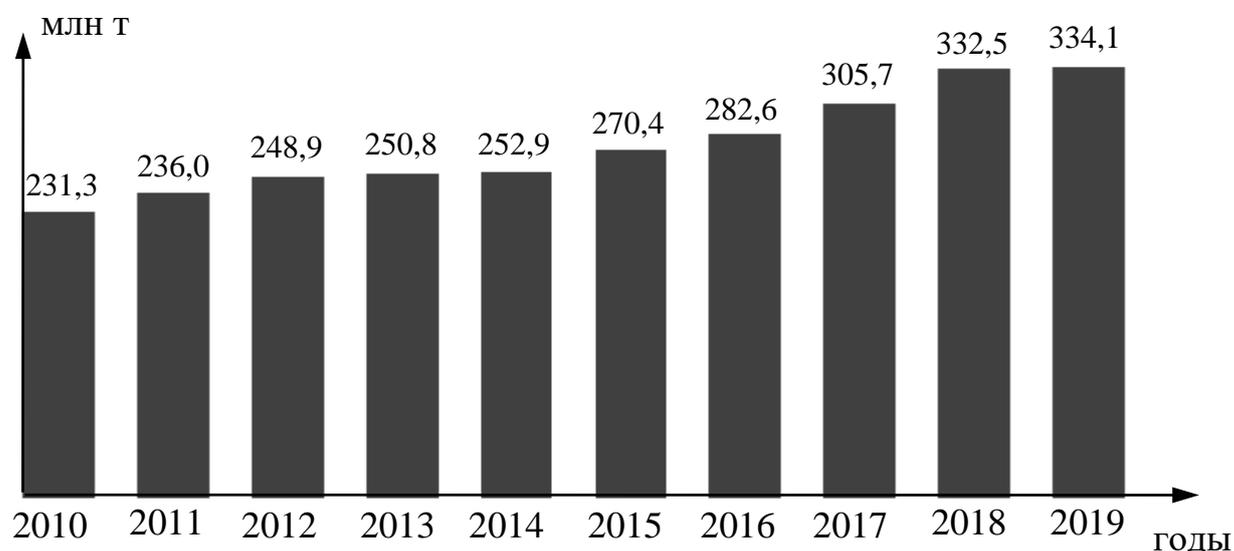


Рисунок 1.1 – Добыча угля открытым способом в России за 10 лет [1]

В настоящее время доля затрат на буровзрывные работы (рисунок 1.2) в себестоимости добычи полезного ископаемого открытым способом составляет порядка 25 % [3], при этом затраты на бурение взрывных скважин составляют 30–50 % от суммарных затрат на буровзрывные работы [4].



Рисунок 1.2 – Структура основных затрат предприятия, ведущего открытые горные работы [3]

В связи с увеличением объемов добычи полезных ископаемых растут как объемы бурения, так и объемы используемых взрывчатых веществ, например, на угольных разрезах Кузбасса в 2019 г. использовано 809,6 млн т взрывчатых веществ [5].

Альтернативные способы подготовки горных пород к выемке, основанные на механическом, физико-химическом и комбинированном способах разрушения [6–8], способны эффективно разрабатывать только сравнительно слабые породы (прочностью до 60–80 МПа). Поэтому взрывная подготовка горных пород к выемке требует дальнейшего развития.

Горно-геологические условия ведения открытых горных работ, определяющие условия ведения буровзрывных работ, характеризуются тем, что покрывающие породы в подавляющем большинстве представлены мягкими и плотными суглинками, глинами и реже песками, а также плотными и полускальными аргиллитами, алевролитами и реже песчаниками, прочность которых с глубиной резко увеличивается и достигает прочности скальных пород (рисунок 1.3).

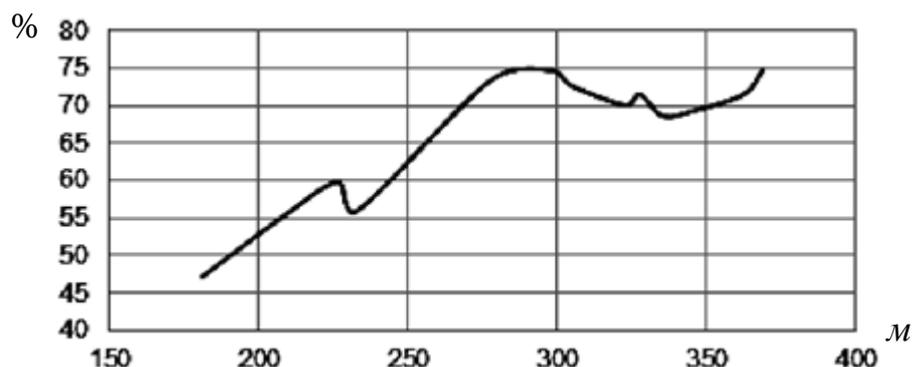


Рисунок 1.3 – Доля скальных горных пород в общем объеме разрабатываемой горной массы железорудных карьеров в России [9]

Глубина ведения открытых горных работ изменяется от нескольких десятков до нескольких сот метров, при этом наблюдается рост глубины открытых горных работ (рисунок 1.4).

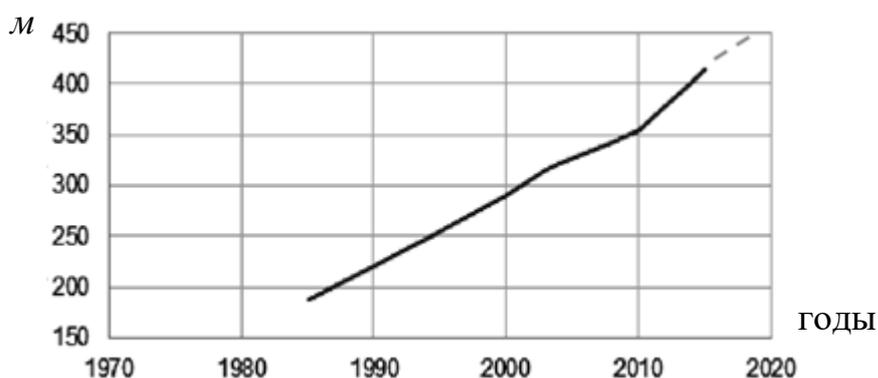


Рисунок 1.4 – Изменение средневзвешенной глубины железорудных карьеров в России [9]

Полускальные и скальные породы имеют различные степень трещиноватости (таблица 1.1) и коэффициенты крепости f по шкале М. М. Протодяконова, в результате чего изменяется их взрываемость и удельный расход взрывчатых веществ. Согласно исследованиям [10] при разработке железорудных месторождений с увеличением глубины на каждые 100 м крепость f горных пород увеличивается в среднем на 0,4–0,6 ед. по шкале М. М. Протодяконова. При этом увеличение глубины горных работ на каждые 50 м приводит к увеличению естественной блочности пород в среднем на 0,26 м, что приводит к уменьшению выхода горной массы с 1 м скважин и увеличению негабаритных фракций (рисунок 1.5).

По данным [11] увеличение глубины горных работ на каждые 100 м приводит к увеличению затрат на подготовку горной массы к выемке на 10–12 %.

Таблица 1.1 – Классификация горных пород по трещиноватости [12]

Категория трещиноватости	Степень трещиноватости (по блочности массива)	Удельная трещиноватость, м^{-1}	Средний диаметр отдельных, м
I	Чрезвычайно трещиноватые (мелкоблочные)	Более 10	До 0,1
II	Сильнотрещиноватые (среднеблочные)	2–10	0,1–0,5
III	Среднетрещиноватые (крупноблочные)	1–2	0,5–1,0
IV	Мелкотрещиноватые (весьма крупноблочные)	1–0,65	1–1,5
V	Практически монолитные (исключительно крупноблочные)	Менее 0,65	Свыше 1,5

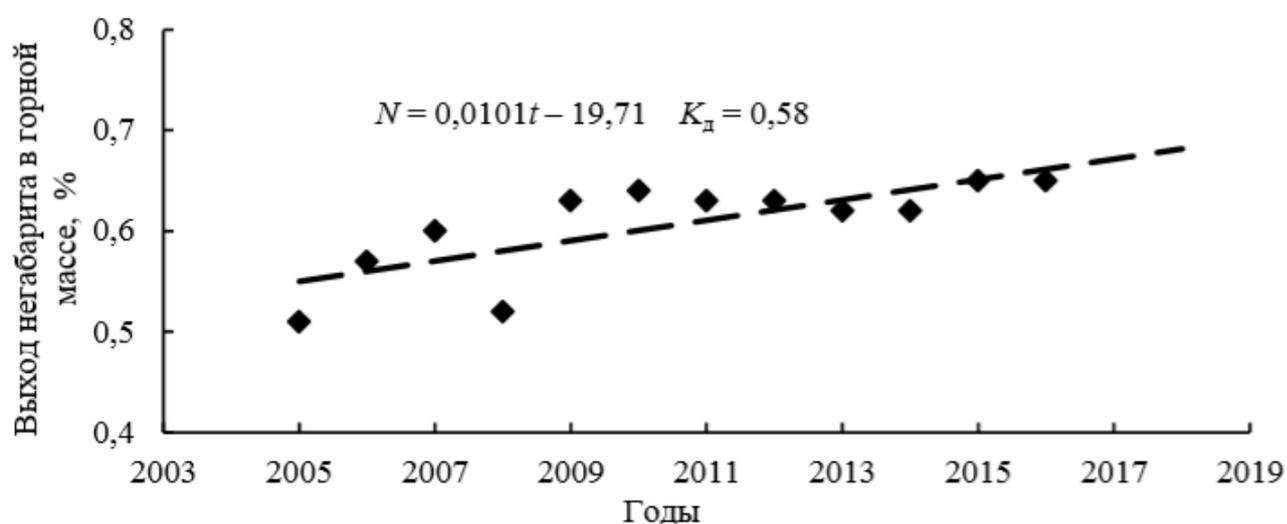


Рисунок 1.5 – Изменение выхода негабаритных фракций на железорудных месторождениях [11]

Например, согласно анализу показателей ОАО «Ураласбест» [11] рост глубины ведения горных работ с 200 до 350 м приводит к увеличению удельного расхода взрывчатых веществ в 2,23 раза и к снижению выхода горной массы с 1 м

взрывных скважин в 1,43 раза.

С углублением горных работ и связанным с ним ростом удельного расхода взрывчатых веществ возникает ряд негативных сложностей, ухудшающих условия эксплуатации карьеров. Одной из наиболее серьезных являются оползни и обрушения бортов карьеров, которые составляют 5,4 % от общего числа аварий, при этом их последствия являются существенными с большим материальным ущербом. Анализ известных аварий [13] показывает, что одной из основных проблем глубоких карьеров является правильное определение параметров их отработки путем приведения бортов в устойчивое положение. Для обеспечения длительной устойчивости бортов необходимы специальные технологии формирования уступов, в которых большую роль играют параметры контурных и технологических взрывов [14].

Отличительной особенностью условий ведения буровзрывных работ является перемежаемость пород по литотипам, изменчивость свойств пород по глубине и простирацию в пределах взрываемого блока. Сложно-структурное строение взрываемых блоков создает дополнительные трудности для обеспечения качественной подготовки забоев, определяет схему забуривания уступов, параметры и конструкцию зарядов [15].

Разработка основных объемов вскрышных пород и полезного ископаемого на открытых горных работах производится по транспортным схемам с применением железнодорожного, автомобильного и, в небольшом объеме, конвейерного транспорта. При транспортных схемах отработки месторождения высота ширина развала имеет большое значение. Так при железнодорожном транспорте необходимо, чтобы взорванная масса была равномерно разложена по фронту взрываемого уступа, что необходимо для уменьшения объемов путеукладочных работ и повышения коэффициента использования экскаваторов и транспорта во времени. Наряду с обеспечением необходимых размеров ширины и высоты развала для высокопроизводительной и безопасной работы экскаваторов и транспорта, необходимо, чтобы горная масса была хорошо разрыхлена. Основные результаты в этой области получены Беляковым Ю. И. [16] и Бирюковым А. В. со статистической

обработкой данных [17]. Согласно этим исследованиям с увеличением коэффициента разрыхления в развале увеличивается коэффициент наполнения ковша экскаватора при равной кусковатости и объемном весе горной породы, сокращается длительность черпания экскаватора, так как в нижней части уступа, происходит большее обрушение верхней и средней части развала. С уменьшением коэффициента разрыхления до 1,05–1,10 копание связанных крупнокусковых пород механическими лопатами происходит в режиме, близком к стопорному, снижается величина внедрения ковша в забой. Согласно статистическим данным, представленным в [17], существует устойчивое повышение сменной производительности автосамосвалов, железнодорожного и конвейерного транспорта при уменьшении среднего размера куска взорванной массы. Однако, с увеличением степени дробления и коэффициента разрыхления горной массы увеличиваются затраты на буровзрывные работы. Поэтому оптимальное качество подготовки горной массы важно определять с учетом общих затрат на буровзрывные работы.

На основе работы [18] можно сформулировать общие требования к буровзрывным работам в условиях отработки месторождений открытым способом, решение которых составляет проблему оптимизации буровзрывных работ:

- заданная степень дробления горных пород взрывом для последующих производственных процессов;
- требуемое качество и сортность взорванного полезного ископаемого, достижение в необходимых случаях избирательного дробления пород различной трудности разрушения;
- кучность развала взорванных пород, достижение заданных его размеров и формы, удобной для выемочно-погрузочных работ;
- необходимая дальность и направление перемещения пород, особенно при сбросе в выработанное пространство;
- минимальное сейсмическое воздействие взрыва и максимальная сохранность окружающих сооружений и породного массива вблизи конечных контуров карьера, для соблюдения заданного угла погашения борта карьера;
- высокая производительность, экономичность и безопасность горных работ;

- минимальное загрязнение атмосферы карьера и окружающей среды токсичными продуктами взрывов и пылью.

Известно, что с увеличением крепости пород f от 6 до 18 затраты на бурение растут быстрее (приблизительно в 10 раз), чем на взрывание (приблизительно в два раза) [19]. Поэтому выход горной массы с 1 м скважины является показателем, от которого зависят еще и затраты на бурение. В крепких породах имеет приоритет снижение себестоимости буровых работ. Это может быть достигнуто путем уменьшения сетки скважин с увеличением их диаметра, так как себестоимость обустройства скважинами меньшего диаметра значительно выше. Согласно результатам исследований [19], на станках шарошечного бурения при уменьшении площади буримого сечения на 28% энергозатраты на бурение одного метра скважины, величина которых по тем же исследованиям оказывает прямое влияние на стойкость долота, остаются практически одинаковыми. Но такой способ не всегда является приемлемым с точки зрения рационального дробления, особенно в мелкоблочных породах. Другим способом, позволяющим сократить расходы на буровые работы, может быть замена простейших взрывчатых веществ на более мощные с высокой концентрацией энергии. При этом дробление горной породы взрывом с высокой концентрацией энергии связано с переизмельчением породы вблизи заряда и увеличением выбросов пыли [20]. Кроме недостатков, связанных с повышением переизмельчающего действия взрыва в ближней зоне, в этом случае следует также учитывать, что простейшие взрывчатые вещества являются более дешевыми, безопасными и экологически чистыми.

Буровзрывные работы являются основными источниками вредных выбросов на открытых горных работах, в результате которых выделяется до 40 % общей массы загрязняющих веществ, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду [5, 21]. В ближней от заряда взрывчатого вещества зоне образуется переизмельченная горная порода, которая выносится из скважины в виде пылевого облака. Пылевое облако при массовом взрыве выбрасывается на высоту 150–300 м, может достигать 16 км и распространяться по направлению ветра на значительные расстояния (10–14 км) [22]. Образование ядовитых газов (таблица 1.2)

неразрывно связано с составом и количеством применяемых взрывчатых веществ. При детонации взрывчатых веществ выделяются ядовитые газы (100–300 л/кг), со стабильным ежегодным приростом порядка 10–20 %, а неполная реакция взрывчатого превращения загрязняют воздух и подземные воды окислами азота, углерода и нитросоединениями [5, 23]. По этим данным только в 1990 году за счет добычных работ на угольных предприятиях Кузбасса в атмосферу было выброшено окислов углерода 17901,3 тыс. м³ и окислов азота 1696,8 тыс. м³. С увеличением глубины открытых горных работ проблема загрязнения воздуха стоит наиболее остро и горные работы, особенно с автомобильным транспортом, вынуждены много времени простаивать из-за загазованности атмосферы. При этом концентрация оксида углерода достигает 13–24 мг/м³, а по данным метеорологических наблюдений периоды недостаточного естественного воздухообмена составляют в среднем 10–12 % рабочего времени и по этой причине простои горно-транспортного оборудования достигают 450–500 ч/год [24].

Таблица 1.2 – Результаты полигонных испытаний по определению количества газообразных продуктов при взрыве промышленных взрывчатых веществ [25]

Взрывчатые вещества	Количество продуктов, л/кг				
	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂	NO _x
Гранулотолы	162,9	125,9	16,4	58,1	0,126
Граммонит 30/70	168,4	148,6	17,5	58,6	0,120
Граммонит 79/21	160,0	79,2	10,5	28,5	0,792
Аммонит 6ЖВ	68,2	69,0	1,6	11,0	0,127
Игданит	18,3	44,6	8,75	5,15	0,40

В настоящее время в условиях увеличения глубины ведения горных работ и прочности горных пород необходимо повышение эффективности действия взрыва, которое связано с уменьшением расхода взрывчатых веществ и объемов бурения, что может быть достигнуто управлением энергией взрыва (рисунок 1.6).

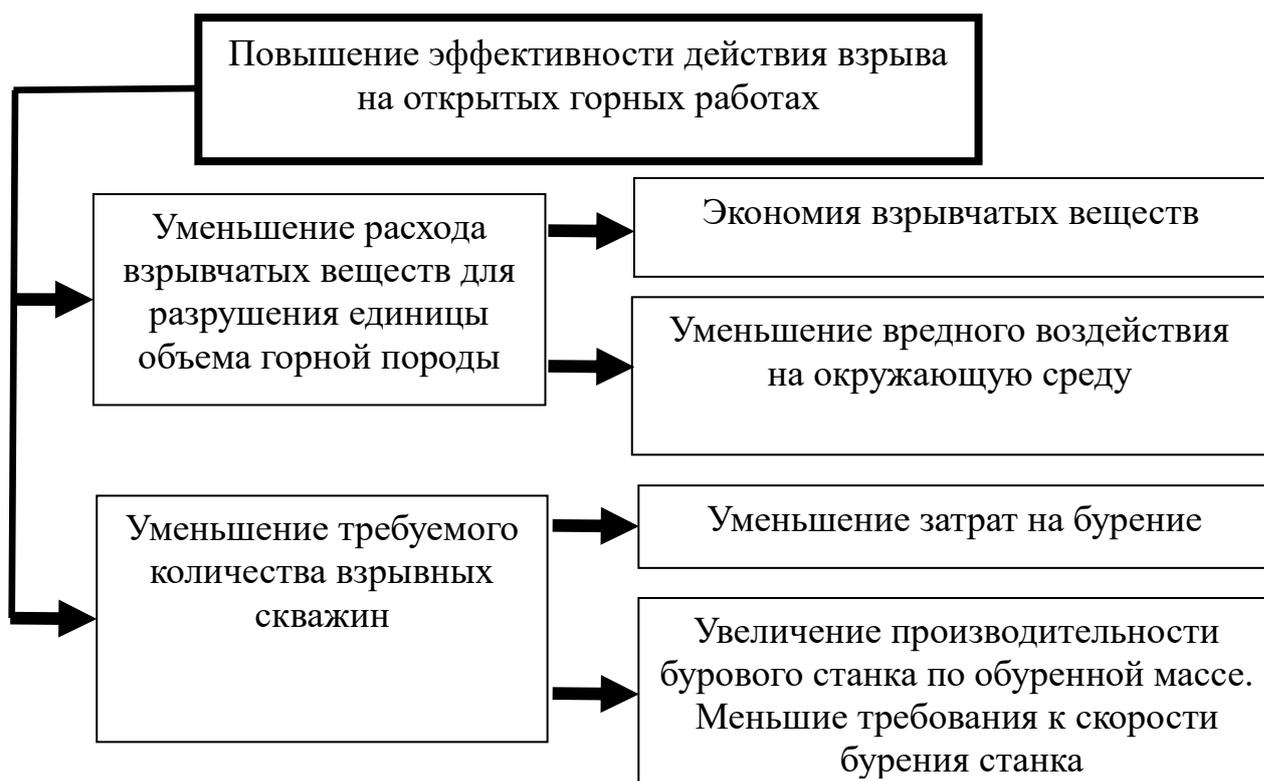


Рисунок 1.6 – Показатели буровзрывных работ, зависящие от эффективности действия взрыва

Поэтому учитывая, что с увеличением глубины разработки и с соответствующим увеличением блочности для качественного дробления необходимо увеличение расхода взрывчатых веществ, уменьшение удельного расхода взрывчатых веществ становится важным не только с точки зрения эффективности буровзрывных работ, но и экологической.

1.2 Характеристика известных решений по управлению энергией взрыва при дроблении горных пород

По значимости методы управления энергией взрыва можно классифицировать следующим образом (рисунок 1.7). Первую группу составляют способы изменения главных параметров ведения взрывных работ, характеризующие любое применение энергии взрыва и позволяющие достичь любую степень дробления. Сюда отнесены общее количество подводимой энергии и ее пространственное распределение. Эти параметры определяются диаметром взрывааемых скважин,

сеткой скважин, плотностью заряжения взрывчатых веществ, коэффициентом заполнения скважины (отношением длины заряда к глубине скважины).



Рисунок 1.7 – Классификация методов управления энергией взрыва

Вторая группа характеризует параметры взрывного импульса, основанные на волновых свойствах действия и распространения энергии взрыва. Это время протекания процесса взрыва, амплитуда ударной и детонационной волны, временные интервалы воздействия на массив. Регулирование параметров импульса взрыва происходит посредством подбора типа взрывчатых веществ, схем короткозамедленного взрывания и интервалов замедления, конструкции заряда, схемы инициирования. Методы третьей группы позволяют регулировать качество подготовки пород на основе изменения параметров взрывного блока, условий взрыва и формы заряда. В качестве технических мероприятий в этой группе можно назвать

изменение количества рядов скважин, взрывания с подпорной стенкой и в зажиме, сближенное и парносближенное расположение скважин, изменение формы заряда (применение скважин переменного сечения по высоте, применение некруглой формы поперечного сечения и т.д.).

Если заданную степень дробления горных пород можно достичь применением лишь первой группы методов регулирования энергией взрыва, то повышение эффективности действия взрыва достигается комплексным применением всех методов регулирования энергией взрыва.

Согласно исследованиям [26–28] взрываемый объем породы представляют двумя зонами – регулируемого и нерегулируемого дробления. В первой из них (пространство между взрывными скважинами по высоте колонки взрывчатого вещества) путем изменения удельного расхода взрывчатых веществ может быть достигнуто любое качество дробления. В зоне нерегулируемого дробления (массив со стороны откоса уступа и верхней его площадки на глубину размещения забойки) взрыв почти не оказывает на массив непосредственного дробящего воздействия.

Следовательно, существует граница крупности дробления, преодолеть которую за счет изменения удельного расхода взрывчатых веществ не является возможным. Причем эффективность действия взрыва существенно зависит от трещиноватости массива, поэтому увеличение удельного расхода взрывчатых веществ не сопровождается пропорциональным повышением степени дробления пород.

Поскольку величина линии наименьшего сопротивления имеет определенную в конкретных условиях кратность диаметру скважины, обусловленную в первую очередь соотношением между энергоемкостью разрушения и удельной энергией взрывчатых веществ, главные параметры буровзрывных работ, наряду с удельным расходом взрывчатых веществ, можно выразить через диаметр заряда [29], который влияет на качество подготовки горных пород. Согласно [28] разрушение горных пород под действием взрыва реализуется в основном их объеме по системе естественных микро- и макротрещин, определяющих техническое сопротивление среды разрушению, которое с повышением скорости нагружения

массива возрастает. Следовательно, влияние диаметра скважин на качество дробления необходимо связывать со свойствами пород, а окончательный выбор диаметра скважин должен осуществляться с учетом эффекта по всем технологическим процессам.

Анализ методов регулирования второй и третьей групп показал, что основной их задачей является создание направленного действия взрыва, которое необходимо на достижение не только требуемого качества дробления, но и создания заданной направленности развала, производства отрезных щелей, ограничения разрушений контурной зоной. Здесь выделены методы, которые основаны на следующем:

- эффект взаимодействия зарядов;
- предварительное изменение параметров взрывного блока;
- изменение параметров единичных зарядов.

Эффект взаимодействия зарядов используется при применении способов короткозамедленного взрывания. При этом, наиболее часто применяются такие схемы инициирования как клиновидные, трапециевидные и диагональные. Направленное воздействие на массив в этом случае заключается в создании эффекта соударения кусков с последующим их дроблением, а также в обеспечении заданной кучности развала.

Следует отметить большую роль естественной трещиноватости в механизме взрывного дробления горных пород [30, 31]. Влияние трещин на дробление горных пород взрывом имеет практическое использование при предварительном изменении параметров взрывного блока путем применения контурного взрывания, которое позволяет осуществлять направленные действия взрыва для оконтуривания выработок, при котором происходит предварительное образование трещин, отделяющих боковые породы от разрушенного массива [32]. Однако применение способов предварительного щелеобразования сопряжено со значительным увеличением объема бурения. Поэтому перспективными являются способы создания направленной трещиноватости при помощи изменения параметров единичных зарядов.

Имеются теоретические и экспериментальные исследования процесса зарождения и развития радиальных трещин удлиненных зарядов взрывчатых веществ [33–38], в которых установлено, что разрушение горной породы происходит в зонах смятия и трещинообразования, причем управление параметрами зоны трещинообразования играет важную роль в процессе дробления массива. Согласно экспериментальным исследованиям на образцах гранита [39], под действием создаваемых взрывом напряжений в горной породе происходит образование множества первичных трещин, причем «первичные трещины представляют своеобразные каналы для проникновения газа и реализации механизма внутреннего давления, при котором в первичных трещинах создаются достаточные напряжения для их дальнейшего развития».

Как известно, развитие трещин происходит, во многом, благодаря созданию растягивающих напряжений в окружающем скважину массиве. При этом возможны следующие варианты получения концентраторов напряжений [40]:

- с помощью кумулятивного действия продуктов детонации или концентрации ударных волн при использовании зарядов взрывчатых веществ специальных конструкций;
- путем воздействия детонационных волн на стенки скважины в местах касания их зарядов взрывчатых веществ;
- посредством передачи взрывной нагрузки на стенки скважины через промежуточные элементы с высокой акустической жесткостью.

Известны результаты теоретических и экспериментальных исследования [41] разрушения взрывом шпурового заряда (рисунок 1.8) с продольной кумулятивной полостью 1. При взрывании такого заряда поток энергии концентрируется и уплотняется в фокусе 2, производя здесь максимальное пробивное и дробящее действие. В результате взрыва таких зарядов разрушение между шпурами происходит более интенсивно, а воронка взрыва имеет значительно меньший угол раствора. Особенно это заметно при взрыве на малую открытую поверхность, в таких случаях форма разрушения имеет форму прорези [42].

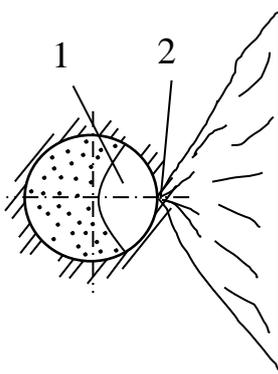


Рисунок 1.8 – Развитие полости выброса при взрыве заряда с продольной кумулятивной выемкой

Известны способы создания направленной трещиноватости, основанные на предварительном (до взрыва) ослаблении контурной зоны скважины путем создания в ней концентраторов напряжений, которые, согласно классификации предложенной в [40], отнесены к отдельному классу и предполагают внесение изменений в технологию бурения (рисунок 1.9).

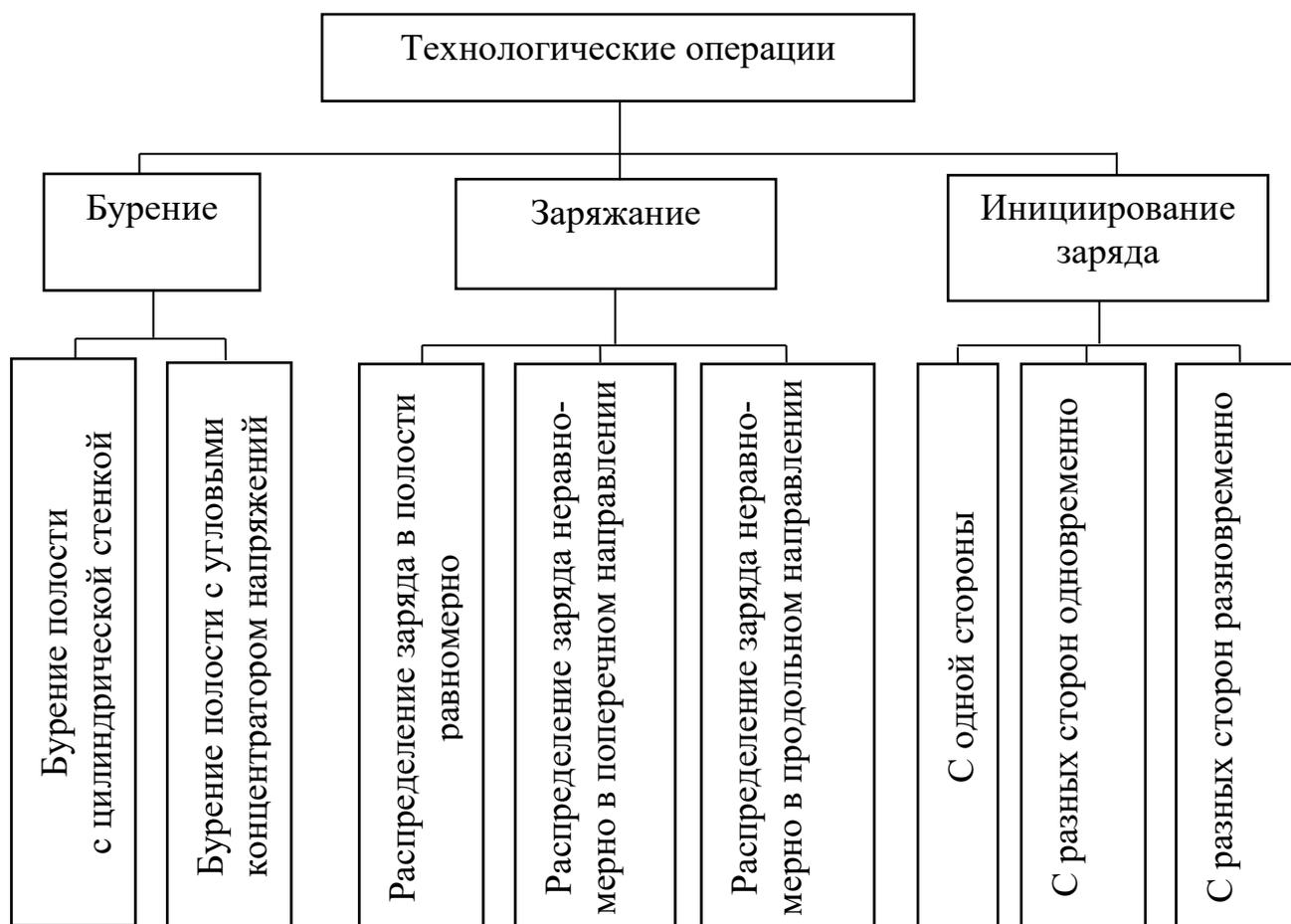


Рисунок 1.9 – Варианты выполнения технологических операций буровзрывных работ

Известны промышленные испытания по использованию щелевидных (плоских) взрывных скважин, полученных с использованием технологии огневого бурения [43], которые выполняются путем расширения цилиндрических скважин горелками-расширителями без вращения термобура, бурением параллельно-сопряженных или параллельно-сближенных скважин. В таблице 1.3 приведены показатели экспериментального и контрольного взрывов, из которых видно, что изменение формы заряда позволили увеличить выход горной массы на 20 % при снижении на 20 % удельного расхода взрывчатых веществ.

Таблица 1.3 – Результаты промышленных испытаний зарядов с котловой полостью [43]

Показатель	Вариант взрыва	
	1	2
Количество скважин	100	32
Сетка скважин	квадратная	шахматная
Сечение котловой полости: форма	цилиндрическая	щелевидная
диаметр, мм	300	–
ширина щели, мм	–	220
длина щели, мм	–	430
Расстояние между рядами скважин, м	8	8,5
Расстояние между скважинами, м	8	9,5
Выход горной массы с 1 м скважин, м ³	53,8	67,5
Удельный расход взрывчатых веществ, кг/м ³	0,7	0,56
Выход негабарита, %	1,2	0,31

Кроме рассмотренных промышленных испытаний известны следующие результаты лабораторных исследований по взрыванию зарядов, расположенных в шпурах с некруглым поперечным сечением.

На блоках из оргстекла установлено, что длина максимальной трещины тем больше, чем больше соотношение полуосей сечения шпура в виде эллипса [42].

Известны результаты лабораторных исследований по взрыванию шпуров круглой, щелевидной, и прямоугольной формы поперечного сечения на песчанно-цементных образцах [44]. При этом установлено, что конструкция плоского заряда обеспечивает уменьшенный выход как мелких, так и негабаритных фракций. Выход этих фракций увеличивается при переходе на круглую форму шпура и уменьшается при переходе на прямоугольную (таблица 1.4).

Таблица 1.4 – Гранулометрический состав результата взрыва песчанно-цементных блоков по фракциям, % [44]

Форма заряда	Размер фракций, мм						
	0–3	3–10	10–15	15–30	30–70	70–120	120–160
круглая	5,9	11,8	3,3	4,4	12,9	28,2	33,5
прямоугольная	4,6	10,3	4,4	5,0	12,0	28,8	34,9
плоская	2,4	7,4	13,0	10,0	20,7	27,0	19,6

Лабораторными испытаниями на блоках из мрамора и мергелевых блоков также показано, что при взрыве шпуров с нанесенной щелью на их стенке с заложением расчетного количества взрывчатых веществ происходит раскол только в плоскости заложения диаметральных щелей [45].

На моделях из органического стекла [46] установлено, что заряды с квадратной и треугольной формой поперечного сечения позволяют формировать поле напряжений с разным градиентом, что повышает эффективность разрушения материала за счет увеличения сдвиговых и растягивающих напряжений. Данные результаты получены в условиях одинаковых площади поперечного сечения зарядных полостей, расположения заряда и точек инициирования, типа и массы взрывчатого вещества (тэна). Имеются аналогичные результаты [47], полученные также на образцах из органического стекла (рисунок 1.10).

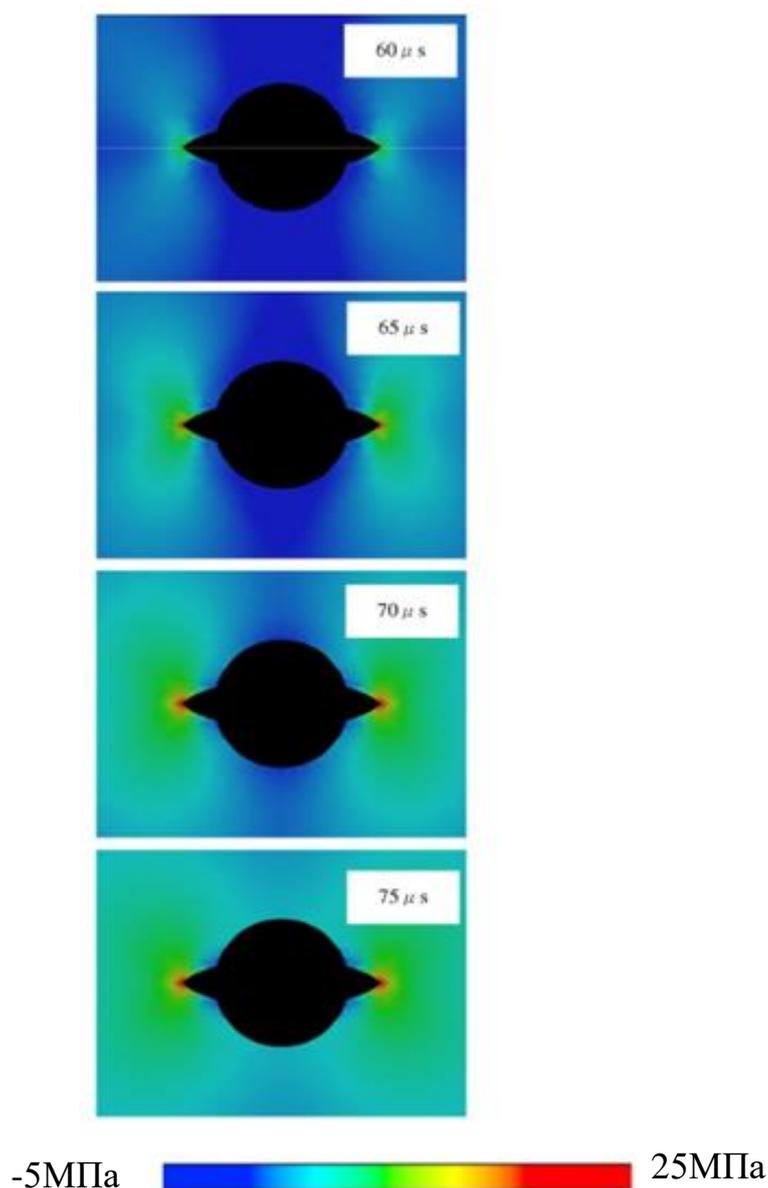


Рисунок 1.10 – Распределение главных напряжений вокруг отверстия на образцах из органического стекла, полученное в результате взрыва в разное время [47]

Известны результаты компьютерного моделирования методом конечных элементов с расчетом зоны неупругих деформаций материала, в которых для математического описания процесса его перехода в нарушенное состояние применено условие прочности Кулона-Мора, описывающее разрушение в результате сдвига и отрыва [46]. При этом определены зоны неупругих деформаций для квадратной, треугольной и круглой форм поперечного сечения взрывной полости в различные моменты времени, которые были нагружены детонационным давлением 1500–24000 МПа. Установлено, что зоны неупругих деформаций вокруг зарядов практически повторяют контур заряда со сглаженными углами,

со временем приобретая форму круга (рисунок 1.11), создавая предпосылки для формирования начальных направленных трещин.

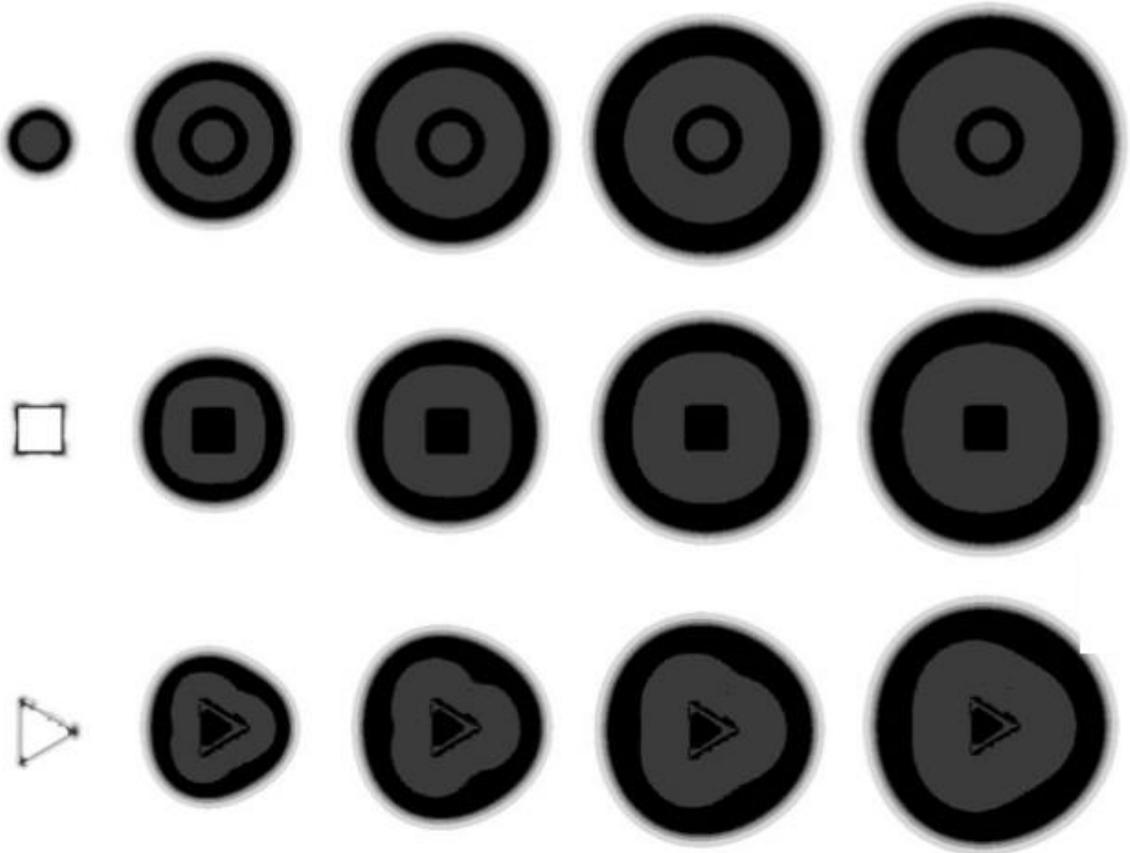


Рисунок 1.11 – Зоны неупругих деформаций для круглой, квадратной и треугольной форм поперечного сечения взрывной полости в различные моменты времени (время увеличивается слева – на право)[46]

Рассмотренные результаты исследований касаются формы взрывной полости, некруглое поперечное сечение которой должно иметь одинаковую ориентацию по длине продольной оси взрывной полости. Однако лабораторные и промышленные испытания [48] свидетельствуют о том, что переменное ориентирование поверхности заряда по отношению к направлению отбойки обеспечивает более равномерное дробление горной массы. На образцах песчанно-цементного состава установлено, что лучшее дробление происходит при взрывании зарядов взрывчатых веществ линейно-винтовой формы, причем при меньшем шаге винтовой линии, худшие результаты получены при линейно-сближенном расположении зарядов (таблица 1.5). А промышленные испытания в подземных условиях с применением линейно-винтового расположения двух скважин с шагом винта 8–10 м

и третьей по отношению к ним – параллельно-сближенной, показали, что при одинаковой сетке расположения скважин и одинаковом удельном расходе взрывчатых веществ на первичное дробление достигнуто уменьшение удельного расхода взрывчатых веществ на вторичное дробление для выпуска руды на 40–60 %. Положительное влияние линейно-винтовой формы зарядов на процесс дробления позволяет сделать предположение о положительном эффекте при применении взрывных скважин с винтовой формой концентраторов напряжений на стенках скважины с некруглым поперечным сечением.

Таблица 1.5 – Гранулометрический состав по фракциям, % [48]

Форма заряда (шаг винтовой линии)	Класс фракции, мм				
	0–1,25	2,5	5	10	20
Щелевая	4,4	11,6	13,8	14,0	56,2
Линейно-сближенная	4,8	14,0	16,6	13,4	51,8
Линейно-винтовая (50 мм)	2,5	13,8	13,5	8,7	61,5
Линейно-винтовая (25 мм)	3,3	11,0	12,1	12,9	60,6

Одним из приоритетных направлений по увеличению эффективности управления энергией взрыва является создание «направленной трещиноватости» в горном массиве. Создание «направленной трещиноватости» в настоящее время на практике связано с применением контурного взрывания, скважин некруглой формы, нанесением продольных щелей на стенках шпуров, при которых обеспечивается появление развития направленных трещин в горном массиве. Наиболее рационально для этих целей с точки зрения сокращения затрат на буровые работы и внесения минимальных изменений в технологические процессы буровзрывных работ является применение скважин с угловыми концентраторами напряжений.

Имеет перспективы комбинирование, приведенных на рисунке 1.9 вариантов выполнения технологических операций для создания направленной трещиноватости. Так, согласно лабораторным исследованиям, при асимметричном заложении детонирующего шнура в шпурах эллиптической или каплевидной формы происходит уменьшение минимального расстояния между шпурами

для получения направленного раскола горной породы [42].

Таким образом, анализ известных решений по управлению энергией взрыва показывает, что управление процессом трещинообразования может быть использовано для повышения эффективности дробления горных пород. При этом одним из способов совершенствования использования взрывных скважин для дробления горных пород, в котором происходит управление трещинообразования при взрыве, является использование взрывной полости с некруглым поперечным сечением, в том числе с образованием угловых концентраторов растягивающих напряжений, образованных на сопряжении стенок скважины. Практическое использование таких скважин может производиться в комплексе с другими методами повышения эффективности действия взрыва и сопряжено с необходимостью бурения таких скважин и поэтому должно рассматриваться в рамках процесса буровзрывных работ и связано с применением соответствующего бурового инструмента.

1.3 Современный уровень буровой техники и инструмента для образования взрывных скважин

На развитие техники для бурения взрывных скважин оказывает влияние необходимость получения высоких технико-экономических показателей (производительности, снижения затрат на обслуживание и эксплуатацию, повышение срока службы) в условиях ведения буровзрывных работ.

В связи с разнообразием горно-геологических и горнотехнических условий ведения горных работ на открытых горных работах требуется применение различных методов ведения взрывных работ, для которых востребованы станки для бурения как малого, так и большого диаметра.

Необходимость бурения скважин малого диаметра (80–150 мм) возрастает в связи с углублением карьеров, так как необходима заоткоска уступов, породы становятся крупноблочными и увеличивается опасность сейсмического действия взрыва, но, вместе с тем, прослеживается тенденция к росту диаметра буримых скважин [24]. Увеличение количества станков для бурения скважин больших

диаметров во многом связано с желанием повысить их производительность. Так, по данным фирмы "Vucyrus Erie" (США) при увеличении диаметра скважины от 187 до 381 мм скорость шарошечного бурения возрастает в 2–2,1 раза [49]. А опыт бурения скважин большого диаметра (311–320 мм) на разрезах Кузбасса показал, что производительность буровых станков в этом случае также увеличивается [50]. Тем не менее, даже при диаметре скважины 320 мм, работа бурового инструмента характеризуется стесненными условиями внутри скважины, которая имеет большую протяженность с преимущественно вертикальным расположением, и содержанием абразивной буровой мелочи.

В различных условиях ведения буровзрывных работ применяются шарошечные станки, вращательного режущими долотами и ударно-вращательного бурения, причем доля использования шарошечного бурения составляет 83% всего объема буровых работ [51]. Однако, бурение на открытых горных работах ударно-вращательным способом станками с погружными пневмоударниками, не нашедшими такого широкого применения, имеет ряд преимуществ, основные из которых следующие [52]:

- разрушение породы в процессе бурения производят ударным механизмом, не требующим большого давления на забой, вследствие чего момент, необходимый для вращения инструмента также незначителен, что позволяет иметь станки малой массы и бурить скважины с минимальными искривлениями;
- бурение производят сравнительно недорогим инструментом;
- станки просты по устройству и удобны в обслуживании.

В России пневмоударное бурение нашло более широкое применение для подземной добычей руды, однако и там отстает в своем развитии [53], не смотря на то, что в последние годы отечественная промышленность имеет попытки повысить технико-экономические показатели пневмоударного бурения [54].

Одним из основных технико-экономических показателей бурового станка является производительность, при этом чистое время бурения составляет значительную долю общего времени работы станка, особенно при уменьшении затрат времени на выполнение вспомогательных операций. При этом рейсовая скорость

бурения определяется типом исполнительного органа, диаметром скважины и свойствами буримой породы (ее крепостью). Тип исполнительного органа или способ бурения определяет способ реализации и количество используемой для разрушения горной породы мощности. При этом ожидаемую объемную скорость бурения в исследованиях предложено определять по зависимости [55]:

$$v = N / e, \text{ м}^3/\text{ч} \quad (1.1)$$

где N – удельная мощность, отражающая изменение режимных параметров процесса бурения, Вт;

e – удельная объемная энергоемкость бурения, характеризующая параметры вооружения долота и свойства буримой породы, Вт ч/м³.

Согласно зависимости (1.1), увеличение скорости бурения определяется возможностями увеличивать подводимую буровым станком мощность и уменьшения энергоемкости бурения при равном диаметре буримой скважины. Для того, чтобы оценить возможности реализовывать подводимую к буровому инструменту мощность известных способов бурения, которые предназначены для бурения скважин в разных диапазонах диаметров, в работе [56] предложено использовать в качестве показателя величину удельной мощности:

$$e_1 = N / S, \text{ Вт/м}^2 \quad (1.2)$$

где S – площадь буримого сечения, м².

При этом определено, что буровые станки ударно-вращательного действия обладают более низкими значениями удельной мощности e_1 , чем шарошечные (таблица 1.6).

Таблица 1.6 – Показатели буровых станков разных типов [56]

Показатели	Значения показателей при диаметре выработки*, мм						
	40	60	105	155	216	245	320
Мощность N , кВт	2-3	2-4	2-3	4	30	38	60
Удельная мощность e_1 , кВт/см ²	0,16	0,07	0,03	0,02	0,082	0,08	0,075

* диапазон диаметров 40–155 мм относится к ударно-вращательному (пневмоударному) бурению, а 216–320 мм – к шарошечному.

При увеличении их энерговооруженности следует учесть, что пневматическая энергия является более дорогой (в 10–15 раз), чем электрическая, используемая при вращательном бурении [56].

Учитывая, что в ближайшие годы доля крепких и крепчайших пород на крупных карьерах в вынимаемой горной массе превысит 75 % [57], необходимо искать возможности увеличения подводимой мощности N , что при любых способах механического бурения ограничено прочностью инструмента, который необходимо разместить в поперечном сечении скважины. Поэтому перспективны решения, направленные не только на увеличение подводимой мощности, но и на рациональное ее использование путем создания комбинированных исполнительных органов и конструктивных решений, направленных на совершенствование кинематической схемы разрушения забоя скважины.

По принципу действия следует отметить термо-шарошечный, ударно-шарошечный, режуще-шарошечный и ударно-режущий способы бурения. Известны попытки интенсификации шарошечного бурения путем увеличения удельной мощности за счет устройств, основанных на магнитострикционном эффекте, обеспечивающем дополнительное разрушение горной породы за счет вибрации долота. Такие долота показали повышение скорости бурения в 2–3 раза и возможность бурить скважины диаметром 490 мм станком СБШ 250 [58]. Их недостатком является то, что дополнительная вибрация увеличивает разрушение механических систем станка и инструмента.

При ударно-шарошечном бурении в качестве генератора ударных нагрузок можно использовать пневмоударник. При бурении станками БТС-150 или СБШ-160 в породах с $f = 7–8$ и выше достигнуто повышение скорости бурения в 1,5–1,8 раза. Поэтому появилась возможность уменьшить усилие подачи и тем самым повысить проходку на долото в 1,3–2,0 раза [59].

В ИГД им. А. А. Скочинского прошел испытания способ комбинированного СВЧ-механического бурения скважин, позволяющий повысить скорость бурения по крепким породам в 2–3 раза и снизить осевое усилие в 3–5 раз [60].

Создание и внедрение режущо-шарошечных долот является одним из приоритетных направлений повышения эффективности применения станков шарошечного бурения при сложном строении вскрышных уступов. Установлено, что в диапазоне значений коэффициента крепости $f=4-12$ скорость бурения комбинированными долотами в 1,5–2 раза выше, чем шарошечными, а энергоемкость процесса бурения ниже в 2–2,5 раза [61].

Имеются попытки объединить механический породоразрушающий инструмент с источником высокотемпературного воздействия, ослабляющего горную породу [62]. Результаты испытаний по комбинированию ударного и шарошечного воздействия с тепловым свидетельствуют о том, что при этом скорость бурения повышается в 2–3 раза. Однако для обеспечения требуемой стойкости механического инструмента необходимо вывести его из зоны высокой температуры, что обуславливает сложность конструкций таких исполнительных органов.

Немеханические способы бурения могут реализовывать наиболее высокие мощности, но с низким значением коэффициента полезного действия [56]. Особенностью термического бурения является увеличение эффективности процесса разрушения с возрастанием прочности горной породы, а также возможность получать при бурении скважину заданного профиля. Этот способ нашел применение для создания котловых расширений взрывных скважин. Широкого распространения термический способ не получил ввиду его высокой избирательности по бурым породам, в которых технико-экономические показатели являются приемлемыми для практического применения. Известен способ с использованием чередующихся взрывов, при котором скорость бурения находится на уровне шарошечного бурения, но энергоемкость разрушения взрывного способа в два раза выше, чем при вращательно-ударном способе.

Для новых (особенно немеханических) способов бурения требуется значительное время для их разработки и внедрения в производство. На примере внедрения в промышленность новых способов бурения от первых работ по их исследованию до начала освоения промышленностью затрачивается 11–12 лет [62]. Это требует также существенных материальных затрат. Например, фирма

"Бюсайрус-Ири" (США), которая, даже основываясь на существующих прототипах буровых станков 45-R и 55-R, произвела их перепроектировку (модель 49-R и 59-R) затратив на это 5 и 7 млн. дол. США, соответственно [63].

Таким образом, выделены следующие факторы, влияющие на развитие техники для бурения взрывных скважин:

1. Стесненные условия внутри скважины, большая протяженность и преимущественно вертикальное расположение скважины на открытых горных работах, агрессивное воздействие внешней среды, которые диктуют необходимость упрощения конструкции бурового инструмента.

2. Для бурения крепких пород доминирующее положение длительное время сохранит механическое бурение, при этом тенденция увеличения крепости горных пород на открытых горных работах ограничивает возможность использования режущего воздействия на горную породу.

3. Ограничение возможности реализации подводимой к буровому инструменту мощности прочностью и конструктивной схемой бурового инструмента при механических способах бурения.

4. Большие капитальные и временные затраты на разработку и внедрение принципиально новых способов бурения, поэтому исследовательские и конструкторские работы ведутся чаще всего с целью создания более эффективных и надежных конструкций буровых инструментов для уже известных способов бурения, которые можно применить на базе серийных буровых станков.

Шарошечный способ бурения получил повсеместное применение ввиду высокой производительности и относительно низких энергетических затрат на бурение, широкого диапазона эффективного применения по диаметру буримых скважин и крепости горных пород. Поэтому разработку современной конкурентоспособной техники бурения взрывных скважин высокого технического уровня склонны видеть [64, 65] в модернизации станков шарошечного бурения или замене шарошечного бурения комбинированным, что должно учитываться при создании инструмента для бурения скважин с некруглым поперечным сечением.

1.4 Подходы к конструированию буровых исполнительных органов для образования некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений механическим способом

Из-за сложных горно-геологических и горнотехнических условий ведения буровзрывных работ, таких как стесненные условия внутри скважины, большая протяженность и преимущественно вертикальное расположение скважины на открытых горных работах, агрессивное воздействие среды (обводненность, абразивность горной породы), технический уровень исполнительного органа тесно связан с количеством и свойством используемых кинематических пар механизма, узлы которого являются наиболее уязвимой его частью и должны передавать при этом необходимые разрушающие усилия. Поэтому, учитывая, что кинематическая схема исполнительного органа определяет возможность применения того или иного способа разрушающего воздействия, последнюю можно рассматривать как интегральный критерий, определяющий технический уровень исполнительного органа для бурения скважин.

Для рассмотрения конструкций бурового инструмента в данном аспекте построим функциональную модель механизма бурения.

При бурении скважины с некруглым поперечным сечением необходимо не только отделение и транспортирование горной массы с целью образования полости в массиве, но и получение поверхности с более сложной, отличной от поверхности вращения, формой. Поэтому бурение целесообразно рассматривать как процесс формообразования – возникновение поверхности во времени. Теоретическое изучение процесса формообразования наиболее основательно рассмотрено в металлообрабатывающей промышленности [66–68], согласно которому используется кинематический способ задания поверхности, основанный на перемещении линии, представляющей собой геометрическое место различных положений образующей линии. Закон перемещения в пространстве образующей задается неподвижными кривыми, которые называют направляющими линиями кинематически заданной поверхности.

В металлообрабатывающей промышленности инструмент и заготовка могут осуществлять множество вращательных и поступательных движений относительно общей системы координат. Применительно к исполнительным органам буровых станков количество движений ограничено, так как забой (поверхность разрушения) неподвижен в общей системе координат.

На основе выше изложенного ограничим решение задачи конструирования буровых исполнительных органов для образования некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений (с некруглым поперечным сечением) механическим способом следующими условиями:

- абстрагируемся от физических аспектов разрушения горных пород, связанных с взаимодействием разрушающих элементов инструмента с горной породой и рассматриваем этот вопрос лишь с чисто геометрической стороны;
- полагаем, что кинематическая характеристика инструмента известна или может быть легко определена и представляет собой траекторию движения фиксированной точки разрушающего инструмента относительно забоя;
- полагаем также, что известна форма инструмента и задано его положение относительно забоя.

Перемещение породоразрушающих элементов можно осуществить за счет изменения линейных размеров устройства и пространственного вращательного перемещения его выходного звена. Конструкция исполнительных органов должна удовлетворять следующим требованиям: разрушающий горную породу инструмент воспроизводит заданную кривую, соответствующую контуру скважины, исполнительный орган вписывается в сечение, оконтуренное заданной кривой, инструмент должен обеспечивать разрушение забоя по всей площади сечения скважины. При этом размеры поперечного сечения проводимой скважины являются одним из главных условий, определяющих направление моделирования исполнительного органа.

«Метод анализа с применением теории множеств и топологии позволяет представить элементарную форму поверхности в виде топологического произведения двух множеств элементов, где любой элемент каждого множества –

это элементарный геометрический образ, такой как точка, линия, поверхность, которые заданы как функции непрерывных параметров» [68]. Этот метод анализа поверхности хорошо согласуется с кинематическим способом задания поверхности [66], который основан на перемещении линии, являющейся геометрическим местом различных положений образующей линии. Закон перемещения в пространстве образующей линии задается неподвижными кривыми, которые называют направляющими линиями кинематической поверхности. Поэтому для любой поверхности можно выделить два семейства кривых линий: образующая и направляющая, составляющие каркас кинематической поверхности. При этом кинематические поверхности разделяются на четыре вида, так как могут быть образованы перемещением образующей линии переменной или постоянной формы, которая перемещается по направляющей линии также постоянной или переменной формы [66].

Согласно [66], в прямоугольной системе координат xuz дана направляющая – кривая, отображающая кинематику исполнительного органа L , отнесенная к натуральному параметру s . А в подвижной системе координат $x_1y_1z_1$, определяемой репером Френе к кривой L , дана другая кривая – образующая L_1 , представляющая собой режущую кромку инструмента или линию его контакта с поверхностью забоя. Таким образом, любую кинематическую поверхность можно получить с помощью направляющих (L) и образующих (L_1) линий (рисунок 1.12).

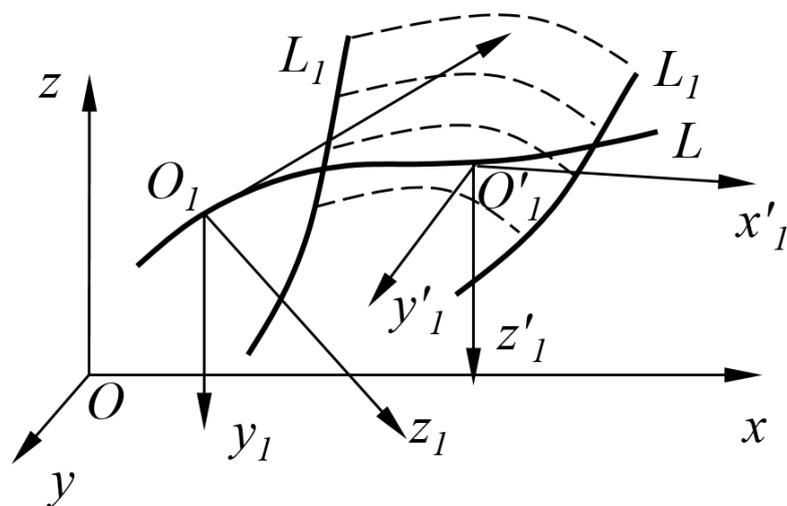


Рисунок 1.12 – Схема образования поверхности (забоя скважины)

Пусть кривая L задана уравнением:

$$L = F(s)i + \Phi(s)j + \Psi(s)k, \quad (1.3)$$

где s – натуральный параметр кривой;

i, j, k – единичные векторы осей Ox, Oy, Oz ;

$F(s), \Phi(s), \Psi(s)$ – уравнения кривой относительно осей Ox, Oy, Oz .

Матрицей преобразования подвижной системы координат будет:

$$\begin{pmatrix} F'(s) & \Phi'(s) & \Psi'(s) \\ \frac{F''(s)}{l(s)} & \frac{\Phi''(s)}{l(s)} & \frac{\Psi''(s)}{l(s)} \\ \frac{\nu}{l(s)} & \frac{\mu}{l(s)} & \frac{\rho}{l(s)} \end{pmatrix}, \quad (1.4)$$

$$\text{где } l(s) = \sqrt{[F''(s)]^2 + [\Phi''(s)]^2 + [\Psi''(s)]^2}; \quad (1.5)$$

$$\begin{cases} \nu = \Phi'(s)\Psi''(s) - \Psi'(s)\Phi''(s) \\ \mu = \Psi'(s)F''(s) - F'(s)\Psi''(s) \\ \rho = F'(s)\Phi''(s) - \Phi'(s)F''(s) \end{cases} \quad (1.6)$$

Тогда преобразование координат будет дано транспонированной матрицей преобразования [70]:

$$\begin{aligned} x &= F(s) + F'(s)x_1 + \frac{F''(s)}{l(s)}y_1 + \frac{\nu}{l(s)}z_1 \\ y &= \Phi(s) + \Phi'(s)x_1 + \frac{\Phi''(s)}{l(s)}y_1 + \frac{\mu}{l(s)}z_1 \\ z &= \Psi(s) + \Psi'(s)x_1 + \frac{\Psi''(s)}{l(s)}y_1 + \frac{\rho}{l(s)}z_1 \end{aligned} \quad (1.7)$$

Если задать кривую L_1 в подвижной системе координат уравнениями

$$\begin{cases} x_1 = f(\delta) \\ y_1 = \varphi(\delta) \\ z_1 = \psi(\delta) \end{cases} \quad (1.8)$$

и зная уравнения кривой L мы получим параметрические уравнения (1.7) поверхности забоя скважины.

Перемещения формообразующих (породоразрушающих) элементов можно осуществлять за счет изменения линейных размеров устройства, а также за счет

пространственного вращательного и поступательного перемещений. При этом размеры поперечного сечения полученной скважины являются одним из главных параметров, определяющих направление моделирования бурового инструмента. Особенно это касается малых размеров поперечного сечения скважины, при которых рационально применение устройств, не изменяющих свои линейные размеры в процессе бурения.

На основании кинематического способа задания поверхности предложено анализ конструкций инструмента и способов бурения производить с помощью функциональной модели бурового инструмента (рисунок 1.13), в основе которой имеется силовая цепь механизма бурения, состоящая из подачи исполнительного органа на забой, генерации направляющей и генерации образующей, где стрелками обозначены возможные места возникновения кинематических пар [69].

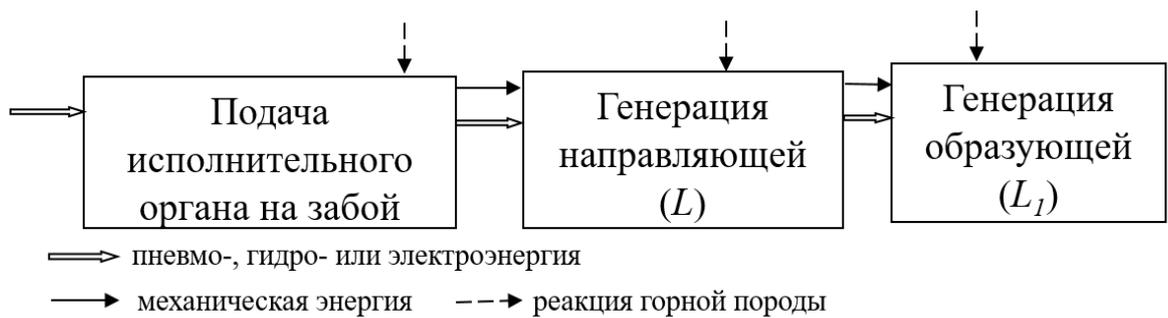


Рисунок 1.13 – Функциональная модель бурового инструмента

На основе этой функциональной модели сделан анализ способов бурения скважин в горной породе (таблица 1.7).

Выявлено, что для осуществления каждого вида (поступательного вращательного, поступательно-вращательного), характера (прерывного, непрерывного) и направления движения по образующей и направляющей исполнительный орган должен иметь отдельную кинематическую ветвь, т. е. совокупность устройств, сообщающих инструменту это движение. Применительно к буровому инструменту количество движений элементов системы ограничено забоем скважины, выполняющим в данном случае функцию заготовки и являющимся неподвижным в общей системе координат xuz (рисунок 1.12). Поступательное движение исполнительного органа на забой (подача) необходимо для работы любого бурового инструмента. В наиболее простых конструкциях бурового инструмента генерация

направляющей и образующей линий происходит либо только за счет вращения, либо только за счет подачи. Это связано с тем, что для осуществления каждого вида движения по образующей и направляющей линиям исполнительный орган имеет отдельную кинематическую ветвь.

Таблица 1.7 – Способы образования полостей в горной породе при бурении скважин

Способ образования полости	Способ генерации		Количество кинематических ветвей	Количество способов воздействия на горную породу
	направляющей	образующей		
вращательное бурение режущими долотами	непрерывно вращением	непрерывно вращением	1	1
вращательное бурение шарошечными долотами		непрерывно вращением (перекатыванием)	2	3
ударно-вращательное бурение		непрерывно вращательно и прерывно поступательно	2	2
ударно-поворотное бурение	прерывно вращением	прерывно поступательно	2	1
ударное бесповоротное бурение	единовременно	прерывно поступательно	1	1

Функциональная модель механизма бурения наглядно показала, что исполнительный орган будет иметь идеальную, в этом смысле, конструкцию при совмещении отдельных движений в одно, при этом возникает новая кинематическая ветвь, воспроизводящая суммарное движение. Такой принцип использован при бурении скважин круглого сечения. Например, при вращательном бурении функцию подачи и генерации направляющей выполняет вращательно-подающий механизм, расположенный вне скважины, а параметры движения при генерации образующей совпадает с параметрами движения, которые сообщаются вращательно-подающим механизмом. При бурении скважин с круглым поперечным сечением режущими долотами это полностью исключает необходимость размещения кинематических звеньев внутри скважины.

Для определения подходов к конструированию буровых исполнительных органов для образования некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений механическим способом проанализированы известные конструкции бурового инструмента на основе патентного поиска по российским изобретениям и полезным моделям (рисунок 1.14).

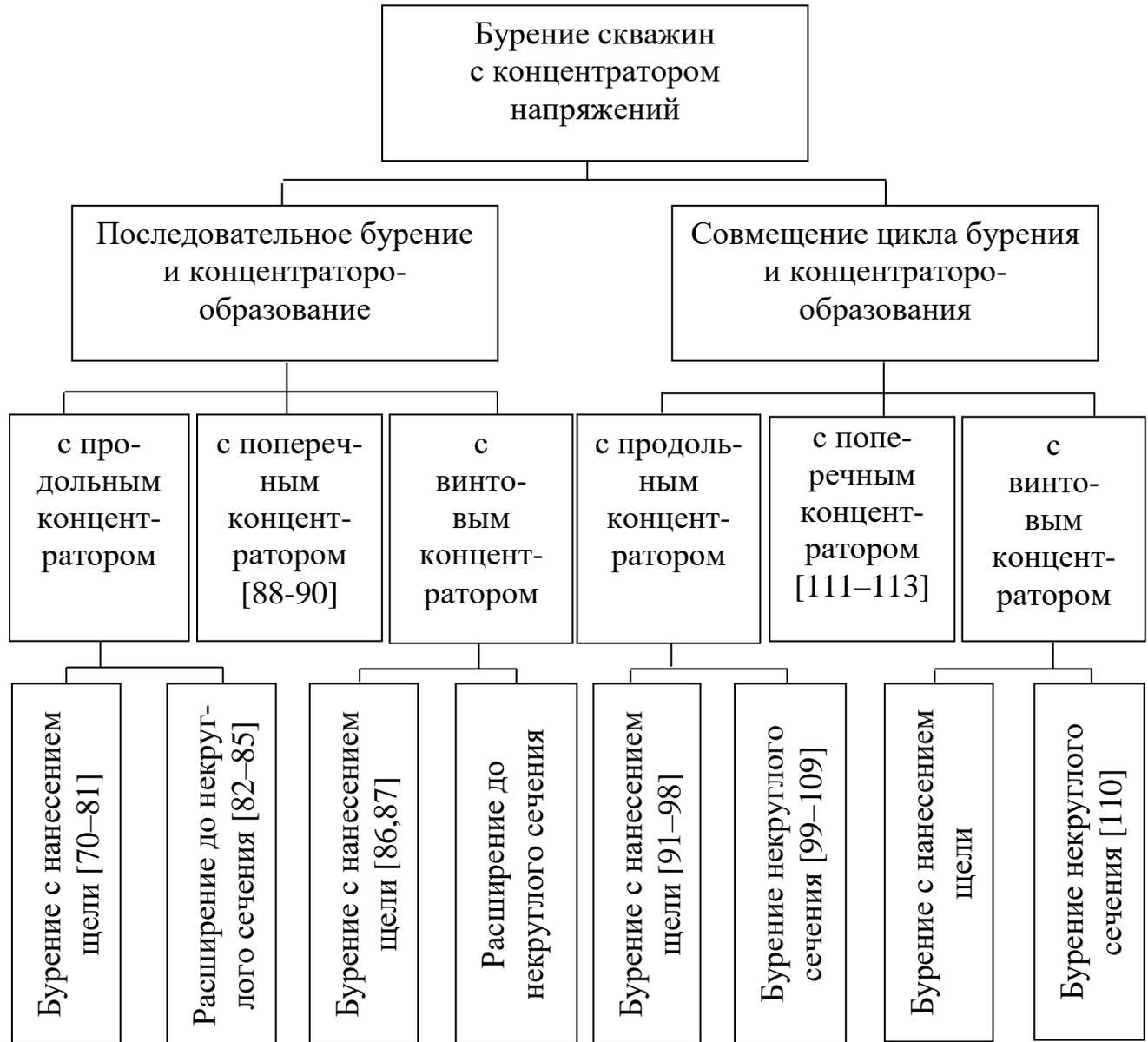


Рисунок 1.14 – Классификация способов получения некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений

Использование последовательного бурения и концентраторообразования, когда инструмент для образования концентраторов вводится в ранее пробуренную скважину [70-90], частично решает проблему стесненности пространства внутри скважины. При этом большинство устройств для расширения скважины

до некруглого сечения с образованием углов сопряжения их стенок представляют собой расположенные внутри скважины сложные многозвенные механизмы, которые в своем большинстве для образования кинематических связей имеют редуктор, например исполнительный орган для бурения скважин прямоугольного поперечного сечения для подготовки выемочного столба к отработке подземным способом (рисунок 1.15). Эти устройства изначально предназначены для бурения скважин технологического назначения в подземных условиях и непригодны для бурения взрывных скважин.

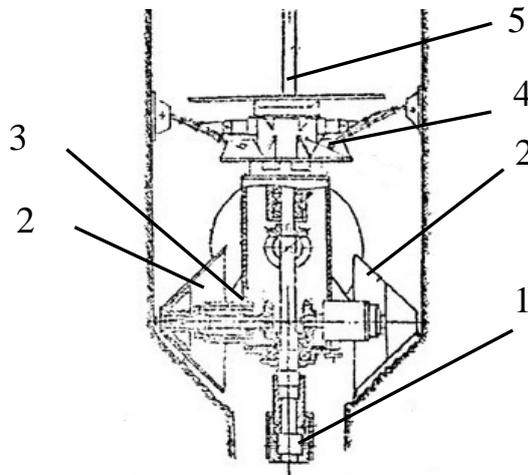


Рисунок 1.15 – Исполнительный орган для бурения скважин прямоугольного поперечного сечения [80]: 1 – приводной вал; 2 – разрушающие конуса, расположенные по углам скважины; 3 – раздаточный редуктор; 4 – опорный модуль; 5 – крепежный модуль

Большой практический интерес представляет другая ветвь технических решений с совмещением цикла бурения и концентраторообразования, когда отсутствуют затраты времени на спускоподъемные операции, связанные с образованием концентраторов напряжений специальным инструментом [91-113]. При этом получение некруглого поперечного сечения позволяет создавать более выраженные концентраторы напряжений, чем при бурении с нанесением щели, образование большой глубины которой является проблематичным. Поэтому далее технические решения, которые обеспечивают совмещение цикла бурения и концентраторообразования и получение некруглого поперечного сечения скважины, проанализированы на основе функциональной модели бурового инструмента, согласно рисунку 1.12.

При механических способах бурения вращение инструмента используется для генерации направляющей (L) и, наряду с подачей, является дополнительным способом передачи энергии на породоразрушающие элементы. Кроме этого, вращение инструмента способствует перемещению зоны разрушения по поверхности забоя, освобождая пространство для эффективного выноса буровой мелочи из призабойной зоны. При этом на промышленно применяемых буровых инструментах, не изменяющих в процессе работы свои линейные размеры, вращение приводит к образованию цилиндрической полости.

Для буровых инструментов без изменения линейных размеров при образовании некруглого профиля скважины требуется отсутствие вращения формирующих профиль породоразрушающих частей (конструкции 1 [114] и 2 [92] на рисунке 1.16), либо создание параллельно-сопряженных полостей (конструкция 5 [115], рисунке 1.16). Для бурового инструмента с изменяющимися линейными размерами получение некруглого поперечного сечения скважины требует наличия дополнительного кинематического звена [69, 116], например, конструкции 3 [93], 4 [117], 6 [99] на рисунке 1.16. Такое звено может быть представлено механизмом с переменной структурой, рабочий элемент которого может воспроизвести какую-либо заранее заданную кривую [118]. Примером такого звена служит пара «кулиса – ползун» в конструкции 4 на рисунке 1.16 или гидроцилиндр, который использован в конструкции 6 на рисунке 1.16. Исключением является шарошечный буровой инструмент (конструкция 7, рисунок 1.16), при котором кинематическим звеном, позволяющим изменять линейные размеры, является пара «шарошка-горная порода» [69]. Пара «тело качения - горная порода» в конструкции зубчато-дискового режущего долота [119] была использована для поочередного ввода в контакт с горной породой режущих элементов без изменения линейных размеров инструмента при бурении скважин с круглым поперечным сечением. В конструкции 7 [120–122] на рисунке 1.16 изменение линейных размеров и радиуса разрушаемого поперечного сечения скважины при вращении инструмента происходит за счет поочередного ввода в контакт с горной породой переменной длины линий, образующих конус шарошек при их перекачивании по забою вокруг оси скважины.

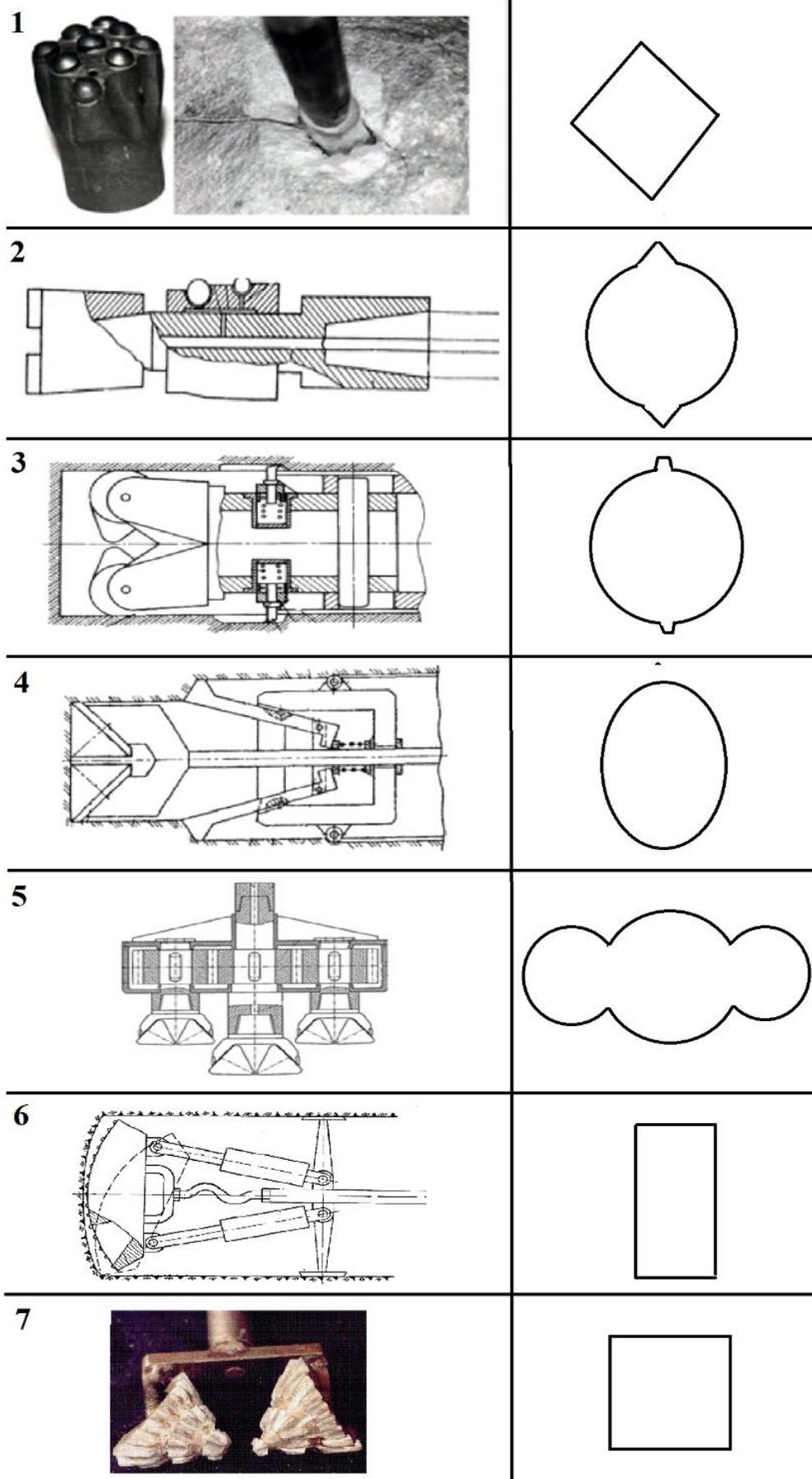


Рисунок 1.16 – Конструкции бурового инструмента и получаемые ими формы некруглого поперечного сечения скважины [116]

На основе анализа недостатков рассмотренных конструкций бурового инструмента (таблица 1.8) можно сделать вывод о том, что для бурения некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений на открытых горных работах наиболее рациональным является использование шарошечного бурового инструмента [121, 122], при котором происходит эффективная очистка призабойной зоны от буровой мелочи, имеется малое количество кинематических ветвей конструкции и большее количество способов разрушающего воздействия на горную породу: раздавливание, удар и скалывание.

Таблица 1.8 – Характеристики конструкций буровых инструментов, создающих некруглое поперечное сечение скважины, согласно рисунку 1.13

Вариант конструкции бурового инструмента (рисунок 1.13)	Количество кинематических ветвей	Способ воздействия на горную породу / вид рабочего движения	Недостатки
1	1	ударное / поступательное	Ограничен размер зоны разрушения, вследствие неэффективности ее очистки от буровой мелочи.
2	2	ударное / поступательное	
3	1	режущее / поступательное	
4	2	режущее / поступательно-вращательное	Наличие дополнительной пары трения, плохо защищаемой от окружающей среды. Изменение нагрузки на буровой инструмент в зависимости от угла его поворота в скважине.
5	3	ударное, раздавливающее, скалывающее / вращательное	Сложность конструкции вследствие наличия погружного редуктора.
6	3	раздавливающее / поступательно-вращательное	Сложность конструкции, вследствие использования погружных гидродвигателей.
7	2	ударное, раздавливающее, скалывающее / вращательное	Изменение нагрузки на буровой инструмент в зависимости от угла его поворота в скважине.

С помощью кинематического способа задания поверхности произведем анализ конструкции инструмента для получения некруглой скважины с угловыми концентраторами напряжений.

Для уменьшения количества кинематических связей в инструменте для получения некруглого поперечного сечения скважины может быть использован прием, охарактеризованный в [68]: "Необходимо произвести изъятие из станка некоторых направляющих комплексов, причем функции изъятых направляющих комплексов можно передать инструменту и заготовке". Такой прием может быть реализован при качении тела по поверхности на свободной оси. При этом поверхность образуется перемещением мгновенной оси вращения Ω , которая является ее образующей (рисунок 1.17). Таким образом, образующая должна сформировать поверхность тела, катящегося без скольжения по неподвижной поверхности. Если применить тело вращения, то ось вращения φ самого тела должна лежать между осями Ω и Oz и иметь с ними общую точку O , т. е. форма поверхности – круговой конус. Произведя вооружение конуса породоразрушающими элементами, получим известный шарошечный буровой инструмент.

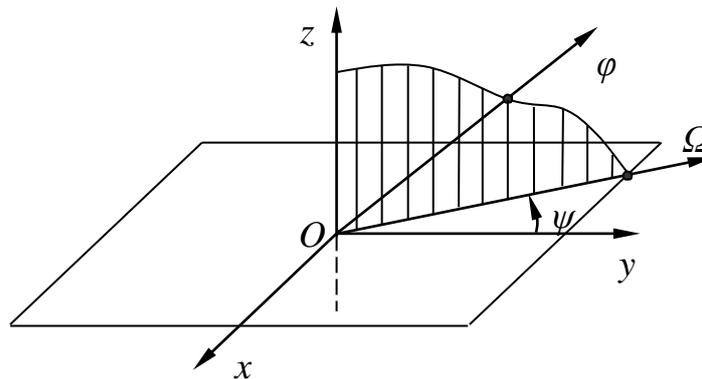


Рисунок 1.17 – Схема образования поверхности телом качения

Образующая конуса должна иметь переменную длину, соответствующую заданному радиусу поперечного сечения скважины или в полярной системе координат $\rho = f(\psi)$ (рисунок 1.18).

В этом случае уравнения (1.8) примут вид:

$$\begin{cases} x_I = \rho \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos\delta \\ y_I = \rho \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin\delta, \\ z_I = \rho \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \end{cases} \quad (1.9)$$

где δ – центральный угол в подвижной системе координат;

ρ – расстояние от центра вращения до точки на конусе шарошки;

α – угол конусности тела качения.

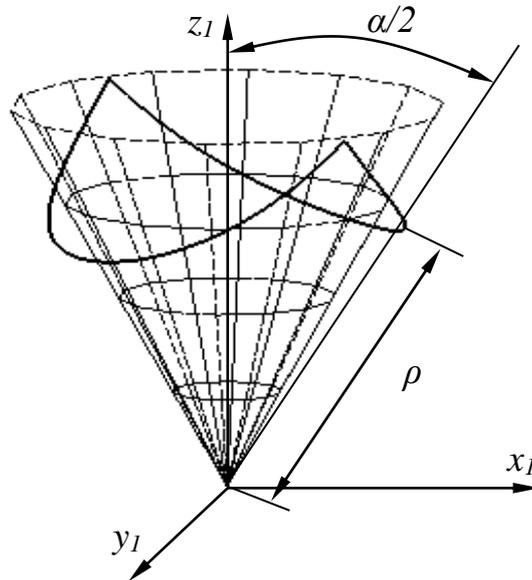


Рисунок 1.18 – Геометрическое место образующих в подвижной системе координат

В этом случае направляющая в этом случае характеризуется вращением образующей относительно всех осей неподвижной системы координат и определяется следующим образом.

Матрица преобразования координат (1.4) в общем случае имеет вид:

$$A \equiv \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}, \quad (1.10)$$

где a_{ij} – косинус угла между базисным вектором неподвижной системы координат и базисным вектором подвижной системы координат.

Вращение на угол ψ вокруг оси z:

$$A_1(\psi) \equiv \begin{pmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (1.11)$$

Вращение на угол θ вокруг оси y:

$$A_2(\theta) \equiv \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix}. \quad (1.12)$$

Вращение на угол φ вокруг оси x :

$$A_3(\varphi) \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix}. \quad (1.13)$$

Матрица преобразования координат (1.10), описывающая вращение в трехмерном евклидовом пространстве, может быть представлена в виде произведения [123]:

$$\begin{aligned} A^T(\psi, \theta, \varphi) &\equiv A(\psi)A(\theta)A(\varphi) \equiv \\ &\equiv \begin{bmatrix} [\sin\varphi\sin\psi + \cos\varphi\cos\psi\cos\theta] & [\cos\varphi\sin\psi - \sin\varphi\cos\psi\cos\theta] & \cos\psi\sin\theta \\ [\sin\varphi\cos\psi + \cos\varphi\sin\psi\cos\theta] & [-\cos\varphi\cos\psi - \sin\varphi\sin\psi\cos\theta] & \sin\psi\sin\theta \\ -\cos\varphi\sin\theta & \sin\varphi\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1.14)$$

С помощью формул (1.9–1.14), полученных с помощью кинематического способа задания поверхности, можно производить определение конструктивных и кинематических параметров шарошечного инструмента для бурения некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений.

Таким образом, использование кинематического способа задания поверхности применительно к процессу бурения некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений позволяет сделать вывод, что в конструкции бурового инструмента предпочтительным является генерация образующей и направляющей одним и тем же способом. В этом случае достигается упрощение конструкции бурового инструмента путем уменьшения количества кинематических звеньев. У вариантов бурового инструмента, где генерация направляющей происходит, благодаря вращательному движению, улучшается очистка призабойной зоны от буровой мелочи. Указанными особенностями обладает шарошечный буровой инструмент, который нашел наибольшее распространение на открытых горных работах. Использование шарошек для формирования скважин с некруглым сечением дает возможность обеспечить разрушение породы без увеличения числа

кинематических ветвей конструкции бурового инструмента, используя вращательное движение инструмента, необходимое для эффективной очистки призабойной зоны от буровой мелочи [124, 125].

Известно, что инструмент, образующий вращением полость в горной породе, способен создавать некруглое поперечное сечение скважины, имея конструкцию не предназначенную для этого. Например, серийные шарошечные долота при определенных условиях могут создавать треугольное поперечное сечение со сглаженными углами [126]. В этом случае работа бурового инструмента осложняется, приводя к уменьшению его долговечности и ухудшая технико-экономические показатели бурения [127]. Причиной этому является несбалансированность конструкции инструмента и его вооружения, что приводит к появлению поперечных отклоняющих сил, которые способствуют отклонению оси скважины и формированию некруглого ее поперечного сечения [126, 128]. Буровой инструмент, изначально предназначенный для получения некруглого поперечного сечения скважины, должен это делать в режиме, обеспечивающем его сбалансированную работу и заданное направление оси скважины. Но обеспечение переменного по углу поворота бурового инструмента радиуса поперечного сечения скважины обуславливает необходимость соответствующего изменения во времени расположения вращающихся вокруг оси скважины породоразрушающих элементов в процессе бурения. Поэтому при создании такого инструмента вращательного действия следует оценивать силовое взаимодействие его конструкции с забоем скважины в зависимости от формы поперечного сечения скважины.

Конструирование буровых исполнительных органов для образования некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений связано как с необходимостью повышения эффективности действия взрыва, так и с созданием соответствующего исполнительного органа, поэтому требуется обоснование его конструктивных и силовых параметров с учетом формы и параметров получаемой скважины некруглого поперечного сечения. В связи с этим имеется комплекс разнородных критериев для оценки эффективности альтернативных вариантов

инструмента для бурения скважин с различными формой и параметрами некруглого поперечного сечения скважины с угловыми концентраторами напряжений. В этом случае сравнительная оценка вариантов альтернативных решений может быть произведена с помощью аддитивной функции полезности, когда «полезность целого может быть представлена в виде суммы полезности частей» [129]. Сравнительная оценка альтернативных технических решений в процессе проектирования с помощью аддитивной функции полезности применена ранее для оценки конструкций горных машин по нескольким частным критериям [130, 131]. Для сравнительной оценки вариантов инструмента для бурения скважин с различными формой и параметрами некруглого поперечного сечения критериями функции полезности должны являться:

- форма и параметры некруглого поперечного сечения скважин, характеризующие способность повышать эффективность действия взрыва при использовании таких скважин для дробления горных пород;
- параметры конструкции бурового инструмента, характеризующие его способность эффективного разрушения забоя скважины, достижения большей надежности и долговечности при различных формах поперечного сечения скважины;
- параметры силового взаимодействия с забоем скважины в зависимости от формы поперечного сечения скважины, характеризующие способность конструкции бурового инструмента обеспечивать его сбалансированную работу и заданное направление оси скважины.

Сравнительная оценка вариантов инструмента для бурения скважин с различной формой и параметрами некруглого поперечного сечения с учетом всех указанных выше групп параметров является комплексной и ее применение при создании такого инструмента позволяет учитывать его особенности, обусловленные формой и параметрами некруглого поперечного сечения, во взаимосвязи с параметрами, влияющими на эффективность действия взрыва при использовании получаемой скважины на открытых горных работах.

1.5 Выводы и задачи исследований

Комплексный анализ условий ведения буровзрывных работ на открытых горных работах, изучение исследований в области повышения эффективности действия взрыва и создания инструментов для получения некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений позволили сделать следующие выводы:

1. Установлено, что в условиях увеличения глубины ведения горных работ и прочности горных пород необходимо повышение эффективности действия взрыва, которое связано с уменьшением расхода взрывчатых веществ и объемов бурения путем управления энергией взрыва.

2. Определено, что одним из перспективных направлений по увеличению эффективности управления энергией взрыва является управление процессом трещинообразования путем создания направленного действия взрыва с применением взрывной полости некруглого поперечного сечения, использование которого способно приводить к уменьшению удельного расхода взрывчатых веществ до 20 %, а наличие угловых концентраторов напряжений, образованных сопряжением стенок скважины некруглого поперечного сечения, их геометрические параметры и расположение являются факторами, влияющими на эффективность действия взрыва.

3. Разрушение забоя скважины с некруглой формой поперечного сечения и образованием угловых концентраторов напряжений с помощью шарошек позволяет производить бурение без увеличения числа кинематических ветвей конструкции инструмента, наиболее распространенным вращательным способом бурения в условиях открытых горных работ.

4. Для обоснования параметров инструмента для бурения некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений целесообразно произвести комплексную оценку вариантов его исполнения на основе функции полезности с учетом формы и параметров некруглого поперечного сечения, конструктивных параметров и параметров его силового взаимодействия с забоем скважины.

На основе полученных выводов в работе поставлены следующие задачи исследований:

1. Разработать модели взаимосвязей конструктивных, кинематических параметров шарошечного инструмента и формы и параметров забоя некруглой скважины с концентраторами напряжений.

2. Разработать модели влияния формы и параметров забоя некруглой скважины с концентраторами напряжений на формирование силовых параметров шарошечного инструмента.

3. Обосновать параметры шарошечного инструмента, путем разработки критериев функции полезности и комплексной сравнительной оценки эффективности шарошечного инструмента для бурения взрывных скважин с различными формой и параметрами некруглого поперечного сечения станками вращательного бурения для открытых горных работ.

4. Разработать схемные и конструктивные решения шарошечного инструмента для бурения некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений и провести в производственных условиях испытания его экспериментального пилотного образца.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ И ПАРАМЕТРОВ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ СКВАЖИН, ШАРОШЕЧНОГО ИНСТРУМЕНТА И ИХ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ

2.1 Разработка моделей взаимосвязи конструктивных и кинематических параметров шарошечного бурового инструмента и формы и параметров забоя некруглой скважины с угловыми концентраторами напряжений

2.1.1 Определение взаимосвязей конструктивных и кинематических параметров инструмента

Наибольший вклад в исследования процесса шарошечного бурения внесли Буткин В. Д. [132, 133], Гилев А. В. [132, 134, 135], Шигин А. О. [134, 135], Эйгелес Р. М. [136, 137], Симонов В. В. [138, 139], Балицкий П. В. [140], Юнин Е. К. [139, 141] и др. Согласно этим исследованиям процесс разрушения горной породы, характеризуемый углублением забоя скважины, зависит от силовых статических и динамических, а также кинематических параметров процесса бурения. На основании исследований [138-141] кинематические параметры шарошечного бурового инструмента характеризуются:

- продольными и поперечными перемещениями корпуса инструмента;
- наклонами корпуса инструмента относительно оси скважины;
- частотой вращения и крутильными колебаниями корпуса инструмента;
- частотой вращения каждой из шарошек и передаточным отношением долота.

Данные кинематические параметры находятся во взаимосвязи как между собой, так и зависят от свойств горной породы и конструкционных материалов, а также от особенностей конструкции долота, бурового става и бурового станка, усилия подачи и частоты вращения на вращательно-подающем механизме. Но для определения конструктивных параметров шарошечного инструмента, при которых возможно образование некруглой формы поперечного сечения скважины, требуется принять ряд допущений, которые позволяют упростить решение этой

задачи с сохранением качественной картины взаимодействия инструмента с забоем скважины.

Основанием предлагаемых ниже допущений является то, что получение именно некруглой формы поперечного сечения является результатом не особенностей силовых и динамических характеристик процесса бурения, а результатом переменного по углу поворота радиуса породоразрушающего элемента – шарошки бурового инструмента, а значит переменного радиуса воздействия на забой скважины в результате качения шарошки. Поэтому, не смотря на то, что процесс шарошечного бурения основан на динамическом воздействии вооружения шарошек на горную породу, для решения указанной задачи можно не учитывать продольные перемещения корпуса долота, крутильные колебания корпуса долота, поперечные колебания и наклоны корпуса долота относительно долота, которые, главным образом, обусловлены прерывистым (зубчатым или штыревым) вооружением шарошек и различиями его на каждой шарошке. Та как не стоит задача повышения эффективности процесса бурения, то могут быть применены режимы бурения, отличные от рациональных с точки зрения обеспечения энергоемкости и производительности процесса бурения. Поэтому, в качестве допущений, при разработке моделей взаимосвязей параметров шарошечного инструмента и формы и параметров забоя некруглой скважины с угловыми концентраторами напряжений, принято следующее:

1. Шарошки не теряют контакт с забоем скважины, т. е. долото не подкакивает и не наклоняется вместе с буровым ставом таким образом, что вооружение шарошек не воздействует на горную породу, что может быть обеспечено выбором режима бурения.

2. Поверхность забоя гладкая, что обосновано отсутствием влияния ухабов забоя, продольных перемещений и колебаний частоты вращения корпуса долота на обеспечение переменного радиуса разрушения забоя скважины, при условии обеспечения постоянного контакта шарошек с горной породой.

3. Забой скважины не разрушается и бурение происходит без его углубления, что обосновано малыми продольными перемещениями корпуса долота за один его оборот.

4. Шарошки не испытывают зубцовых колебаний и имеют гладкую конусную поверхность, что обосновано отсутствием влияния зубцовых колебаний на получение некруглой формы боковых стенок скважины.

5. Долото вращается вокруг оси скважины, то есть без поперечных колебаний его корпуса, что может быть, в той или иной степени, обеспечено применением наддолотных центраторов и забурника, выбором режимов бурения.

6. Шарошки по забою перекатываются без скольжения и синхронно, что может быть достигнуто при одинаковом количестве зубьев на одноконусных шарошках, с вершинами, лежащими на оси вращения корпуса долота.

Таким образом, достаточно исследовать процесс движения одной шарошки, который представим как качение кругового конуса вокруг неподвижной точки – центра скважины. Поэтому движение каждой точки на поверхности шарошки представляет собой движение точки, находящейся на поверхности подвижного конуса – тела шарошки, который обкатывает неподвижный конус (или плоскость) – забой. Указанным способом движение описывается при совпадении центра вращения с вершиной конуса – при совершенном конусе, поэтому далее под конусом шарошки будет подразумеваться ее совершенный конус, который проходит через вершины вооружения шарошки и характеризует передаточное отношение долота. Неподвижным конусом является поверхность забоя, проходящая через дно лунок, полученных в результате воздействия вооружения шарошки на горную породу при условии отсутствия углубления забоя скважины в процессе бурения.

Для получения заданного контура необходимо, чтобы передаточное отношение долота принимало постоянное требуемое значение. Величина передаточного отношения определяется соотношением сил, которое можно прогнозировать, изменяя конструктивные параметры долота и учитывая характеристики горной породы [138]. Повторяемость формы поперечного сечения скважины при многократном прокатывании шарошки по забою скважины может быть обеспечена при неизменном передаточном отношении. Для поперечных сечений скважины, состоящих из целого числа равных по площади и форме секторов передаточное отношение долота:

$$i = \frac{n}{n'}, \quad (2.1)$$

где n – число равных по площади и форме чередующихся по углу поворота бурового инструмента секторов поперечного сечения скважины (количество углов поперечного сечения скважины, образованных сопряжением ее стенок, или количество угловых концентраторов напряжений);

n' – число повторяющихся секторов развертки конуса поверхности шарошки на поверхность конуса забоя скважины,

$$n' = 1 \dots (n - 1). \quad (2.2)$$

Так как число n равных по площади и форме чередующихся по углу поворота бурового инструмента секторов поперечного сечения скважины соответствует количеству выраженных углов сопряжения стенок скважины с некруглым поперечным сечением, значит, в зависимости от количества выраженных углов сопряжения стенок скважины можно определить соответствующее значение передаточного отношения долота.

Для определения конструктивных параметров бурового инструмента, зависящих от передаточного отношения, движение точки на поверхности конуса шарошки определим с помощью углов Эйлера [142]:

$$\begin{cases} \dot{\psi} = \psi(t) \\ \dot{\phi} = \phi(t), \\ \dot{\theta} = \theta(t) \end{cases} \quad (2.3)$$

где ψ – угол поворота шарошки вокруг оси скважины;

ϕ – угол поворота шарошки вокруг своей оси;

θ – угол между осью вращения шарошки и осью скважины;

$\dot{\psi}$, $\dot{\phi}$ и $\dot{\theta}$ – производные по времени.

На основе уравнений кинематики получим уравнения углов конусов вращения следующим образом.

Уравнение мгновенной оси вращения (МОВ) относительно неподвижной системы координат (x, y, z) , связанной с забоем в данный момент времени (рисунок 2.1):

$$\frac{x}{\omega_x} = \frac{y}{\omega_y} = \frac{z}{\omega_z}, \quad (2.4)$$

где x, y, z – текущие координаты точки на мгновенной оси вращения;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции вектора МОВ на неподвижные оси:

$$\begin{cases} \omega_x = \dot{\varphi} \sin(\psi) \sin(\Theta) \\ \omega_y = -\dot{\varphi} \cos(\psi) \sin(\Theta) \\ \omega_z = \dot{\psi} - \dot{\varphi} \cos(\Theta) \end{cases} \quad (2.5)$$

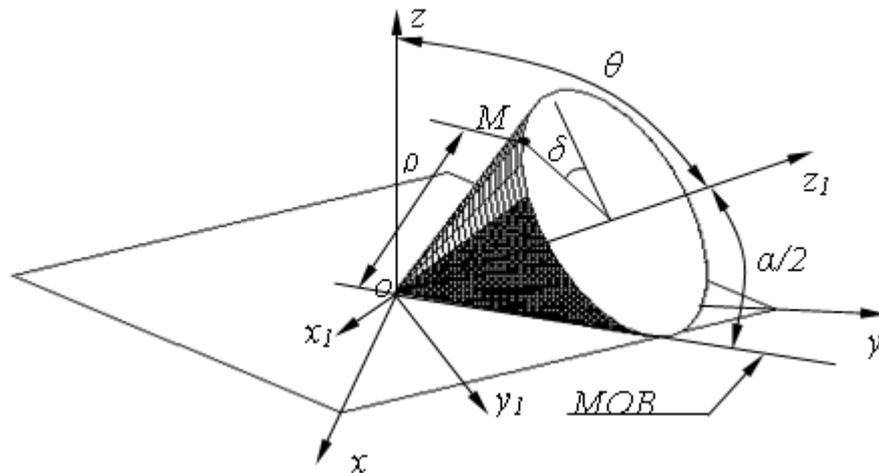


Рисунок 2.1 – Расположение совершенного конуса шарошки в прямоугольной системе координат

Аналогично для подвижной системы координат (x_1, y_1, z_1) , связанной с шарошкой:

$$\frac{x_1}{\omega_{x_1}} = \frac{y_1}{\omega_{y_1}} = \frac{z_1}{\omega_{z_1}}, \quad (2.6)$$

$$\begin{cases} \omega_{x_1} = \dot{\psi} \sin(\Theta) \sin(\varphi) \\ \omega_{y_1} = \dot{\psi} \sin(\Theta) \cos(\varphi) \\ \omega_{z_1} = \dot{\varphi} - \dot{\psi} \cos(\Theta) \end{cases} \quad (2.7)$$

Поверхность совершенного конуса шарошки является геометрическим местом мгновенных осей вращения, значит, исключив из уравнений (2.4-2.7) время t можно получить уравнение конуса шарошки. Учитывая, что $i = \varphi / \psi$, получим:

уравнение конуса забоя

$$x^2 + y^2 = \frac{z^2}{\left(\frac{1 - i \cos(\Theta)}{i \sin(\Theta)}\right)^2}, \quad (2.8)$$

уравнение конуса шарошки

$$x_1^2 + y_1^2 = \frac{z_1^2}{i^2 \left(\frac{\psi - \cos(\Theta)}{\sin(\Theta)}\right)^2}. \quad (2.9)$$

Из уравнений (2.8) и (2.9) найдем углы конусности:

для конуса шарошки

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{\sin(\theta)}{i - \cos(\theta)}, \quad (2.10)$$

для конуса забоя

$$\operatorname{tg} \frac{\lambda}{2} = \frac{i \sin(\theta)}{1 - i \cos(\theta)}, \quad (2.11)$$

где α и λ – углы конусности шарошки и забоя, соответственно.

Согласно уравнениям (2.10) и (2.11) обеспечение заданного передаточного отношения достигается изменением значения угла α конусности шарошки в зависимости от угла Θ наклона ее оси к оси скважины. То же происходит с величиной γ , которая определяет угол наклона образующей конуса забоя скважины к плоскости, перпендикулярной ее поперечному сечению (рисунки 2.2 и 2.3):

$$\gamma = 90 - \lambda / 2, \quad (2.12)$$

где γ – угол наклона образующей конуса забоя скважины к плоскости, перпендикулярной ее поперечному сечению скважины.

При этом, когда поверхность забоя является плоской ($\gamma=0$) значение угла конусности шарошек (α) является максимальным.

В конструкции бурового инструмента одноконусные шарошки, вооружение которых образует совершенный конус, не могут быть самоочищающимися,

поэтому значения угла конусности шарошки ограничиваются из условия отсутствия пересечения тел шарошек друг с другом [143]:

$$\sin\left(\frac{\alpha_{\max}}{2}\right) = k \sqrt{\frac{2k^2 + 1 \pm 2k \sqrt{\frac{k^2 + 1}{1 + \operatorname{tg}^2(\gamma)}} \operatorname{tg}(\gamma)}{(2k^2 + 1)^2 + \operatorname{tg}^2(\gamma)}}, \quad (2.13)$$

где α_{\max} – максимальный угол конусности шарошек бурового инструмента по условию отсутствия перекрытия рабочих пространств шарошек друг с другом;

$$k = \operatorname{tg} \chi;$$

$\chi = \pi / m$ – проекция половины угла α на плоскость, перпендикулярную оси скважины;

m – число шарошек в долоте;

знак «+» соответствует выпуклому, а знак «-» – вогнутому забою.

При передаточном отношении $i=1,33$ по условию отсутствия пересечения тел шарошек друг с другом для получения вогнутого забоя скважины не возможна конструкция бурового инструмента с несколькими шарошками. При передаточном отношении $i=1,5$ (когда значения угла α расположены в заштрихованной области на рисунке 2.2) для получения вогнутого забоя скважины возможна конструкция бурового инструмента с двумя шарошками ($m=2$) с интервалом значений угла наклона их осей к оси скважины $\Theta=41,4 - 48,2$ градусов, на котором угол конусности шарошки (α) изменяется незначительно – от 82,8 до 83,6 градусов. При передаточном отношении $i=2$ (когда значения угла α расположены в заштрихованной области на рисунке 2.3) для получения вогнутого забоя скважины возможна конструкция бурового инструмента с двумя шарошками ($m=2$) с интервалом значений угла наклона их осей к оси скважины $\Theta=23,6 - 60,0$ градусов, на котором угол конусности шарошки (α) изменяется от 40,6 до 60 град, а также возможна конструкция бурового инструмента с тремя шарошками ($m=3$) с интервалом значений угла наклона их осей к оси скважины $\Theta \leq 60$ градусов.

При передаточном отношении $i=3$ и 4 по условию отсутствия пересечения тел шарошек друг с другом для получения вогнутого забоя скважины возможна конструкция бурового инструмента с несколькими шарошками ($m=2$ и 3).

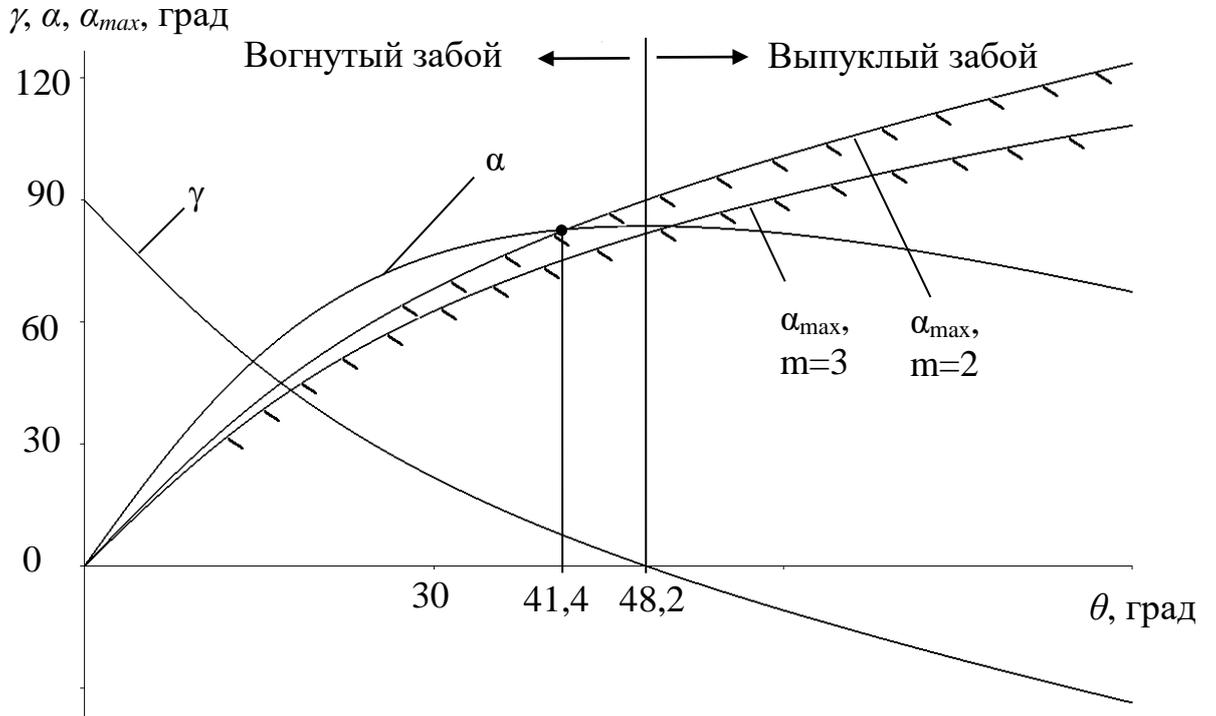


Рисунок 2.2 – Взаимосвязь конструктивных параметров по условию отсутствия пересечения тел шарошек друг с другом ($i=1,5$)

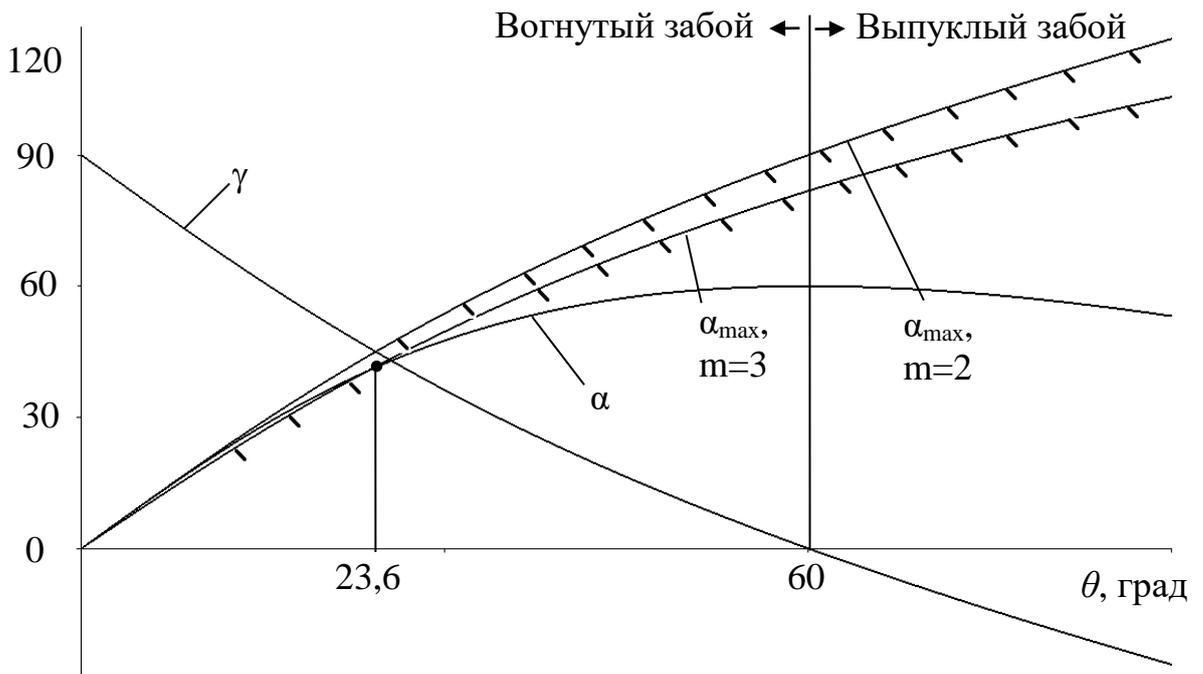
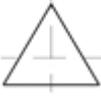
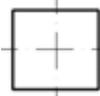
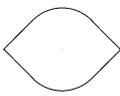


Рисунок 2.3 – Взаимосвязь конструктивных параметров по условию отсутствия пересечения тел шарошек друг с другом ($i=2$)

Варианты конструкции бурового инструмента с количеством шарошек более трех не рассматривались, так как увеличение их количества требует значительного уменьшения размеров шарошек и практика применения на открытых горных работах шарошечных долот ограничена использованием не более трех шарошек.

Таким образом, получены конструктивные параметры бурового инструмента на основе кинематики взаимодействия шарошек с забоем скважины при указанных выше допущениях для получения вогнутой (с опережением центра на продольной оси скважины) или плоской поверхности забоя скважины с различными формами ее поперечного сечения, представленные в таблице 2.1. При этом многошарошечная конструкция бурового инструмента и рациональные значения угла конусности шарошек (α), которые являются достаточно большими для возможности размещения в них более крупных подшипниковых опор, достигаются при передаточном отношении $i=1,5$ и 2 , при которых возможно получение формы поперечного сечения с двумя, тремя и четырьмя выраженными углами сопряжения стенок скважины ($n=2, 3, 4$). Большие значения параметра n не рассмотрены, так как его увеличение в пределе приводит к приближению формы поперечного сечения скважины к окружности.

Таблица 2.1 – Взаимосвязь конструктивных параметров бурового инструмента и формы поперечного сечения скважины

Пример формы поперечного сечения							
Параметр	Значение						
n	3		4			2	
n'	1	2	1	3	2	1	
i	3	1,5	4	1,33	2		
α_{max} , град	39,0	83,6	29,0	97,2	60		
m	2	3	2	3	–	2	3
θ_{min} , град	–	–	41,4	–	–	–	23,6
α_{min} , град	0	0	82,8	0	0	0	40,6

2.1.2 Определение взаимосвязей геометрии калибрующей кромки шарошки и геометрии некруглого поперечного сечения скважины

Линия соприкосновения круговых конусов поверхности шарошки и забоя с углами, определяемыми (2.10) и (2.11) является прямой и совпадает с мгновенной осью вращения. Отрезок ρ на этой прямой, соединяющий центр вращения и точку на калибрующей кромке шарошки является образующей конуса шарошки и должен иметь длину соответствующую заданной форме поперечного сечения скважины. Так как некруглая форма поперечного сечения возникает в результате многократного поворота шарошки вокруг своей оси за один оборот долота, получаемое поперечное сечение имеет форму фигуры на плоскости с повторяющимися ее секторами. В случае, если повторяющийся сектор фигуры на плоскости содержит прямую линию, образующую контур поперечного сечения скважины, то отрезок ρ (рисунок 2.4) на этом участке сектора имеет длину:

$$\rho = \frac{R_{\min}}{\cos(\Psi)\cos(\gamma)}, \quad -\Psi_1 \leq \Psi \leq \Psi_1, \quad (2.14)$$

где R_{\min} – минимальный радиус рассматриваемого участка сектора или радиус окружности, вписанной в поперечное сечение скважины, являющейся правильной фигурой;

Ψ – угол поворота долота или угол поворота линии контакта кругового конуса шарошки с круговым конусом забоя скважины;

Ψ_1 – половина центрального (полярного) угла рассматриваемого участка сектора фигуры на плоскости.

Если повторяющийся сектор фигуры на плоскости содержит прямую линию, то калибрующая кромка шарошки представляет собой пространственные кривые линии, лежащие на круговом конусе поверхности шарошки, но не лежащие на плоскости (рисунок 2.1, а). Таким образом, форма калибрующей кромки шарошки определяет форму поперечного сечения.

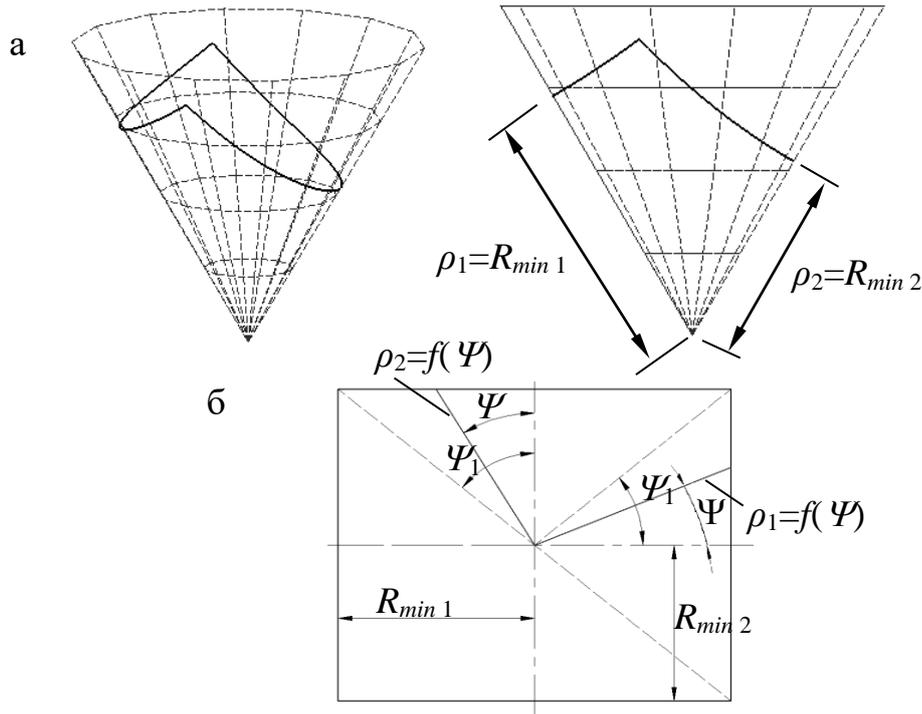


Рисунок 2.4 – Заданная прямоугольная форма сечения скважины (а)
и геометрия калибрующей кромки шарошки (б)

Так как калибрующая кромка шарошки образуется отсечением поверхности конуса шарошки со стороны его основания, следует рассмотреть секущую конус шарошки поверхность, которая, пересекаясь с поверхностью конуса шарошки, образует ее калибрующую кромку. Наиболее простой математически заданной поверхностью является плоскость.

В случае образования калибрующей кромки шарошки на пересечении ее конуса и секущей плоскости отрезок ρ на участке повторяющегося сектора поперечного сечения скважины имеет длину:

$$\rho = \left(\frac{R_{\min}}{\cos(\gamma)} \right) \frac{\sqrt{3} \sin(\mu) + \cos(\mu)}{\sqrt{3} \sin(\mu) + \cos(2\Psi) \cos(\mu)}, \quad -\Psi_1 \leq \Psi \leq \Psi_1, \quad (2.15)$$

где μ – угол наклона секущей плоскости к оси вращения шарошки, образующей ее калибрующую кромку.

Определено, что если калибрующая кромка шарошки лежит на секущей плоскости, то повторяющиеся сектора фигуры поперечного сечения скважины не могут иметь внешнюю границу с прямолинейными участками. В этом случае сектор поперечного сечения скважины будет иметь выпуклые и вогнутые участки

его контура. При увеличении угла наклона секущей плоскости к оси вращения шарошки, образующей ее калибрующие кромки (μ) форма поперечного сечения скважины стремится к окружности и является окружностью при $\mu=90^\circ$, а при уменьшении этого угла образуются вогнутые участки поперечного сечения скважины (рисунок 2.5). При этом для получения угла сопряжения стенок скважины калибрующая кромка шарошки должна быть образована на пересечении конуса шарошки с несколькими секущими плоскостями. Например (таблица 2.2), для треугольного и квадратного поперечного сечения скважины при $n'=2$ калибрующая кромка должна быть образована с помощью двух секущих плоскостей, линия пересечения которых перпендикулярна оси конуса шарошки и пересекает ее, для квадратного поперечного сечения при $n'=3$ калибрующая кромка должна быть образована с помощью трех секущих плоскостей, которые являются боковыми сторонами трехгранной призмы, вершина которой лежит на оси вращения шарошки, для поперечного сечения с двумя углами при $n'=1$ калибрующая кромка должна быть образована, как в случае четырехугольного поперечного сечения, с помощью двух секущих плоскостей, образующих один угол, и с помощью секущей плоскости с наклоном $\mu=90^\circ$ для образования участков поперечного сечения скважины без угла.

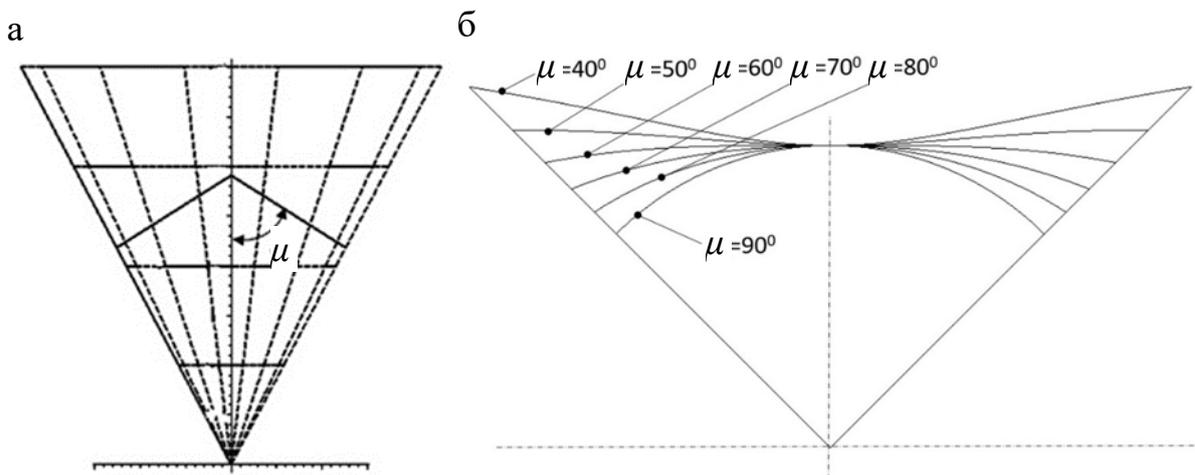
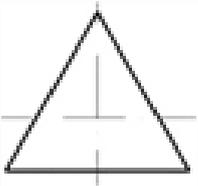
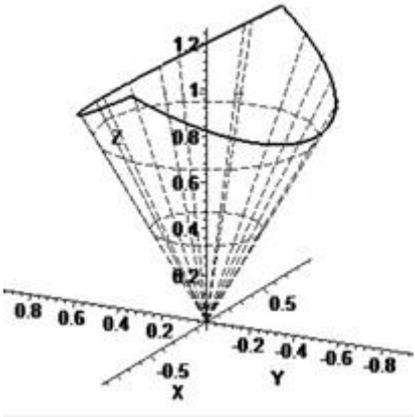
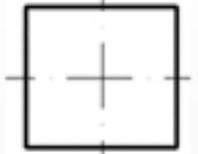
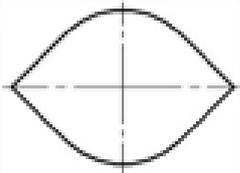
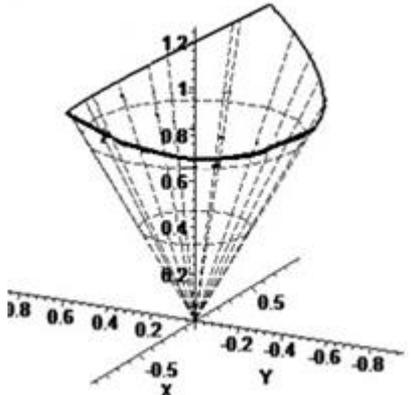
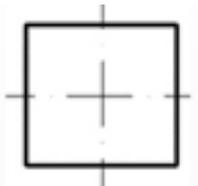
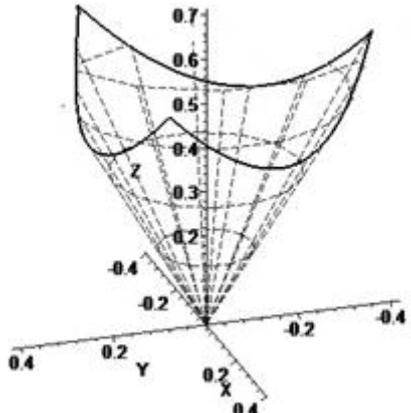


Рисунок 2.5 – Формирование вогнутых и выпуклых участков стенки скважины в зависимости от угла наклона секущей плоскости к оси вращения шарошки (μ):

а – конус шарошки с плоскостями среза под углом μ ;

б – элемент стенки скважины

Таблица 2.2 – Контур калибрующей кромки для различных форм поперечного сечения и передаточного отношения долота i

Форма поперечного сечения	Передаточное отношение долота i	Число повторяющихся секторов развертки конуса шарошки на поверхность конуса забоя скважины n'	Конус шарошки и ее калибрующая кромка
	1,5	2	
	2	2	
	2	1	
	4/3	3	

Если поперечное сечение скважины имеет скругления сопряжений ее стенок по окружности с центром на оси скважины (рисунок 2.6), то калибрующая кромка шарошек должна быть получена при расположении дополнительных секущих плоскостей под углом их наклона к оси вращения шарошек $\mu=90^\circ$, а отрезок ρ для этого участка сектора с полярным углом $(\Psi_1 - \beta') \leq \Psi \leq (\Psi_1 + \beta'')$ имеет длину:

$$\rho = \frac{R_{\max}}{\cos(\gamma)}, \quad (2.16)$$

где R_{\max} – радиус описывающей поперечное сечение скважины окружности;

β' и β'' – полярные углы дуги скругляющей окружности (в случае правильной фигуры поперечного сечения скважины $\beta' = \beta'' = \beta$).

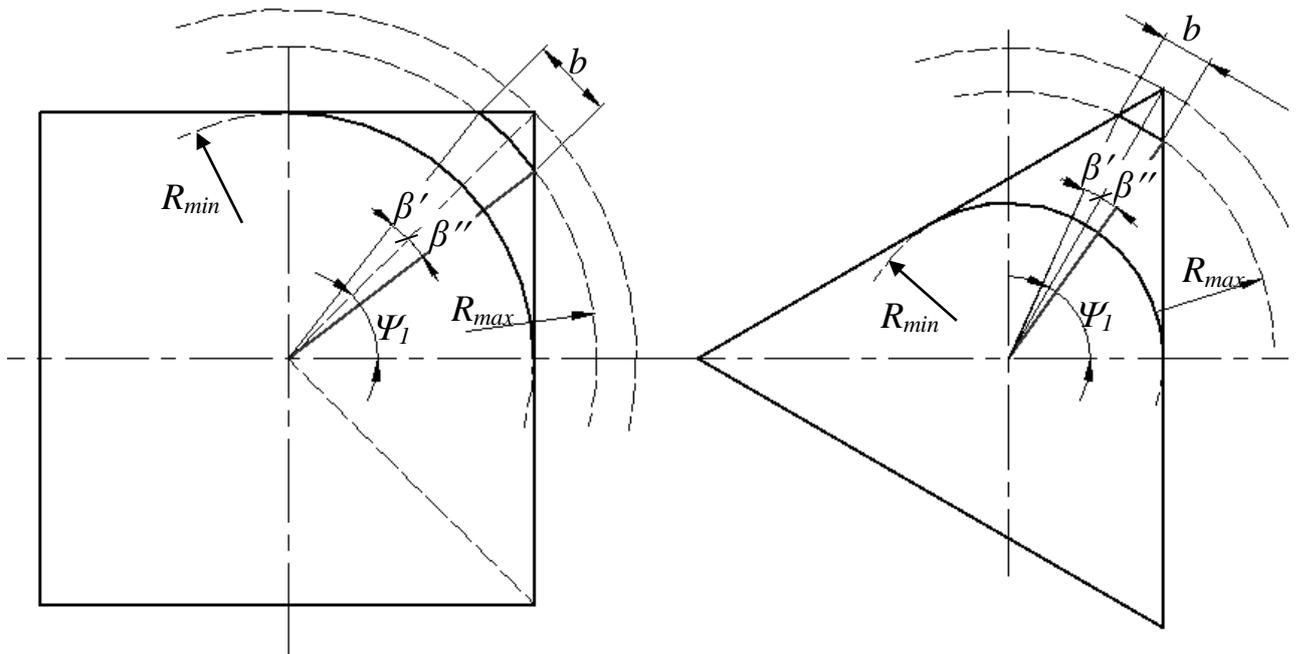


Рисунок 2.6 – Образование притупления сопряжения стенок скважины длиной b в результате его скругления по окружности

Скругление сопряжения стенок скважины образует его притупление, длина которого определяется следующим образом:

$$b = R_{\max}(\beta' + \beta'') \quad (2.17)$$

и при относительно малых значениях его длины приближенно является прямолинейным.

Радиус некруглого поперечного сечения $R=\rho \cdot \cos(\gamma)$ в полярных координатах с угловой координатой Ψ , представляющей собой угол поворота бурового инструмента или линии контакта кругового конуса шарошки с круговым конусом забоя скважины, может быть представлен непрерывной кусочно-заданной функцией.

Для поперечного сечения с четырьмя равными по площади и форме чередующимися по углу поворота бурового инструмента секторами поперечного сечения скважины радиус некруглого поперечного сечения, имеющего притупления сопряжения стенок, будет описываться выражением:

$$R^{n=4} = \begin{cases} R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(2\Psi)\cos(\mu)}, & \text{при } 0 \leq \Psi \leq \frac{\pi}{4} - \beta \\ R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(2\beta)\cos(\mu)}, & \text{при } \frac{\pi}{4} - \beta \leq \Psi \leq \frac{\pi}{4} + \beta \\ R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)-\cos(2\Psi)\cos(\mu)}, & \text{при } \frac{\pi}{4} + \beta \leq \Psi \leq \frac{3\pi}{4} - \beta \\ R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(2\beta)\cos(\mu)}, & \text{при } \frac{3\pi}{4} - \beta \leq \Psi \leq \frac{3\pi}{4} + \beta \\ R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(2\Psi)\cos(\mu)}, & \text{при } \frac{3\pi}{4} + \beta \leq \Psi \leq \frac{5\pi}{4} - \beta \\ R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(2\beta)\cos(\mu)}, & \text{при } \frac{5\pi}{4} - \beta \leq \Psi \leq \frac{5\pi}{4} + \beta \\ R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)-\cos(2\Psi)\cos(\mu)}, & \text{при } \frac{5\pi}{4} + \beta \leq \Psi \leq \frac{7\pi}{4} - \beta \\ R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(2\beta)\cos(\mu)}, & \text{при } \frac{7\pi}{4} - \beta \leq \Psi \leq \frac{7\pi}{4} + \beta \\ R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(2\Psi)\cos(\mu)}, & \text{при } \frac{7\pi}{4} + \beta \leq \Psi \leq 2\pi \end{cases} \quad (2.18)$$

Для поперечного сечения с тремя и двумя равными по площади и форме чередующимися по углу поворота бурового инструмента секторами поперечного сечения скважины радиус некруглого поперечного сечения, имеющего притупления сопряжения стенок, будет описываться выражением:

$$R^{n=3} = \left\{ \begin{array}{ll} R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(2\Psi)\cos(\mu)}, & \text{при } 0 \leq \psi \leq \frac{\pi}{3} - \beta \\ R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)-\cos(\frac{\pi}{3}+2\beta)\cos(\mu)}, & \text{при } \frac{\pi}{3} - \beta \leq \psi \leq \frac{\pi}{3} + \beta \\ R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)-\sin(2\Psi+\frac{\pi}{6})\cos(\mu)}, & \text{при } \frac{\pi}{3} + \beta \leq \psi \leq \pi - \beta \\ R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)-\cos(\frac{\pi}{3}+2\beta)\cos(\mu)}, & \text{при } \pi - \beta \leq \psi \leq \pi + \beta \\ R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)-\cos(2\Psi+\frac{\pi}{3})\cos(\mu)}, & \text{при } \pi + \beta \leq \psi \leq \frac{5\pi}{3} - \beta \\ R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)-\cos(\frac{\pi}{3}+2\beta)\cos(\mu)}, & \text{при } \frac{5\pi}{3} - \beta \leq \psi \leq \frac{5\pi}{3} + \beta \\ R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(2\Psi)\cos(\mu)}, & \text{при } \frac{5\pi}{3} + \beta \leq \psi \leq 2\pi \end{array} \right. \quad (2.19)$$

$$R^{n=2} = \left\{ \begin{array}{ll} R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(2\Psi)\cos(\mu)}, & \text{при } 0 \leq \psi \leq \frac{\pi}{4} - \beta \\ R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)+\sin(2\beta)\cos(\mu)}, & \text{при } \frac{\pi}{4} - \beta \leq \psi \leq \frac{\pi}{4} + \beta \\ R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)-\cos(2\Psi)\cos(\mu)}, & \text{при } \frac{\pi}{4} + \beta \leq \psi \leq \frac{\pi}{2} \\ R_{\min}, & \text{при } \frac{\pi}{2} \leq \psi \leq \pi \\ R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(2\Psi)\cos(\mu)}, & \text{при } \pi \leq \psi \leq \frac{5\pi}{4} - \beta \\ R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)+\sin(2\beta)\cos(\mu)}, & \text{при } \frac{5\pi}{4} - \beta \leq \psi \leq \frac{5\pi}{4} + \beta \\ R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)-\cos(2\Psi)\cos(\mu)}, & \text{при } \frac{5\pi}{4} + \beta \leq \psi \leq \frac{3\pi}{2} \\ R_{\min}, & \text{при } \frac{3\pi}{2} \leq \psi \leq 2\pi \end{array} \right. \quad (2.20)$$

Таким образом, возможно получение различных форм поперечных сечений с разной степенью выраженности углов сопряжения их стенок, при изменении

степени выпуклости или вогнутости стенок поперечного сечения скважины путем варьирования значения угла μ наклона секущей плоскости (рисунок 2.7), а также при изменении степени притупления сопряжения стенок скважины путем варьирования угла β дуги скругляющей окружности (рисунок 2.8).

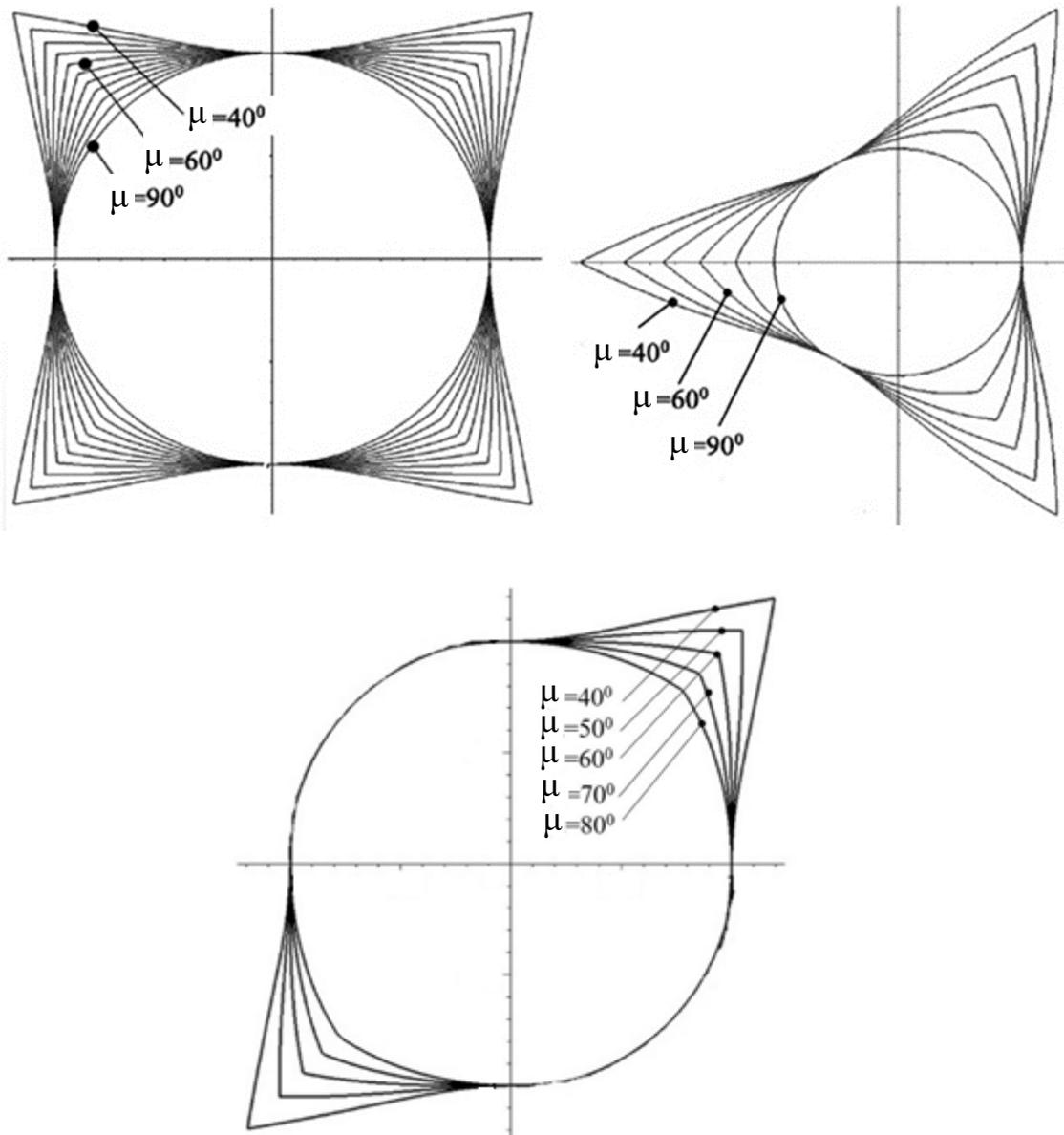


Рисунок 2.7 – Влияние угла наклона секущей плоскости (μ) на формирование различных поперечных сечений скважины

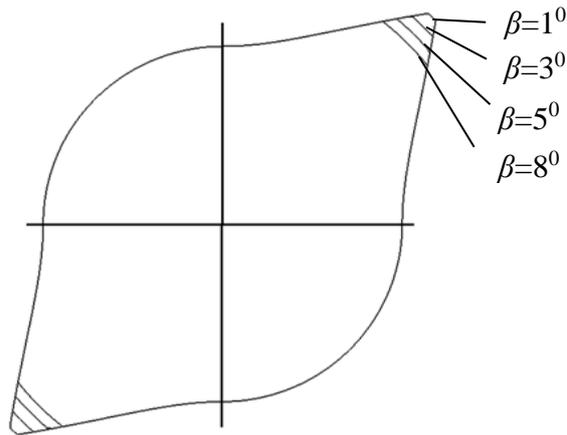


Рисунок 2.8 – Формирование различных поперечных сечений скважины притуплением их углов ($\mu=40^\circ$)

Увеличение степени притупления сопряжения стенок скважины при увеличении угла β приводит к снижению эффективности концентраторов напряжений и использования энергии взрыва.

2.1.3 Определение конструктивных параметров шарошек по условию их размещения в некруглом поперечном сечении скважины

Шарошка долота, которая генерирует образующей ее конуса поперечное сечение скважины, являясь объемным телом, должна быть размещена в сечении скважины при разных ее положениях по углу поворота вокруг оси ее вращения. Найдем такие параметры шарошки, при которых выполняется это условие, на основе уравнений кинематики [144, 145].

Учитывая уравнения (1.10) и (1.14), запишем матрицу преобразования [142]:

$$\begin{cases} x = \rho \left(a_{11} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos\delta + a_{12} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin\delta + a_{13} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right) \\ y = \rho \left(a_{21} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos\delta + a_{22} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin\delta + a_{23} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right), \\ z = \rho \left(a_{31} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos\delta + a_{32} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin\delta + a_{33} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right) \end{cases}, \quad (2.21)$$

где δ – координата точки на калибрующей кромке конуса шарошки в виде полярного угла в плоскости $x_1o_1y_1$ (см. рисунок 2.1).

Параметрические уравнения координат точки на калибрующей кромке конуса шарошки, при начальном положении которой ось ее вращения в плоскости xoy направлена по оси x , с учетом (2.21), $\varphi = i\psi$ и (1.15) имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} x=\rho \\ y=\rho \\ z=\rho \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \left(\sin(i\Psi)\sin\Psi + \cos(i\Psi)\cos\Psi \cos\Theta \right) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos\delta + \left(\cos(i\Psi)\sin\Psi - \right. \\ \left. \sin(i\Psi)\cos\Psi \cos\Theta \right) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin\delta + \cos\Psi \sin\Theta \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \\ \left(-\sin(i\Psi)\cos\Psi + \cos(i\Psi)\sin\Psi \cos\Theta \right) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos\delta - \\ \left(\cos(i\Psi)\cos\Psi - \sin(i\Psi)\sin\Psi \cos\Theta \right) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin\delta + \sin\Psi \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \\ \left(-\cos(i\Psi)\sin\Theta \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos\delta + \sin(i\Psi)\sin\Theta \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin\delta + \right. \\ \left. \cos\Theta \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right) \end{array} \right\} \quad (2.22)$$

Для остальных шарошек многошарошечного бурового инструмента в уравнениях (2.22) следует к полярной координате Ψ прибавить значение углов смещения шарошки, которые для трехшарошечного бурового инструмента составляют 120 и 240 градусов, а для двухшарошечного – 180 градусов.

На рисунках 2.9–2.12 изображены линии – геометрические места точек калибрующей кромки шарошек, образующие контуры, построенные по уравнениям (2.22), где $\rho = R/\cos(\gamma)$, а угол δ задан как параметр, изменяющийся от 0 до 2π .

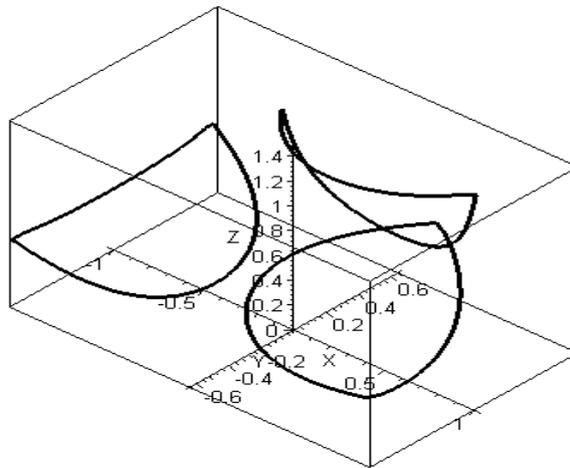


Рисунок 2.9 – Контурсы калибрующих кромок шарошек при прямоугольном сечении ($i = 2$)

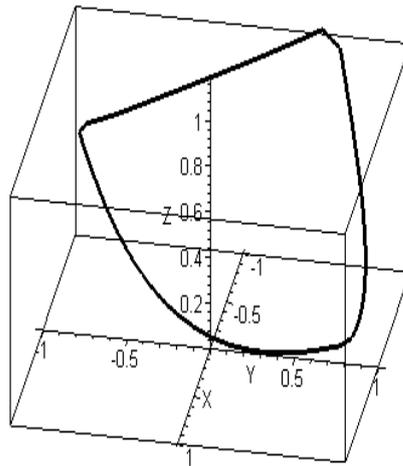


Рисунок 2.10 – Контуры калибрующих кромок шарошек при квадратном сечении
($i = 1,33$)

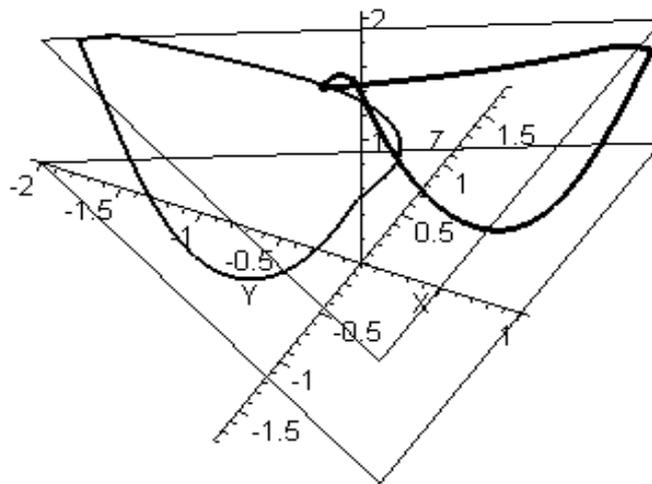


Рисунок 2.11 – Контуры калибрующих кромок шарошек при треугольном сечении
($i = 1,5$)

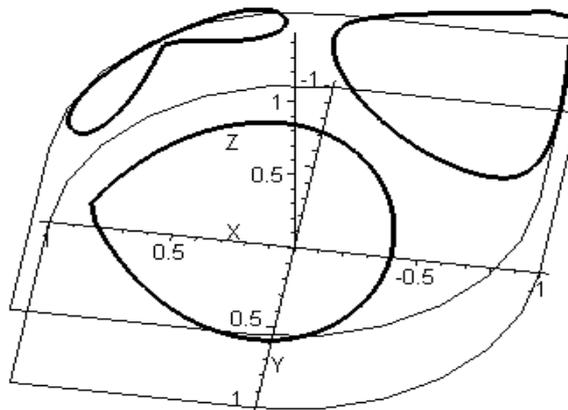


Рисунок 2.12 Контуры калибрующих кромок шарошек при сечении с двумя углами, образованном скруглением по окружности двух углов прямоугольника ($i = 2$)

Таким образом, пользуясь уравнениями (2.22), можно проследить за формированием поперечного сечения скважины и взаимодействием шарошек с ее стенкой, как показано на рисунках 2.9–2.11 в разных положениях бурового инструмента по углу Ψ его поворота для любой точки на калибрующей кромке, определяемой угловой координатой δ .

Для определения возможности свободного вращения шарошек в границах некруглого поперечного сечения скважины, ввиду повторяемости секторов поперечного сечения скважины, достаточно рассмотреть взаимодействие шарошки с одним из них с помощью уравнений (2.22).

При прямолинейных сторонах некруглого поперечного сечения решим следующую систему уравнений при изменении δ от 0 до $i\Psi_1$ и $-\Psi_1 \leq \Psi \leq \Psi_1$, где $\Psi_1 = \arctg(a/b)$, a – длина перпендикуляра, опущенного от центра вращения бурового инструмента к стороне многоугольника; b – длина отрезка на рассматриваемой стороне многоугольника, соединяющего точку его касания с перпендикуляром, опущенным к нему от центра вращения бурового инструмента, и ближайший угол многоугольника:

$$\begin{cases} x = \rho \left(a_1 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos\delta + b_1 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin\delta + c_1 \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right), \\ x = \frac{a}{2} \end{cases}, \quad (2.23)$$

где $\rho = \frac{a}{2 \cos\left(\frac{\delta}{i}\right) \sin\gamma}$,

α – угол конусности шарошки;

i – передаточное отношение долота;

γ – угол наклона образующей конуса забоя скважины к плоскости, перпендикулярной ее поперечному сечению скважины;

δ – центральный угол в подвижной системе координат, вместе с которой происходит движение шарошки;

$$\begin{cases} a_1 = \sin\varphi \sin\psi + \cos\varphi \cos\psi \cos\theta \\ b_1 = \cos\varphi \sin\psi - \sin\varphi \cos\psi \cos\theta, \\ c_1 = \cos\psi \sin\theta \end{cases}$$

где φ – угол поворота шарошки вокруг своей оси (при качении без скольжения $\varphi = i\Psi$);

θ – угол наклона оси вращения шарошки к оси вращения бурового инструмента.

В результате получим уравнение поверхности уровня, которая удовлетворяет условию $x = a/2$ (рисунок 2.13):

$$\cos\theta = \frac{\cos\delta \sin(i\psi) \sin\psi + \sin\delta \cos(i\psi) \sin\psi + i \cos\psi - i \cos\left(\frac{\delta}{i}\right)}{\cos\psi (\cos\delta \cos(i\psi) - \sin\delta \sin(i\psi) - 1)}. \quad (2.24)$$

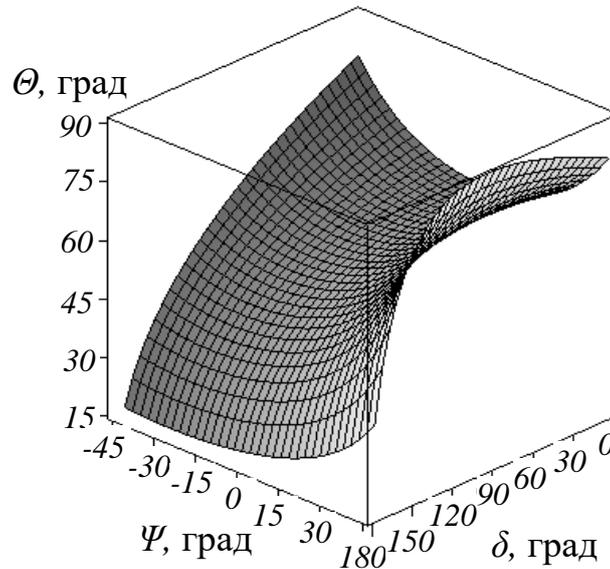


Рисунок 2.13 – Условие равенства координаты точки на калибрующей кромки шарошки $x = a/2$ ($i = 2$)

Значения угла θ , удовлетворяющие условию (2.24), будут уменьшаться при увеличении угла δ , а значит, достигнут минимума в угле сечения скважины. Поскольку конструктивно угол θ у долота имеет постоянные значения, а при его увеличении значение координаты x увеличивается, нужно найти минимальное его значение, которое для шарошки будет являться максимально допустимым.

Для этого решим уравнение $\partial\theta/\partial\psi = 0$ относительно δ и для указанных целей с достаточной степенью точности получим приближенно: при $i = 2$ для прямоугольного поперечного сечения $\delta = -6\psi$; при $i = 1,5$ для треугольного поперечного сечения $\delta = -2,45\sin(1,78\psi)$. Подставив полученные значения в (2.24), определим искомое значения угла θ_{max} . Из приведенных зависимостей на рисунке 2.14 видно, что наибольшее значение угла конусности α , соответствующее значению угла θ_{max} , достигается при квадратном поперечном сечении.

Для квадратного поперечного сечения при $i = 1,33$ существует одно единственное значение, при $\delta_{max} = i \cdot \varepsilon = \pi / 3 - \theta_{max} = 37,7$ град, что соответствует $\alpha_{max} = 96,9$ градусов. Для равностороннего треугольника, аналогично квадрату, получим при $\delta_{max} = \pi / 2$ и $i = 1,5 - \theta_{max} = 39,9$ градусов, что соответствует $\alpha_{max} = 82,2$ градусов.

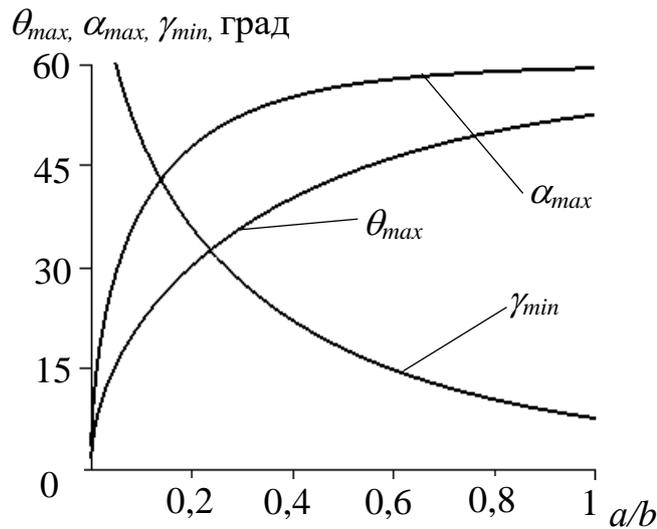


Рисунок 2.14 – Допустимые параметры конуса шарошки и забоя скважины при прямоугольном поперечном сечении ($i = 2$)

Для определения характера взаимодействия калибрующей кромки шарошки с сопряженной (следующей по ходу вращения шарошки относительно оси скважины) стороной многоугольника поперечного сечения скважины найдем максимальные значения координаты x при переменной ψ для каждого значения угла δ , которому соответствует точка на калибрующей кромке шарошки. Вследствие мо-

нотонного характера изменения координаты x , для указанных целей найдем решения уравнения $\partial x / \partial \psi = 0$, при котором получим для каждого значения угла θ зависимость $\psi = f(\delta)$ (рисунок 2.15). При этом координаты границы следующей по ходу вращения шарошки стенки скважины определяются $\Psi = -\delta/i$. При наличии такого взаимодействия калибрующей кромки шарошки со стенкой скважины, при котором она выходила бы за ее контур, полученные условия максимума координаты x располагались бы на рисунке 2.14 выше прямой $\psi = -\delta/i$. Значит, взаимодействия калибрующей кромки шарошки с сопряженной (следующей по ходу вращения шарошки относительно оси скважины) стороной многоугольника поперечного сечения скважины такое, что не создается препятствия ее свободному вращению.

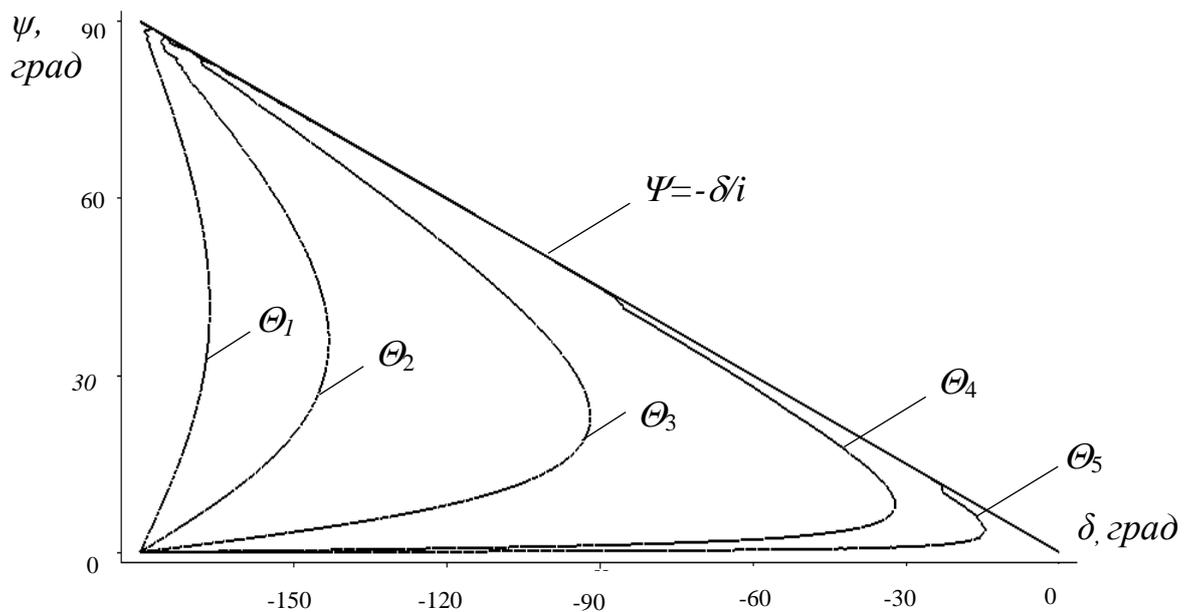


Рисунок 2.15 – Условия максимума абсолютных значений координаты x при разных значениях угла Θ

В отношении случаев, когда стороны некруглого поперечного сечения получены калибрующей кромкой шарошки, образованной секущими конус шарошки плоскостями, математический анализ, проведенный аналогичным способом, позволяет сделать вывод, что условие свободного вращения шарошек в границах некруглого поперечного сечения соблюдается во всех случаях. Поэтому

целесообразно дальнейшие исследования проводить в отношении форм поперечных сечений скважин, имеющих криволинейные формы их стенок.

2.2 Макетные испытания шарошечного инструмента по образованию некруглой скважины с угловыми концентраторами напряжений

Для подтверждения возможности получения заданной некруглой формы поперечного сечения скважины с использованием полученных параметров бурового инструмента на основе разработанных в подразделе 2.1 моделей кинематики взаимодействия шарошек с забоем скважины, взаимосвязи геометрии калибрующей кромки шарошки и поперечного сечения скважины, а также возможности обеспечения размещения шарошек в границах некруглого поперечного сечения скважины проведены макетные испытания бурового инструмента [120].

Известно, что при бурении шарошками на периферии забоя скважины образуется зубчатая рейка и передаточное отношение долота определяется соотношением числа зубьев забойной рейки и зубьев на периферийном венце шарошки. Число лунок рейки не является постоянным и может значительно меняться в зависимости от условий очистки скважины, усилия подачи долота на забой, свойств буримой породы, случайных факторов при забурировании разных скважин на неровных поверхностях [138]. Но в пределах одной скважины передаточное отношение остается постоянным после формирования выраженной рейки. Причем устойчивая рейка (постоянное число лунок на периферии забоя скважины) сохраняется даже при изменении шага зубьев шарошки (при замене долота). Поэтому забурирование скважины является процессом, определяющим передаточное отношение долота. Таким образом, задачей данных макетных испытаний явилось подтверждение возможности обеспечения заданного передаточного отношения в процессе забурирования и формирования некруглой формы поперечного сечения скважины.

Для изучения процесса забурирования изготовлен макет двухшарошечного долота с одноконусными шарошками (рисунок 2.16). Геометрические параметры долота рассчитаны для бурения скважины с прямоугольным поперечным

сечением со скругленными углами (полярный угол скругления $\beta=5^{\circ}$) и диагональю 160 мм при передаточном отношении долота $i=2$, при котором угол конусности шарошек $\alpha=54,5^{\circ}$ и угол наклона оси шарошек к оси вращения долота $\theta=39^{\circ}$.

Для бурения использован стенд (рисунок 2.17), состоящий из сверлильного станка и песчано-цементных блоков с разными свойствами, полученными разным содержанием цемента и свойств использованного песка.



Рисунок 2.16 – Макет двухшарошечного долота

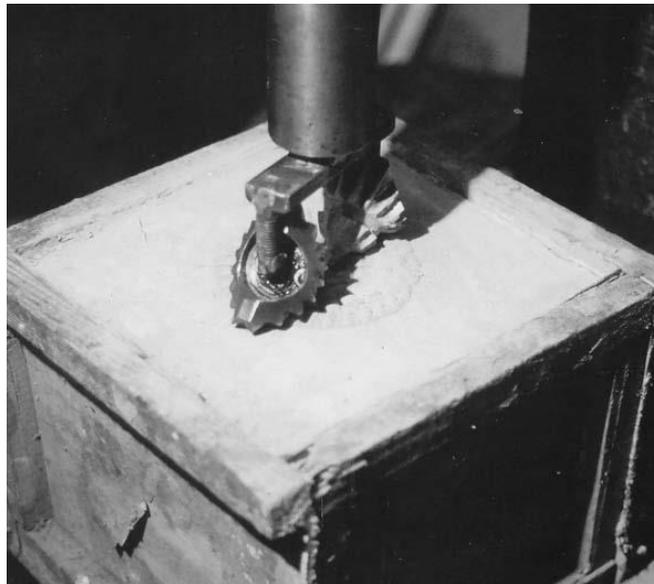


Рисунок 2.17 – Стенд для макетных испытаний

Произведено забуривание двух блоков с соотношением объема песка к цементу 4:1. При изготовлении первого блока использован глинистый карьерный

песок, второго блока – речной. Осевое усилие создавалось «в ручную», очистка забоя от буровой мелочи осуществлялась внешней струей воздуха.

Процесс забуривания проходил в следующей последовательности. Вначале образовывалась конусная поверхность забоя. При бурении первого блока происходило налипание мелочи на межзубцовое пространство шарошки, образовывалась слабовыраженная забойная рейка. Тоже происходило при бурении второго блока в условиях недостаточной очистки забоя. После образования конусной поверхности забоя на максимальный радиус (160 мм) в результате несинхронного движения шарошек и появления к этому времени более выраженной периферийной рейки бурение прекращалось, после подъема долота над забоем шарошки ориентировались и устанавливались на забой как показано на рисунке 2.16. При продолжении бурения шарошки вращались синхронно и происходило образование заданного профиля скважины (рисунки 2.18, 2.19).



Рисунок 2.18 – Вид забуренной скважины сверху

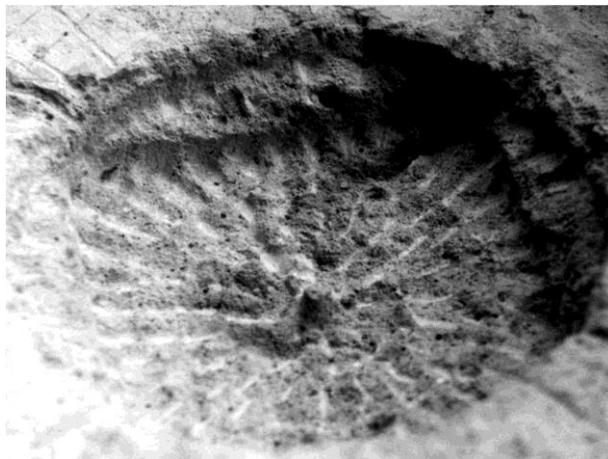


Рис. 2.19 – Вид забуренной скважины сбоку

В условиях недостаточной очистки скважины и при бурении первого блока наблюдалось скольжение шарошек по забою, в результате образовывалась круглая скважина (на рисунках 2.18 и 2.19 верхняя часть скважины) и не создавалась устойчивая забойная рейка.

Результаты забуривания подтвердили возможность создания необходимой кинематической связи шарошек с забоем скважины, которые были достигнуты при бурении более крепкого второго блока без содержания глинистых примесей. Следовательно, буримые горные породы должны обладать достаточной твердостью и меньше образовывать налипания на поверхность шарошки. Также подтверждена возможность обеспечения заданной формы поперечного сечения скважины и свободного вращения шарошек внутри его контура.

2.3 Обоснование рациональных параметров форм поперечного сечения скважин с точки зрения эффективности действия взрыва

Возможность получения различных форм и параметров поперечного сечения скважины шарошечным буровым инструментом как по количеству углов сопряжения их стенок, так и по степени их выраженности ставит задачу сравнительной оценки форм и параметров поперечного сечения [146]. Для этого определены критерии оценки форм поперечного сечения и произведена их сравнительная оценка с помощью функции полезности.

2.3.1 Методика сравнительной оценки технических решений по нескольким критериям с помощью функции полезности

Согласно методике сравнительной оценки альтернативных технических решений в процессе проектирования [130, 131] с помощью функции полезности при сравнении конкретных конструктивных решений представляется рациональным использовать частные критерии, которые отражают процессы взаимодействия исследуемых объектов с окружающей средой, например, изгибающие мо-

менты, определяющие устойчивость бурового инструмента, параметры формы поперечного сечения, определяющие эффективность действия взрыва, конструктивные параметры, определяющие его прочность и долговечность). Множество подобных частных критериев необходимо ранжировать их по степени важности. При этом сопоставление вариантов технических решений с целью обоснования их выбора следует производить с помощью интегрального критерия в виде аддитивной функции полезности [129]:

$$U_j = \sum_{i=1}^n P_i V_{ij}, \quad (2.25)$$

где U_j – интегральный критерий j -ого объекта;

V_{ij} – i -ый частный критерий j -ого объекта;

P_i – весовой коэффициент i -ого частного критерия;

n – количество частных критериев.

Весовые коэффициенты P_i часто определяются с помощью метода экспертных оценок, но такой способ может содержать субъективность оценок. Другим способом определить весовые коэффициенты P_i можно с помощью энтропийного подхода [147]. Энтропийный подход использует имеющуюся статистику значений частных критериев V_{ij} и позволяет произвести относительную оценку по отдельным частным критериям и по интегральному критерию. В данном случае интегральный критерий позволяет произвести относительную оценку технических решений. При этом частные критерии приводят к безразмерному виду, делают однонаправленными и изменяющимися в одном диапазоне от 0 до 1. Центрированность и нормированность частных критериев достигается преобразованием

$$V_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{i\min}}{x_{i\max} - x_{i\min}}, \quad (2.26)$$

где x_{ij} – i -ый показатель по j -ому объекту;

$x_{i\min}$ и $x_{i\max}$ – соответственно минимальное и максимальное значение i -ого единичного показателя по всем объектам;

V_{ij} – центрированное (изменяющееся в диапазоне от 0 до 1) значение i -ого частного критерия по j -му объекту.

Частные критерии, уменьшение которых вызывает улучшение функции полезности, приводят к виду

$$V_{ij} = I - V_{ij}. \quad (2.27)$$

Такие преобразования линейны и не изменяют ранжировки относительной оценки объекта (или крепи) по аддитивной функции полезности.

Если частные критерии принимают отрицательные значения, либо меняют свой знак при изменении каких-либо параметров, вместо нормированных значений частных критериев используют их аналоги, вычисляемые по следующей зависимости:

$$Y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max(|x_{imin}|, |x_{imax}|)}. \quad (2.28)$$

Данная методика сравнительной оценки технических решений предусматривает обеспечение отсутствия взаимозависимости частных критериев, путем исключения зависимых частных критериев из интегрального критерия с помощью построения корреляционной матрицы нормированных значений частных критериев. При этом исключаются те частные критерии, которые имеют меньшую чувствительность к изменению при варьировании параметров исследуемого объекта, а значит имеют меньшую значимость. Значимость частных критериев можно определить с помощью вычисления среднеквадратичного отклонения:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2}{N-1}}, \quad (2.29)$$

где N – количество сравниваемых между собой технических решений;

Y_{ij} – нормированное значение частного критерия:

$$Y_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{imax}}; \quad (2.30)$$

\bar{Y}_i – среднее значения нормированного i -ого частного критерия:

$$\bar{Y}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Y_{ij}. \quad (2.31)$$

Верхний треугольник нормированной корреляционной матрицы, составленный из коэффициентов корреляции, имеет вид:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1i} & \dots & r_{1n} \\ & 1 & r_{23} & \dots & r_{2i} & \dots & r_{2n} \\ & & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & & & 1 & r_{mi} & \dots & r_{mn} \\ & & & & \dots & \dots & \dots \\ & & & & & 1 & \\ & & & & & & 1 \end{pmatrix} \quad (2.32)$$

Факторы x_i и x_m считаются коррелированными (связанными между собой линейной зависимостью), если их коэффициенты корреляции [148]

$$r_{mi} > \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{N-2}{t_{кр}^2(\alpha; k)}}}, \quad (2.33)$$

где $t_{кр}(\alpha; k)$ – критическое значение распределения Стьюдента для двухсторонней критической области для уровня значимости α и числа степенной свободы $k=N-2$.

Если среднеквадратичное отклонение σ_i частного критерия является близким к максимальному значению, то этот частный критерий имеет наибольшее влияние на функцию полезности.

В аддитивной функции полезности сумма весовых коэффициентов частных критериев должна быть равной единице, поэтому они могут быть определены следующим образом пропорционально полученным среднеквадратичным отклонениям:

$$P_i = \frac{\sigma_i}{\sum_{i=1}^n \sigma_i}. \quad (2.34)$$

Рассмотренная методика сравнительной оценки различных вариантов исследуемых объектов или их отдельных элементов по какому-либо набору отобранных признаков (частных критериев) позволяет на стадии проектирования количественно оценить конкурирующие технические решения как по отдельно

взятым, так и по совокупности частных критериев для заданных условий эксплуатации [130].

2.3.2 Разработка и отбор критериев для сравнительной оценки форм поперечного сечения скважин

Форма поперечного сечения взрывной скважины, отличная от окружности, как указано в подразделе 1.1.2, оказывает влияние на процесс дробления горных пород взрывом. Поэтому чем больше поперечное сечение скважины отличается от круглого поперечного сечения, тем угловые концентраторы напряжений являются более выраженными и больше эффект от использования такого поперечного сечения при взрывании горных пород, вызванный некруглой формой. Для оценивания влияния этого фактора следует выделить геометрические параметры формы некруглого поперечного сечения скважины, которые позволяют получить положительный эффект по сравнению с круглым поперечным сечением.

В подразделе 1.1.2 указано, что переход от круглого поперечного сечения скважины на некруглое с выраженными углами сопряжения ее стенок, приводит к появлению угловых концентраторов напряжения на боковой поверхности скважины и увеличению площади ее боковой поверхности, что оказывает влияние на процесс дробления горных пород при детонации взрывчатого вещества, заполняющего полость скважины. Некруглое поперечное сечение скважины с выраженными углами сопряжения ее стенок в виде правильной фигуры на плоскости можно представить, как состоящее из окружности, вписанной в это поперечное сечение, и участков, выступающих за эту окружность и примыкающих к ней, граница которых образована углами сопряжения стенок скважины. Участки, примыкающие к окружности, характеризуются количеством, долей общей площади поперечного сечения, длиной выступа участка за периметр окружности, вписанной в поперечное сечение скважины.

Увеличение количества углов сопряжения стенок скважины приводит к расщеплению действия взрыва по нескольким направлениям, что, очевидно,

должно создавать положительный эффект для дробления горных пород взрывом до определенных пределов, так как при стремлении количества углов к бесконечности поперечное сечение становится круглым. Поэтому увеличение количества углов до четырех принято, как имеющее положительное влияние на процесс дробления горных пород взрывом, что согласуется с результатами исследований, приведенных в подразделе 1.1.2.

Длина выступа рассмотренного выше участка за периметр окружности, вписанной в поперечное сечение скважины, характеризуется относительным размахом радиусов, увеличение которого приводит к увеличению выраженности углов и большему отличию от круглого поперечного сечения, поэтому относительный размах радиусов следует рассматривать, как имеющий положительное влияние. Относительный размах радиусов:

$$R_o = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{max}}, \quad (2.35)$$

где R_{max} и R_{min} – максимальный и минимальный радиусы описанной окружности поперечного сечения полости (см. рисунок 2.6);

Увеличение площади боковой поверхности скважины определяется увеличением периметра поперечного сечения скважины относительно круглого поперечного сечения и также является параметром, характеризующим степень отличия формы поперечного сечения скважины от круглого поперечного сечения, и имеющим положительное влияние.

Увеличение площади боковой поверхности скважины, %:

$$S_n = \left(\frac{L}{L_o} - 1 \right) \cdot 100, \quad (2.36)$$

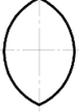
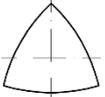
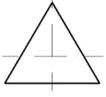
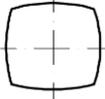
где L – периметр контура некруглого поперечного сечения скважины;

L_o – периметр контура круглого поперечного сечения с площадью, равной площади некруглого поперечного сечения скважины.

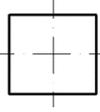
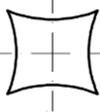
Наблюдается взаимосвязь угла сопряжения стенок скважины, относительного размаха R_o , увеличения площади боковой поверхности скважины S_n

и количества углов сопряжения стенок скважины n в рассмотренных случаях с правильными формами поперечного сечения (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Критерии формы поперечного сечения скважины по эффективности действия взрыва [146]

Вариант формы поперечного сечения		Соотношение максимального R_{max} и минимального R_{min} радиусов	Критерии	
			Относительный размах радиусов R_o	Увеличение площади боковой поверхности полости S_n , %
	окружность	$R_{max} = R_{min}$	0	0
	выпуклые стороны	$R_{min} < R_{max} < \infty$	$0 < R_o < 1$	$0 < S_n < \infty$
	выпуклые стороны	$R_{min} < R_{max} < 2R_{min}$	$0 < R_o < \frac{1}{2}$	$0 < S_n < \left(\frac{3}{\sqrt{\pi}} \right)^{\frac{3}{4}}$ или $0 < S_n < 28,6$
	прямолинейные стороны	$R_{max} = 2R_{min}$	$R_o = \frac{1}{2}$	$S_n = \left(\frac{3}{\sqrt{\pi}} \right)^{\frac{3}{4}}$ или $S_n = 28,6$
	вогнутые стороны	$2R_{min} < R_{max} < \infty$	$\frac{1}{2} < R_o < 1$	$\left(\frac{3}{\sqrt{\pi}} \right)^{\frac{3}{4}} < S_n < \infty$ или $28,6 < S_n < \infty$
	выпуклые стороны	$R_{min} < R_{max} < \sqrt{2}R_{min}$ или $R_{min} < R_{max} < 1,414R_{min}$	$0 < R_o < \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$ или $0 < R_o < 0,293$	$0 < S_n < \left(\frac{2\sqrt{\pi}}{\pi} - 1 \right)$ или $0 < S_n < 12,8$

Продолжение таблицы 2.3

Вариант формы поперечного сечения		Соотношение максимального R_{max} и минимального R_{min} радиусов	Критерии	
			Относительный размах радиусов R_o	Увеличение площади боковой поверхности полости S_n , %
	прямолинейные стороны	$R_{max} = \sqrt{2}R_{min}$ или $R_{max} = 1,414R_{min}$	$R_o = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}}\right)$ или $R_o = 0,293$	$S_n = \left(\frac{2\sqrt{\pi}-1}{\pi}\right)$ или $S_n = 12,8$
	вогнутые стороны	$\sqrt{2}R_{min} < R_{max} < \infty$ или $1,414R_{min} < R_{max} < \infty$	$\left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}}\right) < R_o < 1$ или $0,293 < R_o < 1$	$\left(\frac{2\sqrt{\pi}-1}{\pi}\right) < S_n < \infty$ или $12,8 < S_n < \infty$

Увеличение относительного размаха R_o приводит к увеличению площади боковой поверхности полости. Переход, например, с квадратной формы поперечного сечения на треугольную с выпуклыми сторонами может обеспечивать одинаковые значения относительного размаха R_o . Кроме того, значения указанных критериев зависят от количества углов сопряжения стенок скважины. При увеличении количества углов сопряжения стенок скважины значения R_o и S_n уменьшаются. Для выявления взаимосвязей указанных критериев требуется провести их корреляционный анализ.

Уменьшение угла сопряжения стенок скважины оказывает положительное влияние, однако, очевидно, имеет значимость в небольшой локальной области возле сопряжения стенок, причем углы сопряжения стенок должны иметь притупление, вызванное осыпанием стенок скважины, биением бурового инструмента, либо обоснованное его конструкцией. Поэтому величина угла сопряжения стенок скважины не принята в качестве критерия оценки форм поперечного сечения, а принят в качестве критерия параметр – притупление углов сопряжения стенок скважины b , имеющий отрицательное влияние на эффективность действия взрыва, определяемый по формуле (2.17).

Таким образом, в качестве критериев оценки форм поперечного сечения скважин приняты следующие параметры:

- количество углов сопряжения стенок скважины n ;
- притупление углов сопряжения стенок скважины b , мм;
- относительный размах радиусов R_0 ;
- увеличение площади боковой поверхности скважины S_n , %.

2.3.3 Сравнительная оценка форм поперечного сечения скважин по их параметрам

Для сравнительной оценки форм поперечного сечения определены диапазоны значений разработанных для анализа критериев.

Площадь поперечного сечения скважины определяет количество взрывчатого вещества, заполняющим скважину и поэтому выбор ее значения зависит от технологии применения скважин с некруглым поперечным сечением. Так как значения критерия b имеют натуральные значения, для учета влияния на процесс взрывного дробления горной породы только формы поперечного сечения скважины, а не ее размеров, все выбранные критерии оценки форм поперечного сечения скважин применены по отношению к одинаковой площади поперечного сечения скважины. Значение площади поперечного сечения принято равным площади круглого поперечного сечения с диаметром 216 мм, как имеющим среднее значения диапазона используемых диаметров скважин на открытых горных работах.

На значения критериев S_n и R_0 оказывает влияние кривизна стенок скважины, которая может быть преимущественно положительной (выпуклые стенки скважины) и преимущественно отрицательной (вогнутые стенки скважины). Оценка форм поперечного сечения проведена при углах μ наклона секущей конус шарошки плоскости 40, 50, 60, 70, 80 градусов, так как в этом диапазоне кривизна стенок скважины переходит из отрицательного в положительное значение.

Количество углов сопряжения стенок скважины принято $n=2, 3, 4$. Большие значения n не рассмотрены, так как дальнейшее увеличение количества углов

приводит к значительному уменьшению выраженности углов сопряжения стенок скважины.

Притупление углов сопряжения стенок скважины $b=0, 5, 10, 15, 20, 25, 30$ мм. Большие значения притупления углов для указанной площади поперечного сечения не рациональны, так как составляют в сумме более половины периметра поперечного сечения скважины.

Комбинация в указанных количествах значений количества углов n , углов μ наклона секущей плоскости, притуплений b углов сопряжения стенок скважины дает с расчетными значениями критериев S_n и R_0 $N=105$ вариантов форм поперечного сечения, в отношении которых проведена сравнительная оценка, результаты которой представлены в таблицах 2.4–2.6.

Таблица 2.4 – Определение среднеквадратического отклонения частных критериев для оценки форм поперечного сечения скважины

Параметр	Частные критерии			
	n	b	R_0	S_n
$x_{i \max}$	4	30	0,6114	44,56
\bar{Y}_i	0,75	0,5	0,4401	0,2147
$\sum_{j=1}^N (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2$	4,375	11,66667	5,4450	5,496
σ_i	0,2051	0,3349	0,2288	0.2300

Таблица 2.5 – Верхний треугольник корреляционной матрицы нормированных значений критериев для оценки форм поперечного сечения скважины

$r(i,j)$	n	b	R_0	S_n
n	1	0	-0,003931	0,1763
b		1	-0,1110	-0,1073
R_0			1	0,9223
S_n				1

Таблица 2.6 – Варианты форм поперечного сечения и значения интегрального критерия по параметрам формы поперечного сечения скважины

Вариант, j	μ , град	Частные критерии			U_j
		n	b , мм	R_0	
1	80	4	0	0,09	0,715
2	40	3	30	0,543	0,393
3	80	3	0	0,139	0,607
4	80	3	30	0,116	0,159
5	40	4	0	0,41	0,888
6	40	4	30	0,34	0,419
7	80	2	30	0,07	0,0002
8	80	4	30	0,07	0,267
9	40	3	0	0,611	0,867
10	80	4	30	0,07	0,267
11	80	2	0	0,09	0,448
12	40	2	0	0,41	0,621
13	40	2	30	0,35	0,156
14	40	2	0	0,41	0,621
15	80	4	0	0,0924	0,715
16	40	2	30	0,353	0,156
P_i		0,267	0,436	0,298	–

Критическое значение распределения Стьюдента для двухсторонней критической области для уровня значимости $\alpha=0,05$ и числа степенной свободы $k=N-2=105-2=103$ $t_{кр}(\alpha;k)=1,983$ [123].

Согласно (2.33) для указанного набора вариантов частные критерии x_i считаются коррелированными, если их коэффициенты корреляции $r(i,j)$ больше 0,1917. Таким образом, согласно таблице 2.5, коррелированными частными критериями являются R_0 и S_n , среднеквадратическое отклонение которых различается

на 0,005 %. Поэтому из частных критериев R_0 и S_n для дальнейшего использования выбран частный критерий R_0 , как более простой для математических вычислений.

Весовые коэффициенты P_i , определенные по формуле (2.36), имеют значения, представленные в таблице 2.6.

Отобраны представительные варианты форм поперечного сечения, в том числе, которые имеют максимальные и минимальные значения частных критериев n , b и R_0 , а также варианты с максимальным и минимальным значением интегрального критерия, которые представлены в таблице 2.6.

Согласно данным, представленным в таблице 2.6, сравнительная оценка форм поперечного сечения с точки зрения эффективности действия взрыва показала, что наиболее эффективным является форма поперечного сечения по варианту номер 5, который не имеет максимальное значение относительного размаха ($R_0=0.41$), полученный при минимальном из рассмотренных значениях угла наклона секущей плоскости $\mu=40^\circ$, но имеющий наибольшее количество углов $n=4$, не имеющих притупления ($b=0$). Наихудшим является вариант номер 7, который имеет наименьшее количество углов $n=2$, имеющих наибольшее из рассмотренных значение притупления ($b=30$ мм), и наименьший относительный размах радиусов $R_0=0,07$, полученный при наибольшем из рассмотренных значениях угла наклона секущей плоскости ($\mu=80^\circ$). При этом наибольший коэффициент весомости имеет частный критерий (параметр) b (0,436).

Выбор формы поперечного сечения скважины должен производиться не только с точки зрения эффективности действия взрыва, так как форма поперечного сечения, как показано в подразделе 2.1, оказывает влияние на конструктивные параметры бурового инструмента [149]. Поэтому далее следует произвести сравнительную оценку бурового инструмента по конструктивным параметрам для различных форм и параметров некруглого поперечного сечения скважины.

2.4 Обоснование рациональных конструктивных параметров шарошечного инструмента

2.4.1 Разработка и отбор критериев для сравнительной оценки шарошечного инструмента по конструктивным параметрам

Шарошечный буровой инструмент должен иметь достаточную прочность и долговечность, которые достигаются разными способами, в том числе совершенствованием применяемых материалов, подшипниковых опор шарошек, параметрами вооружения шарошек, использованием разного количества шарошек. В любом случае эффективность способов увеличения прочности и долговечности шарошечного бурового инструмента определяется размерами деталей такого бурового инструмента, который предназначен для работы в стесненных условиях внутри скважины. Поэтому следует определить такие конструктивные параметры бурового инструмента, которые отвечают за размеры высоконагруженных узлов и деталей бурового инструмента и на которые оказывает влияние форма поперечного сечения скважины.

Высоконагруженным узлом в шарошечном буровом инструменте является подшипниковая опора шарошек, от долговечности которой во многом зависит долговечность бурового инструмента [135, 150]. При этом долговечность подшипниковой опоры повышается при увеличении ее размеров, поэтому в серийно выпускаемом буровом инструменте шарошки выполняются многоконусными, что позволяет увеличить диаметр подшипниковой опоры. В случае бурового инструмента для получения скважин с некруглым поперечным сечением, как показано в подразделе 2.1, шарошки должны быть одноконусными, поэтому параметром, влияющим на диаметр подшипниковой опоры принят угол конусности шарошки α .

Тело шарошки является высоконагруженной деталью, так как прочность металла зависит как от его свойств, так и от его размеров, которые с одной стороны ограничены полостью подшипниковой опоры, а с другой – впадинами между вооружением шарошки. Для получения некруглого поперечного сечения скважины тело шарошек имеет выступы для образования углов сопряжения стенок скважины, длина которых зависит от относительного размаха радиусов R_0 , а минимальная ширина – от величины притупления b углов сопряжения стенок

скважины и угла μ наклона секущей плоскости. Увеличение параметра R_0 и уменьшение параметров b и μ приводит к уменьшению прочности тела шарошки, которое в этом случае приобретает зауженные выступающие части, расположенные консольно относительно подшипниковой опоры.

Опорные лапы, на которых с возможностью вращения, как правило, консольно, установлены шарошки, испытывают изгибающие нагрузки [151]. Толщина материала лап в самой узкой их части ограничена с одной стороны стенкой скважины, относительно которой должен иметься зазор, а с другой стороны – телом вращающейся шарошки, относительно которой также должен быть зазор. Ввиду того, что для получения некруглого поперечного сечения тело шарошек имеет выступы для образования углов сопряжения стенок скважины, толщина лап в самой узкой их части является ограниченной и зависящей от формы поперечного сечения. При этом увеличение зазора Δ между калибрующей кромкой шарошки в ее положении на забое скважины, соответствующем максимальному радиусу его поперечного сечения R_{max} , и минимальным радиусом поперечного сечения R_{min} позволяет увеличить толщину наиболее узкой части лапы и толщину затыловки вооружения шарошки (рисунок 2.20).

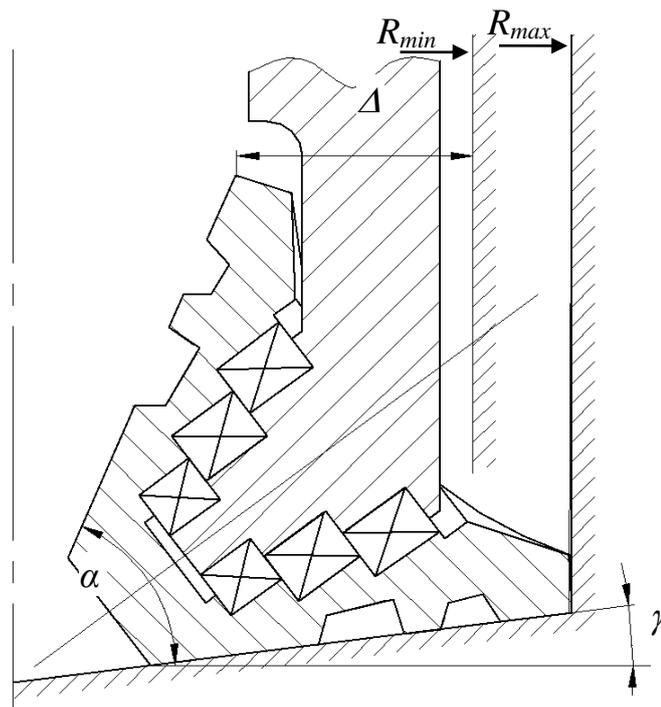


Рисунок 2.20 – Схема узла шарошечного бурового инструмента

Таким образом для сравнительной оценки шарошечного инструмента по конструктивным параметрам для различных форм поперечного сечения приняты следующие частные критерии:

- угол конусности шарошки α , град;
- притупление углов сопряжения стенок скважины b , мм;
- относительный размах радиусов R_0 ;
- зазор Δ (мм) между калибрующей кромкой шарошки в ее положении на забое скважины, соответствующем максимальному радиусу его поперечного сечения R_{max} , и минимальным радиусом поперечного сечения R_{min} ;
- угол μ наклона секущей плоскости к оси вращения шарошки, град.

2.4.2 Сравнительная оценка шарошечного инструмента по конструктивным параметрам

Для сравнительной оценки шарошечного инструмента по конструктивным параметрам для различных форм поперечного сечения использована методика, представленная в подразделе 2.2.1.

Значения критериев b , R_0 и μ приняты такие же, как для оценки форм поперечного сечения в подразделе 2.2.3. Диапазон значений углов α конусности шарошки принят по условию отсутствия касания шарошек между собой, определенному в подразделе 2.1.3, а именно:

– для четырехугольного поперечного сечения и поперечного сечения с двумя углами, образованном скруглением по окружности двух углов прямоугольника, от 50 до 60 градусов;

– для треугольного поперечного сечения от 82,8 до 83,6 градусов.

Зазор Δ между калибрующей кромкой шарошки в ее положении на забое скважины, соответствующем максимальному радиусу его поперечного сечения R_{max} , и минимальным радиусом поперечного сечения R_{min} является расчётным,

определенным геометрически с учетом максимальной длины ρ образующей конуса шарошки по формуле (2.15).

Комбинация указанных значений частных критериев позволила провести сравнительную оценку по 630 вариантам конструктивного исполнения бурового инструмента, результаты которой приведены в таблицах 2.7 и 2.8.

Таблица 2.7 – Определение среднеквадратического отклонения частных критериев для оценки шарошечного бурового инструмента по конструктивным параметрам

Параметр	Частные критерии				
	α	b	R_0	Δ	μ
$x_{i \max}$	83,6	30	0,6114	132,98	80
\bar{Y}_i	0,7000	0,5	0,4401	0,6909	0,75
$\sum_{j=1}^N (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2$	16,57	70	32,67	27,49	19,69
σ_i	0,1623	0,3336	0,2279	0,1769	0,1769

Таблица 2.8 – Верхний треугольник корреляционной матрицы нормированных значений критериев для оценки шарошечного бурового инструмента по конструктивным параметрам

$r(i,j)$	α	b	R_0	Δ	μ
α	1	$3,51 \cdot 10^{-5}$	0,4102	0,3730	$3,31 \cdot 10^{-5}$
b		1	-0,1110	0,0373	0
R_0			1	-0,2287	-0,8818
Δ				1	0,4812
μ					1

Критическое значение распределения Стьюдента для двухсторонней критической области для уровня значимости $\alpha=0,05$ и числа степенной свободы $k=N-2=630-2=628$ $t_{кр}(\alpha;k)=1,964$ [123].

Согласно (2.33) для принятого набора вариантов частные критерии x_i считаются коррелированными, если их коэффициенты корреляции $r(i,j)$ больше 0,07812. Таким образом, согласно таблице 2.8, коррелированными частными критериями являются пары R_0 и b , R_0 и α , Δ и α , Δ и R_0 , μ и R_0 , μ и Δ .

Путем соотнесения значений среднеквадратического отклонения частных критериев указанных пар, определены частные критерии для расчета интегральных критериев функции полезности вариантов конструкции бурового инструмента, представленные в таблице 2.9.

Отобраны представительные варианты конструкции бурового инструмента, в том числе которые имеют максимальные и минимальные значения частных критериев α , b и μ , а также варианты с максимальным и минимальным значением интегрального критерия, которые представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.9 – Варианты конструктивного исполнения шарошечного бурового инструмента и значения интегрального критерия

Вариант, j	n	Частные критерии			U_j
		α , град	b , мм	μ , град	
1	4	52	15	50	0,328
2	3	83,6	30	40	0,737
3	3	83,6	0	80	0,504
4	3	83,6	30	80	1
5	4	50	0	40	0
6	4	50	30	40	0,496
7	2	50	30	80	0,759
8	4	50	30	80	0,759
9	3	82,8	0	40	0,2359
10	4	60	30	80	0,831
11	2	60	0	80	0,335
12	2	56	0	40	0,043
13	2	60	30	40	0,568
14	2	50	0	40	0
15	4	60	0	80	0,335
16	2	50	30	40	0,496
P		0,241	0,496	0,263	–

Согласно данным, представленным в таблице 2.9, сравнительная оценка шарошечного инструмента по конструктивным параметрам показала, что наиболее эффективным является конструкция для получения треугольного поперечного сечения скважины по варианту номер 4, который имеет максимальные значения критериев α , b и μ . Наихудшими являются варианты для получения поперечного сечения скважины с четырьмя и двумя углами, соответственно номер 5 и 14, которые имеют минимальные значения критериев α , b и μ . При этом наибольший коэффициент весомости имеет частный критерий (параметр) b (0,496).

Таким образом, в отличие от результатов сравнительной оценки форм поперечного сечения с точки зрения эффективности действия взрыва, где наилучшим вариантом была четырехугольная форма поперечного сечения скважины без притупления углов сопряжения ее стенок, наилучшую конструкцию имеет буровой инструмент для получения треугольного поперечного сечения, в которой достигаются большие значения частных критериев α и b .

2.5 Выводы

Исследование параметров форм поперечного сечения скважин, шарошечного инструмента и их взаимосвязей позволило сделать следующие выводы:

1. Разработанные модели зависимости кинематических и конструктивных параметров шарошечного бурового инструмента от формы и параметров некруглого поперечного сечения скважины с угловыми концентраторами напряжений позволили установить, что форма и параметры некруглого поперечного сечения скважины с угловыми концентраторами напряжений определяются конструктивными и кинематическими параметрами шарошечного бурового инструмента, а именно количеством одноконусных шарошек, углами их конусности, параметрами расположения на них калибрующих кромок и передаточным отношением.

2. Некруглая форма поперечного сечения скважины с угловыми концентраторами напряжений образуется одноконусными шарошками, калибрующие кромки которых получены при сечении их конуса плоскостями, пересекающимися по

линии их диаметра и проходящими под острым углом к оси их вращения. Перекачивание шарошки по забою воспроизводит стороны стенок скважины разной кривизны: при угле (μ) наклона секущей плоскости к оси конуса шарошки больше или равным 60 градусам – выпуклые, а при величине этого угла менее 60 градусов – вогнутые.

3. Доказано, что образование формы поперечного сечения с двумя и четырьмя угловыми концентраторами напряжений происходит при передаточном отношении $i=2$, а с тремя – при передаточном отношении $i=1,5$. Максимальное количество одноконусных шарошек, способных образовывать вогнутую или плоскую поверхность забоя скважины, по условию отсутствия пересечения их тел друг с другом для поперечного сечения с двумя и четырьмя углами равно трем, а для треугольного поперечного сечения – двум. При этом максимальный угол конусности шарошек (α), при котором обеспечиваются заданные передаточное отношение и форма поперечного сечения скважины, достигается при плоской форме забоя скважины и составляет для поперечного сечения с двумя и четырьмя углами – 60 градусов, а для треугольного поперечного сечения – 83,6 градуса.

4. Определено, что критериями, позволяющими проводить сравнительную оценку форм поперечного сечения скважин с точки зрения эффективности действия взрыва с помощью функции полезности являются количество (n) и величина притупления (b) углов сопряжения стенок скважины, относительный размах радиусов (R_0). Установлено, что наиболее эффективная форма поперечного сечения (интегральный критерий $U=0,888$) образована четырьмя углами сопряжения ее стенок ($n=4$) без притупления углов ($b=0$), с вогнутой формой сторон, полученной при минимальном из рассмотренных значениях угла наклона секущей плоскости ($\mu=40^0$). При этом наибольший коэффициент весомости имеет частный критерий (параметр) b (0,436)

4. Определено, что критериями, позволяющими проводить сравнительную оценку шарошечного бурового инструмента по конструктивным параметрам с помощью функции полезности являются угол конусности шарошки (α), величина

притупления (b) углов сопряжения стенок скважины и угол (μ) наклона секущей плоскости к оси вращения шарошки. Установлено, что наиболее эффективной является конструкция (интегральный критерий $U=1,000$) при максимальном угле конусности шарошки ($\alpha=83,6^\circ$), который достигается при треугольном поперечном сечении, максимальном из рассмотренных значениях притупления углов сопряжения стенок скважины ($b=30$ мм) и максимальной выпуклости их сторон, полученной при максимальном из рассмотренных значениях угла наклона секущей плоскости ($\mu=80^\circ$). Наибольший коэффициент весомости имеет частный критерий (параметр) b (0,496).

3 ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ШАРОШЕЧНОГО ИНСТРУМЕНТА С ЗАБОЕМ НЕКРУГЛОЙ СКВАЖИНЫ

3.1 Разработка модели формирования суммарного осевого усилия и оценка характера его изменения

Суммарное осевое усилие (осевая нагрузка на долото), является результатом работы сложной системы, включающей взаимодействие вращательно-подающего механизма бурового станка, бурового става, шарошечного инструмента и горной породы, и состоит из статической и динамической составляющих. При этом возникают продольные относительно оси скважины автоколебания, которые могут возмущаться изменением длины бурового става при его крутильных автоколебаниях, а также перекатыванием шарошек по волнистому забою (рисунок 3.1).

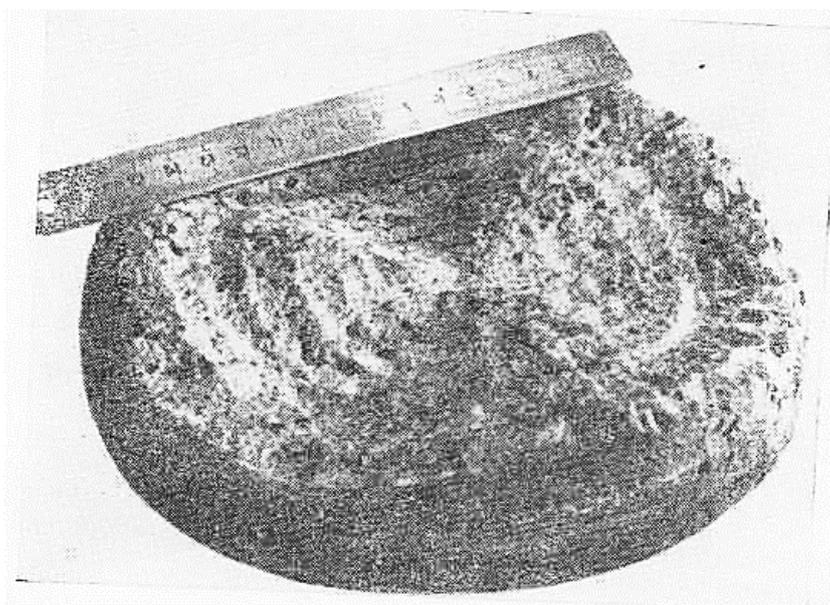


Рисунок 3.1 – Поверхность забоя скважины после бурения трехшарошечным долотом в режиме продольных автоколебаний [139]

Появление волнистости забоя скважины связывают с совпадением гармоник продольных и крутильных колебаний, а так же с кратностью числа продольных колебаний за один оборот числу симметрично расположенных шарошек, причем последний случай может быть следствием анизотропных свойств горной породы забоя скважины, что носит временный характер [139]. При этом известно,

что автоколебания при работе бурового инструмента оказывают отрицательное влияние как на скорость бурения, так и на долговечность бурового инструмента. Подавление автоколебаний возможно при помощи выбора режимов бурения. В данных случаях речь шла про бурение скважин с круглым поперечным сечением.

Когда происходит бурение скважины с некруглым поперечным сечением, дополнительным возмущающим продольные автоколебания фактором должно являться наличие переменной длины линии контакта шарошек с забоем по углу поворота бурового инструмента, так как происходит изменение удельной контактной нагрузки на горную породу, что, в свою очередь, может приводить к появлению волнистости забоя скважины. При этом изучение процесса образования автоколебаний требует анализа сложной многокомпонентной системы с проведением теоретических и экспериментальных исследований. Поэтому в рамках работы произведена оценка такого возмущающего продольные автоколебания явления, как изменение суммарной длины линии контакта шарошек с забоем скважины, что является фактором влияния формы поперечного сечения скважины на суммарное осевое усилие шарошечных инструментов.

Для разработки модели формирования суммарного осевого усилия, согласно допущениям, обоснованным в разделе 2.1.1, принято, что шарошки представляют собой гладкий недеформируемый конус, который перекачивается по гладкому недеформируемому забою скважины. Такое допущение позволяет оценить изменение осевых усилий при повороте инструмента, вызванное некруглой формой поперечного сечения без определения количественных значений реакции горной породы и суммарного осевого усилия P_{oc} [152]. При этом силы реакции горной породы пропорциональны суммарной длине L_{Σ} контакта шарошек (рисунок 3.2):

$$P_{oc} \propto \frac{L_{\Sigma}}{\cos(\gamma)} = \sum_{i=1}^m R_i(\Psi, \mu, S), \quad (3.1)$$

где R_i – радиус некруглого поперечного сечения (выражения 2.18–2.20);

S – степень скругления углов сопряжения стенок некруглого поперечного сечения.

Для поперечного сечения с двумя и четырьмя углами степень скругления S :

$$S_{2,4} = \frac{\sqrt{2} - \left(\frac{1}{\sin\left(\beta + \left(\frac{\pi}{4}\right)\right)} \right)}{\sqrt{2} - 1}. \quad (3.2)$$

Для треугольного поперечного сечения степень скругления S :

$$S_3 = 2 - \frac{1}{\sin\left(\beta + \left(\frac{\pi}{6}\right)\right)}. \quad (3.3)$$

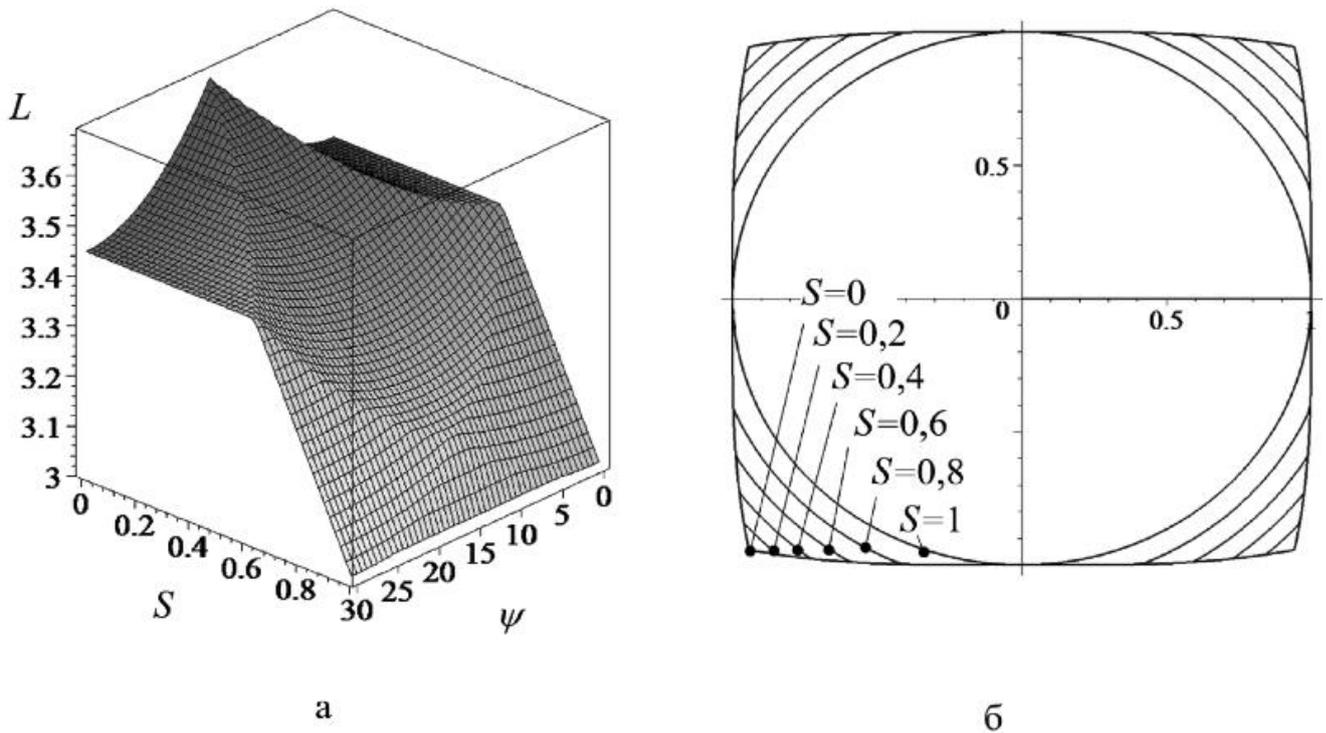


Рисунок 3.2 – Влияние степени скругления углов S поперечного сечения четырехугольной скважины при угле $\mu=60^\circ$ наклона секущей плоскости и единичном радиусе вписанной окружной $R_{min}=1$ на: а – суммарную длину линии контакта L_Σ трех шарошек с забоем в зависимости от угла поворота инструмента ψ ; б – форму поперечного сечения скважины

При степени скругления $S=0$ четырехугольного поперечного сечения за один оборот трехшарошечного инструмента образуется 12 экстремумов изменения суммарной длины линии контакта L_{Σ} , что соответствует такому же количеству экстремумов изменения осевого усилия. При увеличении значения S число экстремумов может удваиваться (рисунок 3.2, а), что влияет на частоту вынужденных колебаний бурового инструмента, обусловленных некруглой формой поперечного сечения, так как изменение осевого усилия от угла поворота инструмента будет способствовать образованию «ухабов» на поверхности забоя (волнистости забоя).

Значит, относительный размах нормированных значений суммарной длины линии контакта шарошек с забоем скважины L_0 характеризует влияние формы ее поперечного сечения и конструкции бурового инструмента на суммарное осевое усилие шарошечных инструмента:

$$L_0 = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max}}, \quad (3.4)$$

где L_{max} и L_{min} – максимальная и минимальная суммарная длина линии контакта шарошек с забоем за один оборот бурового инструмента.

Определено, что максимальная суммарная длина L_{max} линии контакта шарошек с забоем скважины достигается при определенных значениях угла Ψ поворота бурового инструмента:

$$\Psi = \frac{\pi}{2} + \arcsin\left(\frac{1}{S\sqrt{2}-\sqrt{2}-S}\right) \quad \text{для } n=4, m=2 \text{ и } S \leq 1;$$

$$\Psi = -\arcsin\left(\frac{1}{S-2}\right) - \frac{\pi}{6} \quad \text{для } n=3, m=2 \text{ и } S \leq 0,8453;$$

$$\Psi = \frac{\pi}{3} + \arcsin\left(\frac{1}{S\sqrt{2}-\sqrt{2}-S}\right) \quad \text{для } n=4, m=3 \text{ и } S \leq 0,6265;$$

$$\Psi = \frac{\pi}{4} \quad \text{для } n=2, m=2 \text{ и } S \leq 1;$$

$$\Psi = -\arcsin\left(\frac{1}{S\sqrt{2}-\sqrt{2}-S}\right) \quad \text{для } n=2, m=3 \text{ и } S \leq 0,6265.$$

Минимальная суммарная длина L_{min} линии контакта шарошек с забоем скважины также достигается при определенных значениях угла Ψ поворота бурового инструмента, которые в интервалах значений S , как в случае L_{max} , определены следующим образом:

$$\Psi = 0 \quad \text{для } n=4, m=2 \text{ и } S \leq 1;$$

$$\Psi = \frac{\pi}{6} \quad \text{для } n=3, m=2 \text{ и } S \leq 0,8453;$$

$$\Psi = 0 \quad \text{для } n=4, m=3 \text{ и } S \leq 0,6265;$$

$$\Psi = 0 \quad \text{для } n=2, m=2 \text{ и } S \leq 1;$$

$$\Psi = \frac{\pi}{12} \quad \text{для } n=2, m=3 \text{ и } S \leq 0,6265.$$

При получении четырехугольного ($n=4$) поперечного сечения скважины буровым инструментом с двумя шарошками ($m=2$):

$$L_0^{n=4, m=2} = \frac{\cos(\mu) \left(1 + \cos \left(2 \arcsin \left(\frac{1}{S\sqrt{2} - \sqrt{2} - S} \right) \right) \right)}{\sqrt{3} \sin(\mu) + \cos(\mu)}, \quad (3.5)$$

При получении треугольного ($n=3$) поперечного сечения скважины буровым инструментом с двумя шарошками ($m=2$):

$$\begin{aligned} L_0^{n=3, m=2} = & \left[4 \cos(V_1 + \pi/3) \cos(V_1) \cos(\mu) - 2\sqrt{3} \sin(\mu) (\cos(V_1 + \pi/3) - \right. \\ & \left. - \cos(V_1)) + \cos(V_1 + \pi/3) \cos(\mu) - \cos(V_1) \cos(\mu) + 2\sqrt{3} \sin(\mu) \right] \\ & / \left[(2\sqrt{3} \sin(\mu) \cos(\mu) (\cos(V_1 + \pi/3) - \cos(V_1)) + \right. \\ & \left. + \cos(V_1 + \pi/3) \cos^2(\mu) \sqrt{3} \sin(\mu) \cos^2(\mu) - \right. \\ & \left. - \cos(V_1) \cos^2(\mu) + 2\sqrt{3} \sin(\mu) \cos(\mu) - 12 \cos^2(\mu) + 12) / \cos(\mu) \right] \end{aligned} \quad (3.6)$$

где $V_1 = 2 \arcsin(1/(S-2)); S \leq 0,8453$.

При получении четырехугольного ($n=4$) поперечного сечения скважины буровым инструментом с тремя шарошками ($m=3$):

$$\begin{aligned}
L_0^{n=4,m=3} = & \left[12\sqrt{3}(\sin(\mu)\cos^2(\mu) - \sin(\mu)) - 9(\cos(\mu) - \cos^3(\mu)) - \right. \\
& - 12\cos(\mu)\cos(V)\cos(\pi/3+V) - 13\cos^3(\mu)\sin(\pi/6+V)\cos(V) + \\
& + 12\cos(\mu)\sin(\pi/6+V)\cos(V) - 6\sqrt{3}(\sin(\mu)\sin(\pi/6+V) - \\
& - \sin(\mu)\cos(\pi/3+V) + \sin(\mu)\cos(V)) + 13\cos^3(\mu)\cos(V)\cos(\pi/3+V) - \\
& - 12\cos(\mu)\sin(\pi/6+V)\cos(\pi/3+V) + 13\cos^3(\mu)\sin(\pi/6+V)\cos(\pi/3+V) - \\
& - 3(\cos(\pi/3+V)\cos(\mu) - \sin(\pi/6+V)\cos(\mu) - \cos(V)\cos(\mu) + \\
& + \cos^3(\mu)(\sin(\pi/6+V) + \cos(V) - \cos(\pi/3+V))) + 2\sqrt{3}\sin(\mu) \times \\
& \times (\cos^2(\mu)\sin(\pi/6+V)(\cos(V) - \cos(\pi/3+V)) - \cos(V)\cos(\pi/3+V)) + \\
& + 5\cos^3(\mu)\sin(\pi/6+V)\cos(V)\cos(\pi/3+V) + \\
& + 8\sqrt{3}\sin(\mu)\cos^2(\mu)(\sin(\pi/6+V) + \cos(V) - \cos(\pi/3+V)) + \\
& + 6\sqrt{3}\sin(\mu)\cos^2(\mu)\sin(\pi/6+V)\cos(V)\cos(\pi/3+V) \Big] / \\
& / \left[(54 - 27\sqrt{3}\sin(\mu)(\cos^3(\mu) + \cos(\mu)) - 99\cos^3(\mu) + 45\cos^4(\mu) - \right. \\
& - 6\cos^2(\mu)\sin(\pi/6+V)\cos(\pi/3+V) - 5\cos^4(\mu)\cos(V)(\sin(\pi/6 - \cos(\pi/3+V)) - \\
& - 6\cos^2(\mu)(\cos(V)\cos(\pi/3+V) - \sin(\pi/6+V)\cos(V)) + \\
& + \cos^4(\mu)(5\sin(\pi/6+V)\cos(\pi/3+V) + 18(\sin(\pi/6+V)\cos(V) - \cos(\pi/3+V))) - \\
& - 18\cos^2(\mu)(\sin(\pi/6+V) + \cos(V) - \cos(\pi/3+V)) + \\
& + 3\sqrt{3}\sin(\mu)\cos^3(\mu)\sin(\pi/6+V)(\cos(V) - \cos(\pi/3+V)) - \\
& - 3\sqrt{3}\sin(\mu)\cos^3(\mu)\cos(V)\cos(\pi/3+V) - 12\sqrt{3}\sin(\mu)\cos(\mu)(\sin(\pi/6+V) + \cos(V) - \\
& - \cos(\pi/3+V)) + 10\sqrt{3}\sin(\mu)\cos^3(\mu)(\sin(\pi/6+V) + \cos(V) - \cos(\pi/3+V))/\cos(\mu) \Big]
\end{aligned} \tag{3.7}$$

где $V = 2\arcsin(\sqrt{2}(S-1)-S)$; $S \leq 0,6265$.

При получении поперечного сечения скважины с двумя углами ($n=2$) буровым инструментом с двумя шарошками ($m=2$):

$$L_0^{n=2,m=2} = \frac{\cos(\mu)(1+\cos(V))}{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}, S \leq 1. \tag{3.8}$$

При получении поперечного сечения скважины с двумя углами ($n=2$) буровым инструментом с тремя шарошками ($m=3$):

$$L_0^{n=2,m=3} = \left[\sqrt{3}(4\cos(\mu)\cos(V)+6\sin(\mu))+6\sin(\mu)\cos(V)- \right. \\ \left. -3\cos(V)\cos(\mu)-6\sin(\mu)+3\cos(\mu) \right] \\ \left[3(3\sqrt{3}\sin(\mu)\cos(\mu)-6\sqrt{3}\cos^2(\mu)-4\sin(\mu)\cos(\mu)\cos(V)- \right. \\ \left. -2\cos^2(\mu)\cos(V)+2\sin(\mu)\cos(\mu)+\cos^2(\mu)+6\sqrt{3})/\cos(\mu) \right], S \leq 0,6265. \quad (3.9)$$

Установлено, что относительный размах нормированных значений суммарной длины контакта шарошек с забоем скважины L_0 , обусловленный некруглой формой поперечного сечения, меньше при более выпуклой форме стенок скважины (большем значении угла μ наклона секущей конус шарошки плоскости) и большем скруглении углов их сопряжения (рисунок 3.3). При поперечном сечении скважины с двумя и четырьмя углами относительный размах L_0 увеличивается при уменьшении количества шарошек с трех до двух. Данный относительный размах L_0 осевого усилия в случае двухшарошечного бурового инструмента при получении треугольного поперечного сечения меньше, чем при получении поперечного сечения скважины с двумя и четырьмя углами. Наименьшими из рассмотренных случаев значения данного относительного размах L_0 осевого усилия достигаются при получении четырехугольного поперечного сечения скважины трехшарошечным буровым инструментом.

Максимальное осевое усилие, пропорциональное максимальной суммарной длине линии контакта шарошек с забоем скважины за один оборот бурового инструмента, характеризует максимальное суммарное сопротивление забоя скважины, а значит, должно быть оценено как фактор, создающий нагрузку на вращательно-подающий механизм бурового станка и конструкцию бурового инструмента.

При получении четырехугольного ($n=4$) поперечного сечения скважины буровым инструментом с двумя шарошками ($m=2$):

$$L_{\max}^{n=4,m=2} = \frac{2R_{\min}(\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu))}{\sqrt{3}\sin(\mu)-\cos\left(2\arcsin\left(\frac{1}{S\sqrt{2}-\sqrt{2}-S}\right)\right)\cos(\mu)}, S \leq 1. \quad (3.10)$$

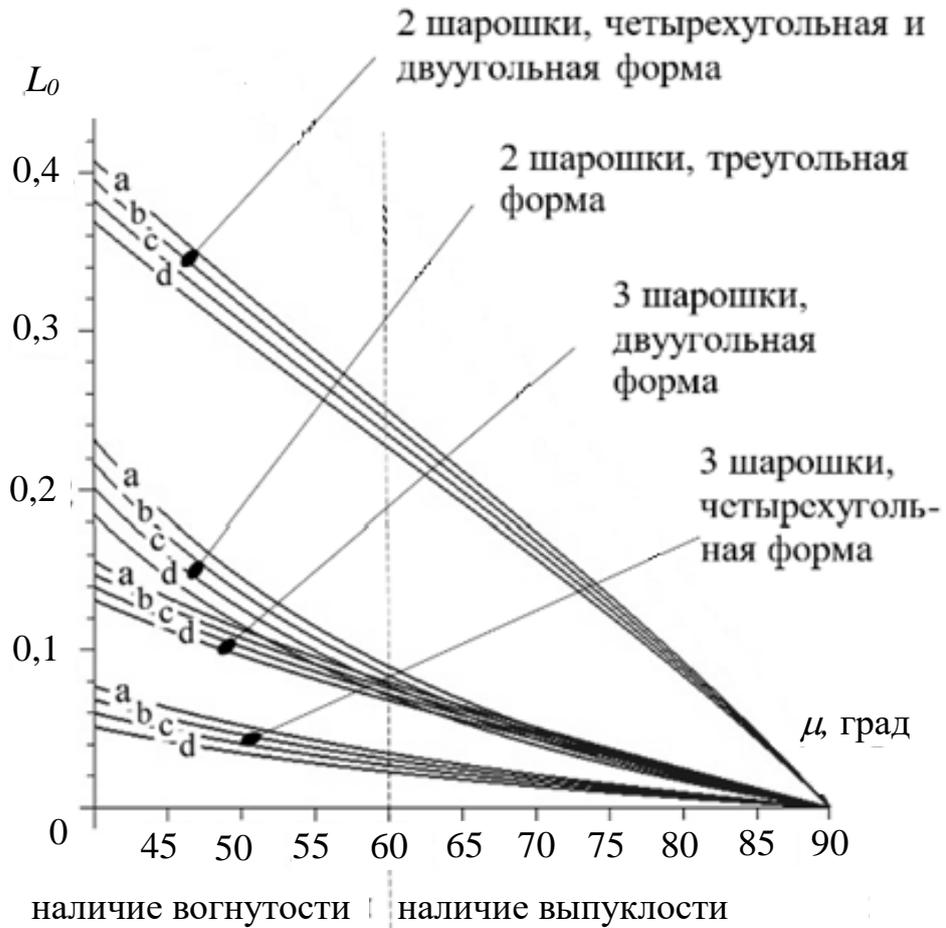


Рисунок 3.3 – Относительный размах нормированных значений суммарной длины контакта шарошек с забоем L_0 в зависимости от формы поперечного сечения скважины, угла μ и количества шарошек при: а) $S=0$; б) $S=0,05$; в) $S=0,1$; д) $S=0,15$

При получении треугольного ($n=3$) поперечного сечения скважины буровым инструментом с двумя шарошками ($m=2$):

$$L_{\max}^{n=3,m=2} = R_{\min} \left[-\cos(V_1 + \pi/3) \sqrt{3} \sin(\mu) \cos(\mu) + \cos(V_1) \sqrt{3} \sin(\mu) \cos(\mu) - \right. \\ \left. - \cos(V_1 + \pi/3) \cos^2(\mu) + \cos(V_1) \cos^2(\mu) - 2\sqrt{3} \sin(\mu) \cos(\mu) - 6 + 6 \cos^2(\mu) \right] \\ / \left[\cos(V_1 + \pi/3) (\cos(V_1) \cos^2(\mu) - \sqrt{3} \sin(\mu) \cos(\mu)) + \right. \\ \left. + \cos(V_1) \sqrt{3} \sin(\mu) \cos(\mu) - 3 + 3 \cos^2(\mu) \right] \quad (3.11)$$

где $V_1 = 2 \arcsin(1/(S-2))$; $S \leq 0,8453$.

При получении четырехугольного ($n=4$) поперечного сечения скважины буровым инструментом с тремя шарошками ($m=3$):

$$\begin{aligned}
 L_{\max}^{n=4,m=3} = R_{\min} & \left[\sqrt{3} \sin(\mu) \cos^2(\mu) \cos(V) \cos(\pi/3+V) - \right. \\
 & - \sqrt{3} \sin(\mu) \cos^2(\mu) \sin(\pi/6+V) (\cos(V) - \cos(\pi/3+V)) + \\
 & + 2 \sin(\mu) \cos^2(\mu) \sqrt{3} (\sin(\pi/6+V) + \cos(V) - \cos(\pi/3+V)) - \\
 & - \cos^3(\mu) \sin(\pi/6+V) (\cos(V) - \cos(\pi/3+V)) + \\
 & + \cos^3(\mu) \cos(V) \cos(\pi/3+V) + 9 \sqrt{3} \sin(\mu) \cos^2(\mu) - \\
 & - 6 \cos^3(\mu) (\sin(\pi/6+V) + \cos(V) - \cos(\pi/3+V)) + \\
 & 9 \cos^3(\mu) - 9 \sqrt{3} \sin(\mu) + 6 \sin(\pi/6+V) \cos(\mu) + 6 \cos(V) \cos(\mu) - \\
 & - 6 \cos(\pi/3+V) \cos(\mu) - 9 \cos(\mu) \Big] / \\
 & / \left[(\sqrt{3} \sin(\mu) \cos^2(\mu) (\sin(\pi/6+V) (\cos(\pi/3+V) + \cos(V) \cos(\pi/3+V) - \right. \\
 & - \sin(\pi/6+V) (\cos(V))) - \cos^3(\mu) \sin(\pi/6+V) (\cos(V) \cos(\pi/3+V) + \\
 & + 3 \sqrt{3} \sin(\mu) \cos^2(\mu) + 3 \cos^3(\mu) (\cos(\pi/3+V) - \sin(\pi/6+V) - \cos(V)) - \\
 & \left. - 3 \sqrt{3} \sin(\mu) - 3 \cos(\pi/3+V) \cos(\mu) + 3 \sin(\pi/6+V) \cos(\mu) + 3 \cos(V) \cos(\mu) \right] \quad (3.12)
 \end{aligned}$$

где $V = 2 \arcsin(\sqrt{2}(S-1)-S)$; $S \leq 0,6265$.

При получении поперечного сечения скважины с двумя углами ($n=2$) буровым инструментом с двумя шарошками ($m=2$):

$$L_{\max}^{n=2,m=2} = \frac{2R_{\min} \left[\sqrt{3} \sin(\mu) + \cos(\mu) \right]}{\sqrt{3} \sin(\mu) - \cos(V) \cos(\mu)}, \quad S \leq 1. \quad (3.13)$$

При получении поперечного сечения скважины с двумя углами ($n=2$) буровым инструментом с тремя шарошками ($m=3$):

$$L_{\max}^{n=2,m=3} = R_{\min} \frac{3\sqrt{3} \sin(\mu) - 2 \cos(V) \cos(\mu) + \cos(\mu)}{\sin(\mu) - \cos(V) \cos(\mu)}, \quad S \leq 0,6265. \quad (3.14)$$

Для сравнения суммарной длины L_{\max} линии контакта шарошек с забоем скважины определены значения R_{\min} , при которых площадь разных по количеству углов поперечных сечений одинаковая и равна площади круглого поперечного сечения диаметром 216 мм. Установлено, что максимальная суммарная длина L_{\max} линии контакта шарошек с забоем скважины при равной площади поперечного сечения скважины имеет наименьшие значения при образовании треугольного

поперечного сечения двумя шарошками, а наибольшие ее значения получены для случая образования поперечного сечения скважины с двумя углами тремя шарошками (рисунок 3.4). Увеличение количества шарошек при поперечных сечениях скважины с двумя и четырьмя углами приводит к увеличению значений L_{max} . Увеличении угла μ наклона секущей конус шарошки плоскости приводит к уменьшению значений L_{max} по мере приближения формы поперечного сечения к окружности, когда $\mu=90^0$. Увеличение притупления b углов сопряжения стенок скважины также приводит к уменьшению значений L_{max} , так же, как и размаха L_0 .

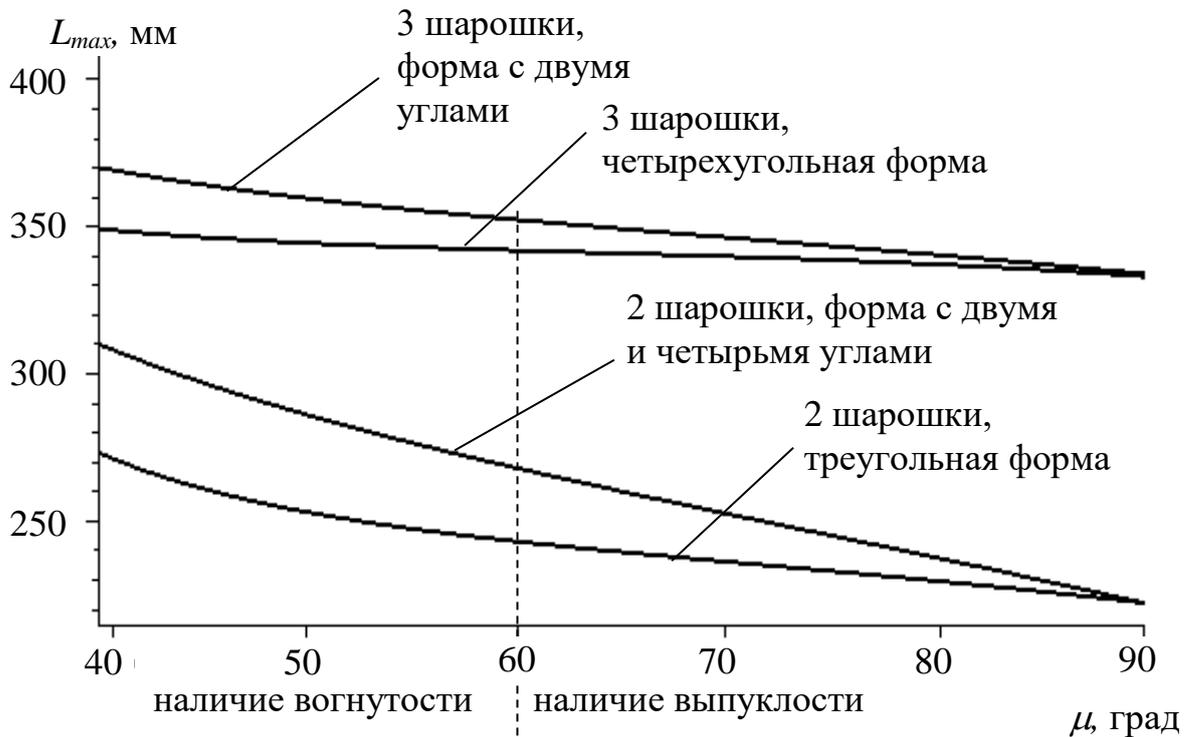


Рисунок 3.4 – Максимальная суммарная длина линии контакта шарошек с забоем скважины в зависимости от формы поперечного сечения скважины, угла μ и количества шарошек при $S=0$, $\gamma=15^0$ и площади поперечного сечения скважины, соответствующей площади круглого поперечного сечения скважины диаметром 216 мм

Наименьшее влияние угла μ наклона секущей конус шарошки плоскости на значения L_{max} наблюдается в случае образования четырехугольного поперечного сечения тремя шарошками, что может быть объяснено более равномерным расположением трех шарошек относительно четырех углов поперечного сечения скважины.

3.2 Разработка модели формирования момента, отклоняющего инструмент от оси его вращения и оценка характера его изменения

Каждая шарошка бурового инструмента при контакте с забоем скважины, имеющей некруглое поперечное сечение, производит разрушение участка забоя скважины разной длины в зависимости от угла поворота Ψ . Учитывая допущения, обоснованные в подразделе 2.1.1, а именно, то, что шарошка представлена в виде недеформируемого кругового конуса, который обкатывает недеформируемую коническую поверхность забоя скважины, возникающие реакции забоя от шарошек пропорциональны длине линии их контакта с забоем скважины. При этом векторы реакций забоя направлены к оси вращения бурового инструмента и наклонены к ней под постоянным углом γ . Таким образом, изменяющимися от угла поворота Ψ инструмента являются реакции забоя скважины P_1, P_2, P_3 , пропорциональные длине контакта конуса шарошек с забоем скважины (на рисунке 3.5 – отрезки OA, OB, OC , соответственно).

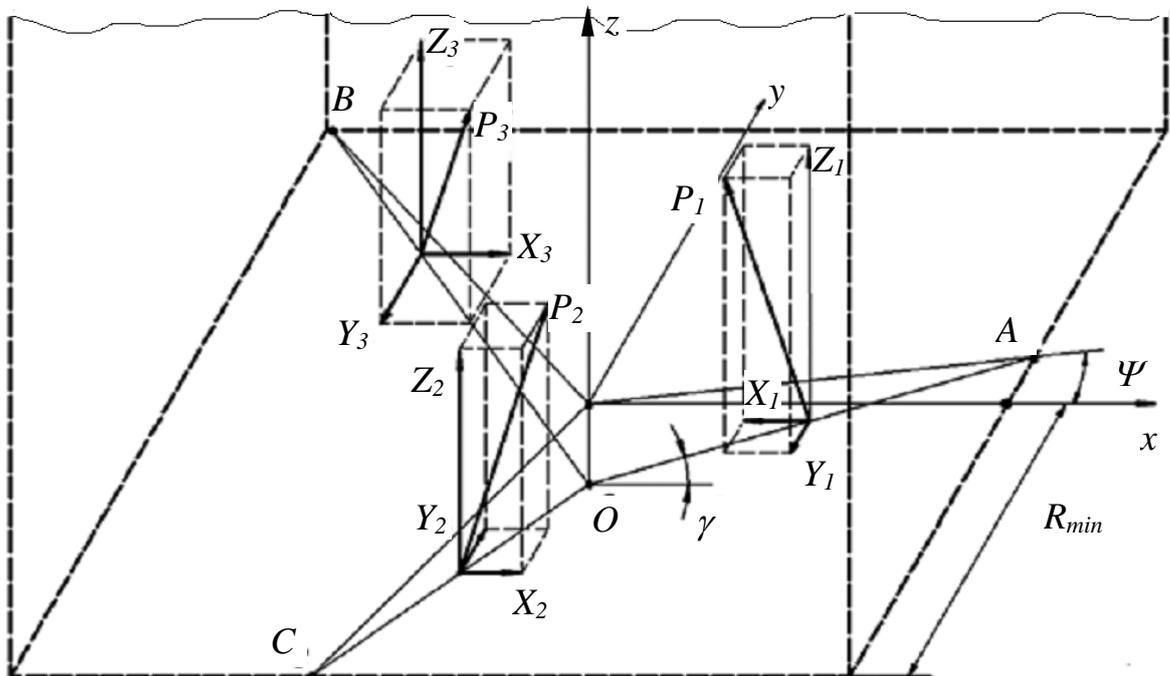


Рисунок 3.5 – Расчетная схема для определения момента, отклоняющего буровой инструмент от оси его вращения на примере с четырехугольным поперечным сечением и тремя шарошками

Если соотношение количества углов поперечного сечения скважины и количества шарошек многошарошечного бурового инструмента является равным 2:2, 2:4, 4:2, 3:3, то значения реакций забоя скважины от каждой симметрично расположенной шарошки равны между собой при любом угле поворота Ψ бурового инструмента. Если это соотношение является равным 2:3, 3:2, 3:4, имеются такие углы поворота Ψ , при которых значения реакций забоя скважины P_1, P_2, P_3 от шарошек и плечи их действия являются разными, что приводит к появлению момента, отклоняющего буровой инструмент от оси его вращения.

Проекция реакций забоя скважины P_1, P_2, P_3 на оси x, y, z (см. рисунок 3.5) для трехшарошечного бурового инструмента, соответственно:

$$\begin{cases} X_1 = -P_1 \cos(\Psi) \\ Y_1 = -P_1 \sin(\Psi) \\ Z_1 = P_1 \cos(\gamma) \end{cases}, \quad (3.15)$$

$$\begin{cases} X_2 = -P_2 \cos(\Psi + 120) \\ Y_2 = -P_2 \sin(\Psi + 120) \\ Z_2 = P_2 \cos(\gamma) \end{cases}, \quad (3.16)$$

$$\begin{cases} X_3 = -P_3 \cos(\Psi + 240) \\ Y_3 = -P_3 \sin(\Psi + 240) \\ Z_3 = P_3 \cos(\gamma) \end{cases}. \quad (3.17)$$

Проекция реакций забоя скважины P_1, P_2 на оси x, y, z для двухшарошечного бурового инструмента, соответственно:

$$\begin{cases} X'_1 = -P_1 \cos(\Psi) \\ Y'_1 = -P_1 \sin(\Psi) \\ Z'_1 = P_1 \cos(\gamma) \end{cases}, \quad (3.18)$$

$$\begin{cases} X'_2 = -P_2 \cos(\Psi + 180) \\ Y'_2 = -P_2 \sin(\Psi + 180) \\ Z'_2 = P_2 \cos(\gamma) \end{cases}, \quad (3.19)$$

Плечи действия проекции реакций X, Y, Z забоя скважины для трехшарошечного бурового инструмента:

$$\begin{cases} x_1 = R_1 \cos(\Psi)/2 \\ y_1 = R_1 \sin(\Psi)/2, \\ z_1 = R_1 \operatorname{tg}(\gamma)/2 \end{cases} \quad (3.20)$$

$$\begin{cases} x_2 = R_2 \cos(\Psi + 120)/2 \\ y_2 = R_2 \sin(\Psi + 120)/2, \\ z_2 = R_2 \operatorname{tg}(\gamma)/2 \end{cases} \quad (3.21)$$

$$\begin{cases} x_3 = R_3 \cos(\Psi + 240)/2 \\ y_3 = R_3 \sin(\Psi + 240)/2. \\ z_3 = R_3 \operatorname{tg}(\gamma)/2 \end{cases} \quad (3.22)$$

Тогда моменты реакций X , Y , Z забоя скважины для трехшарошечного бурового инструмента ($m=3$), относительно осей x , y , z , соответственно:

$$\begin{cases} M_x^{m=3} = (y_1 Z_1 - z_1 Y_1) + (y_2 Z_2 - z_2 Y_2) + (y_3 Z_3 - z_3 Y_3) \\ M_y^{m=3} = (z_1 X_1 - x_1 Z_1) + (z_2 X_2 - x_2 Z_2) + (z_3 X_3 - x_3 Z_3). \\ M_z^{m=3} = (x_1 Y_1 - y_1 X_1) + (x_2 Y_2 - y_2 X_2) + (x_3 Y_3 - y_3 X_3) \end{cases} \quad (3.23)$$

Плечи действия проекции реакций X , Y , Z забоя скважины для двухшарошечного бурового инструмента:

$$\begin{cases} x'_1 = R_1 \cos(\Psi)/2 \\ y'_1 = R_1 \sin(\Psi)/2, \\ z'_1 = R_1 \operatorname{tg}(\gamma)/2 \end{cases} \quad (3.24)$$

$$\begin{cases} x'_2 = R_2 \cos(\Psi + 180)/2 \\ y'_2 = R_2 \sin(\Psi + 180)/2, \\ z'_2 = R_2 \operatorname{tg}(\gamma)/2 \end{cases} \quad (3.25)$$

Моменты реакций X , Y , Z забоя скважины для двухшарошечного бурового инструмента ($m=2$), относительно осей x , y , z , соответственно:

$$\begin{cases} M_x^{m=2} = (y'_1 Z'_1 - z'_1 Y'_1) + (y'_2 Z'_2 - z'_2 Y'_2) \\ M_y^{m=2} = (z'_1 X'_1 - x'_1 Z'_1) + (z'_2 X'_2 - x'_2 Z'_2). \\ M_z^{m=2} = (x'_1 Y'_1 - y'_1 X'_1) + (x'_2 Y'_2 - y'_2 X'_2) \end{cases} \quad (3.26)$$

Модуль главного момента, отклоняющего буровой инструмент от оси его вращения:

$$M_0 = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}. \quad (3.27)$$

Установлено, что количество экстремумов за один оборот бурового инструмента M_0 зависит от количества шарошек и экстремумов длины радиуса поперечного сечения скважины: для четырехугольного поперечного сечения и трех шарошек это количество равно 12 (рисунок 3.6); для поперечного сечения с двумя углами и трех шарошек, а также для треугольного поперечного сечения и двух шарошек это количество равно 6 (рисунки 3.7, 3.8). Степень скругления S , угол μ наклона секущей плоскости и количество t шарошек влияют как на размах, так и на максимальные значения модуля главного момента M_0 . В случае четырехугольного поперечного сечения и трех шарошек увеличение значения степени скругления S от 0 до 0,6 (в относительных единицах) способствует уменьшению как размаха, так и максимальных значений модуля главного момента M_0 , а дальнейшее увеличение значения степени скругления S приводит к уменьшению его максимальных значений с увеличением размаха и смещением его максимальных значений на половину периода по углу ψ поворота бурового инструмента (рисунок 3.6).

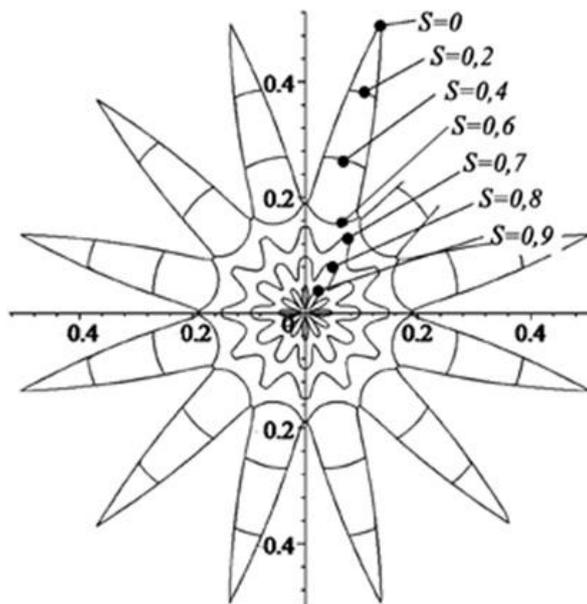


Рисунок 3.6 – Изменение модуля главного момента M_0 (Н·мм), отклоняющего буровой инструмент от оси вращения бурового инструмента в полярной системе координат в зависимости от угла ψ поворота бурового инструмента при различных значениях степени скругления S ($n=4$, $t=3$, $R_{min}=1$ мм, $\mu=60^\circ$)

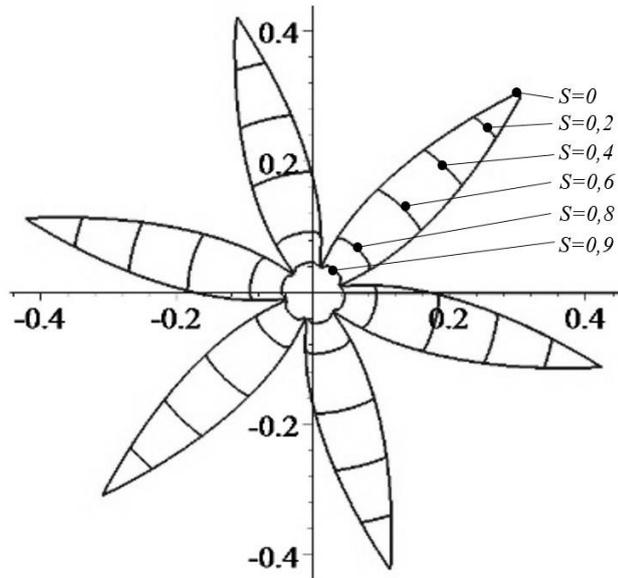


Рисунок 3.7 – Изменение модуля главного момента M_0 (Н·мм), отклоняющего буровой инструмент от оси вращения бурового инструмента в полярной системе координат в зависимости от угла Ψ поворота бурового инструмента при различных значениях степени скругления S ($n=2$, $m=3$, $R_{min}=1$ мм, $\mu=60^\circ$)

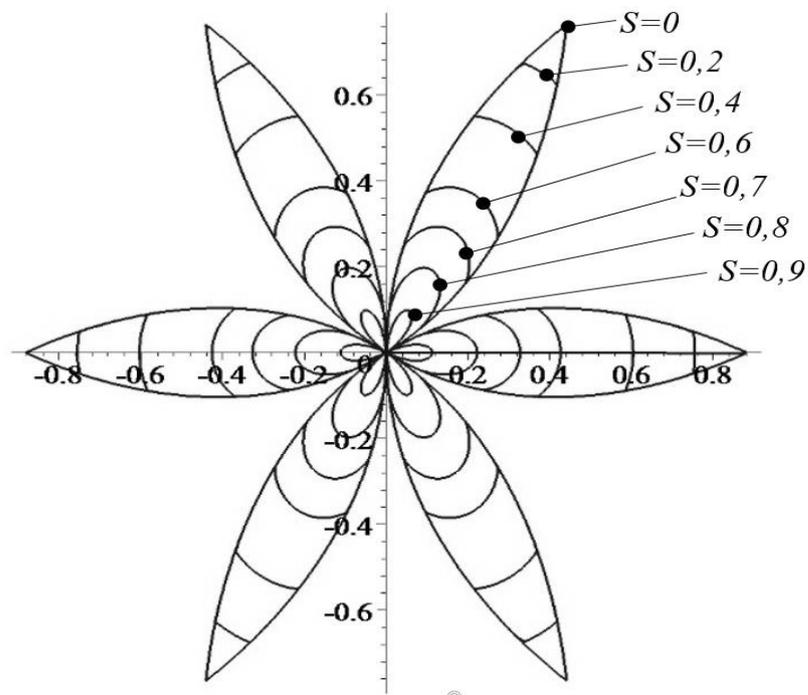


Рисунок 3.8 – Изменение модуля главного момента M_0 (Н·мм), отклоняющего буровой инструмент от оси вращения бурового инструмента в полярной системе координат в зависимости от угла Ψ поворота бурового инструмента при различных значениях степени скругления S ($n=3$, $m=2$, $R_{min}=1$ мм, $\mu=60^\circ$)

Значения возникающего отклоняющего момента M_0 являются наибольшими в случае получения треугольной формы поперечного скважины двухшарошечным буровым инструментом и наименьшие в случае получения четырехугольной формы поперечного скважины трехшарошечным буровым инструментом (рисунок 3.9).

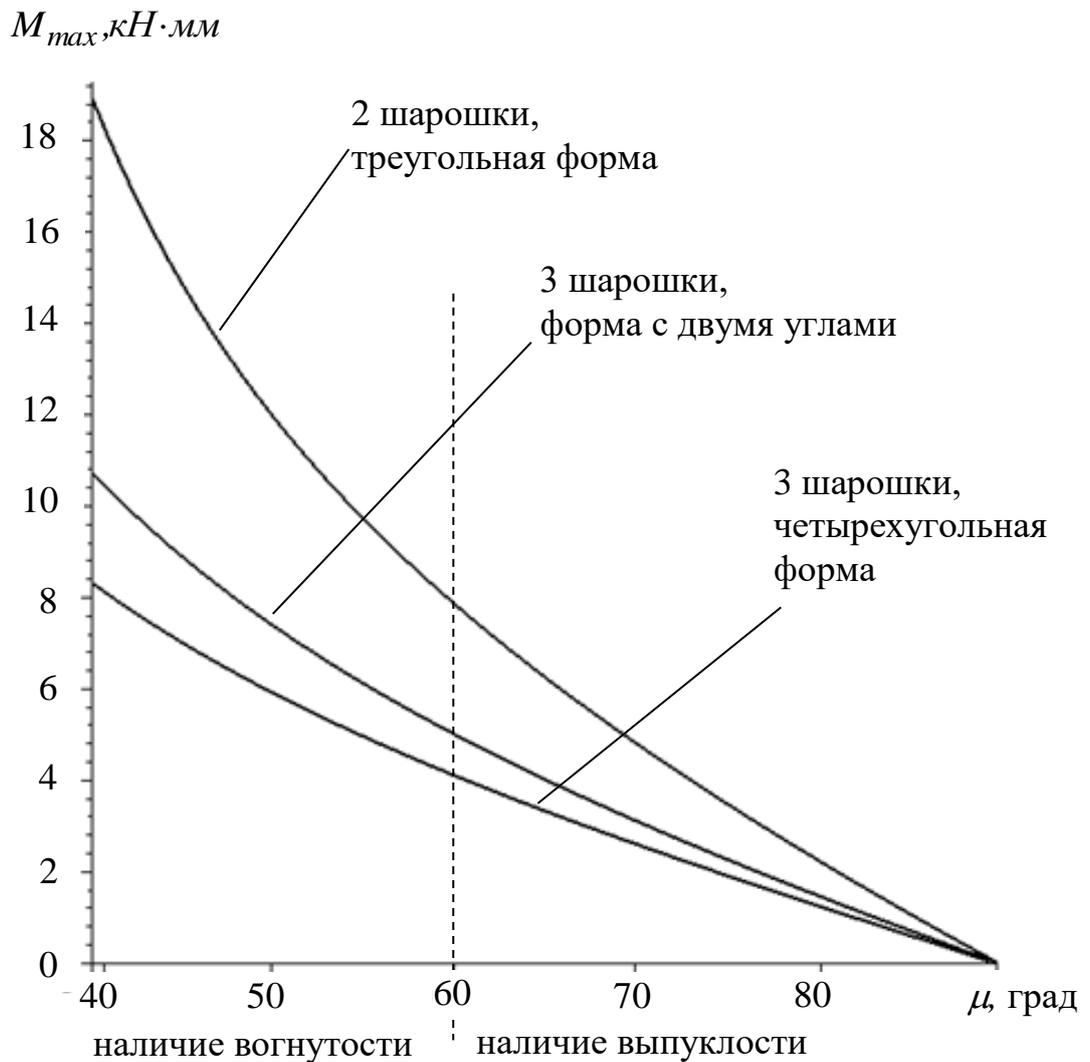


Рисунок 3.9 – Максимальные значения отклоняющего момента M_{max} в зависимости от формы поперечного сечения скважины, угла μ и количества шарошек при $S=0$, $\gamma=15^\circ$ и площади поперечного сечения скважины, соответствующей площади круглого поперечного сечения скважины диаметром 216 мм (значения при пропорциональности реакция забоя скважины длине линии контакта шарошек с забоем $lH=1\text{мм}$)

3.3 Разработка модели формирования крутящего момента на буровом инструменте и оценка характера его изменения

Крутящий момент на шарошечном буровом инструменте возникает вследствие наличия сопротивления перекатывания шарошек по забою скважины, которое определяется действием множества сил: силы трения в подшипниковой опоре; силы сопротивления подъему шарошек от продольных перемещений, вызванных неровностями поверхности забоя скважины, характером изменения осевого усилия и наличием вооружения шарошек; силы трения вооружения шарошек по горной породе и сопротивления ее скалыванию при несовпадении мгновенной оси вращения с вершинами вооружения шарошек и при наличии смещения в плане осей шарошек. Причем известны падающий характер крутящего момента на буровом инструменте от частоты его вращения и влияние на крутящий момент продольных колебаний бурового инструмента вместе с буровым ставом [139]. Таким образом, определение крутящего момента на буровом инструменте является достаточно сложной задачей.

В рамках принятых допущений, обоснованных в подразделе 2.1.1, шарошки представляют собой гладкий недеформируемый конус, который обкатывается по гладкому недеформируемому забою скважины. В этом случае появляется возможность учитывать параметры формы поперечного сечения и конструкции бурового инструмента, как факторы, возмущающие изменение крутящего момента на шарошечном буровом инструменте за один его оборот. В такой постановке задачи крутящий момент (при условии пропорциональности сопротивления перекатыванию шарошек нормальной реакции P забоя скважины и пропорциональности реакции P забоя скважины длине L линии контакта конуса шарошек с горной породой) определен следующей зависимостью:

$$M' = \sum_{i=1}^m \frac{L_i}{2} P_i \approx \sum_{i=1}^m \frac{L_i^2}{2} = \sum_{i=1}^m \frac{l}{2} \left(\frac{R_i(\Psi, \mu, S)}{\cos(\gamma)} \right)^2. \quad (3.28)$$

Относительный размах нормированных значений крутящего момента характеризует влияние формы поперечного сечения скважины и конструкции бурового

инструмента на его изменение за один оборот инструмента и определяется следующим образом:

$$M'_o = \frac{M'_{max} - M'_{min}}{M'_{max}}, \quad (3.29)$$

где M'_{max} и M'_{min} – максимальный и минимальный крутящие моменты за один оборот бурового инструмента.

Установлено, что относительный размах нормированных значений крутящего момента M'_o , обусловленный некруглой формой поперечного сечения, так же, как и относительный размах нормированных значений суммарной длины контакта шарошек с забоем скважины L_o , уменьшается при увеличении выпуклости стенок скважины и большем скруглении углов их сопряжения (рисунок 3.10).

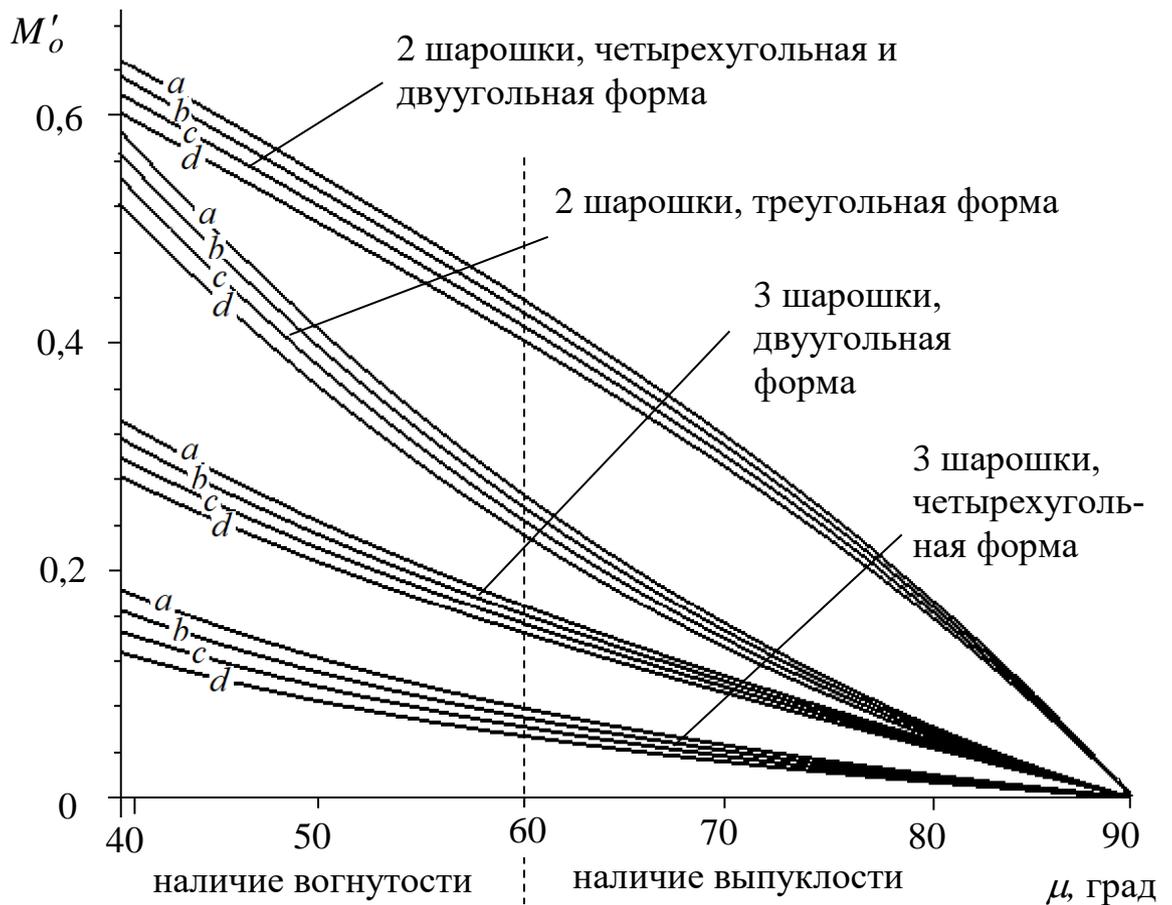


Рисунок 3.10 – Зависимость относительного размаха нормированных значений крутящего момента M'_o от формы поперечного сечения скважины, угла μ и количества шарошек при: а) $S=0$; б) $S=0,05$; в) $S=0,1$; д) $S=0,15$

Уменьшение относительного размаха M'_o способствует уменьшению возмущений изменения крутящего момента в процессе возникновения крутильных колебаний бурового инструмента.

Максимальный крутящий момент на буровом инструменте, возникающий за один его оборот, характеризует максимальное сопротивление перекачиванию шарошек по забою скважины, а значит должен быть оценен как фактор, создающий нагрузку на вращательно-подающий механизм бурового станка и конструкцию бурового инструмента. Установлено, что максимальный крутящий момент M'_{max} , при равном поперечном сечении скважины, так же, как и максимальная суммарная длина L_{max} линии контакта шарошек с забоем скважины, имеет наименьшие значения при образовании треугольного поперечного сечения двумя шарошками, а наибольшие его значения получены для случая образования поперечного сечения с двумя углами тремя шарошками (рисунок 3.11).

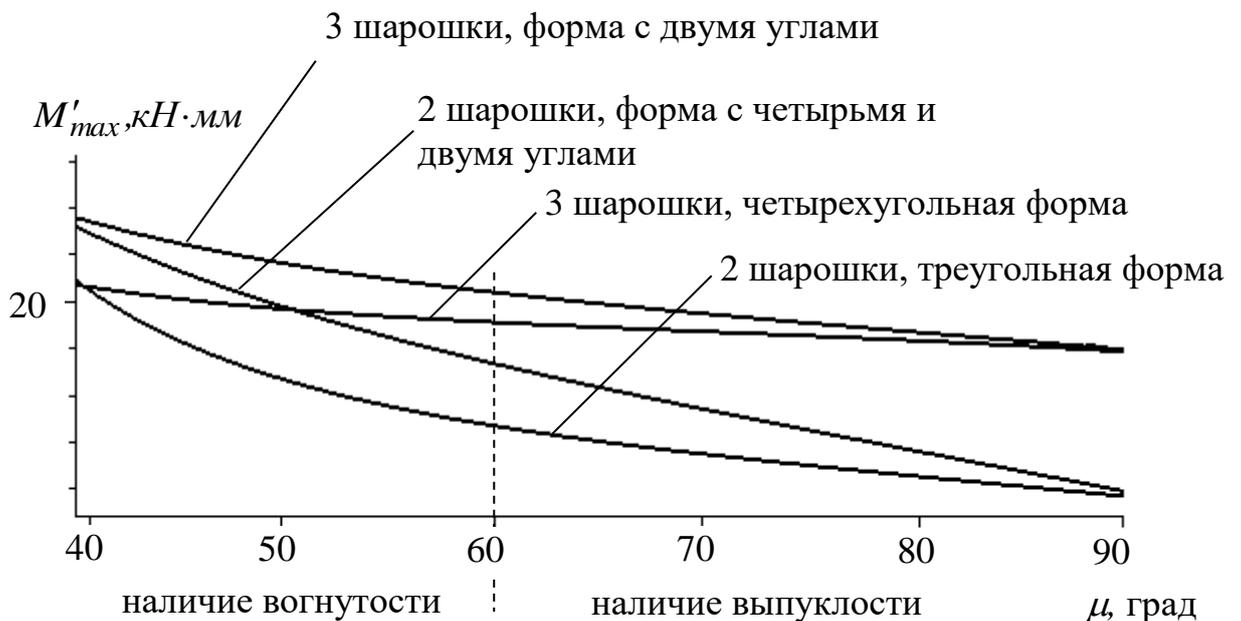


Рисунок 3.11 – Максимальные значения крутящего момента M'_{max}

в зависимости от формы поперечного сечения скважины, угла $μ$ и количества шарошек при $S=0$, $γ=15^0$ и площади поперечного сечения скважины, соответствующей площади круглого поперечного сечения скважины диаметром 216 мм (значения при пропорциональности силы сопротивления перекачиванию шарошек длине линии их контакта с забоем $lH=1мм$)

Однако, увеличение количества шарошек при четырехугольном поперечном сечении приводит к увеличению максимального крутящего момента при больших значениях углов наклона секущей плоскости (в частности, на рисунке 3.11 при $\mu > 50,4^\circ$). Наименьшее влияние угла μ наклона секущей плоскости на значения M'_{max} , так же, как и на значения L_{max} наблюдаются в случае образования четырехугольного поперечного сечения тремя шарошками, что может быть объяснено более равномерным расположением трех шарошек относительно четырех углов поперечного сечения скважины.

3.4 Обоснование рациональных параметров шарошечного инструмента по его силовому взаимодействию с забоем некруглой скважины

Для сравнительной оценки силового взаимодействия различных конструкций шарошечного бурового инструмента с забоем скважин, имеющих различное поперечное сечение использована методика, представленная в подразделе 2.2.1.

Практически для бурения взрывных скважин на открытых горных работах нашли применение трехшарошечные долота, которые также имеют большую устойчивость при опирании на три шарошки, чем в случае использовании двух шарошек, поэтому переход с двух шарошек на три шарошки обуславливает качественное улучшение силового взаимодействия бурового инструмента с забоем скважины и количество шарошек принято одним из критериев сравнительной оценки.

Критериями для сравнения различных вариантов по силовому взаимодействию бурового инструмента с забоем скважины приняты:

- количество шарошек бурового инструмента m ;
- относительный размах L_0 нормированных значений суммарной длины линии контакта шарошек с забоем скважины;
- максимальный момент M_{max} , отклоняющий инструмент от оси его вращения;
- относительный размах нормированных значений крутящего момента на буровом инструменте M'_o ;

- максимальный крутящий момент M'_{max} на буровом инструменте;
- максимальная суммарная длина L_{max} линии контакта шарошек с забоем скважины, поперечное сечение которой имеет площадь, равную площади круга диаметром 216 мм.

Значения указанных критериев, кроме количества шарошек, рассчитаны для 1050 вариантов, на основе определенных в подразделе 2.3.2 вариантов для оценки инструмента по конструктивным параметрам и дополнительно с учетом количества шарошек $m=2, 3$, при этом для треугольного поперечного сечения скважины количество шарошек принято одинаковым $m=2$, согласно выводам подраздела 2.4. Результаты сравнительной оценки частных критериев приведены в таблицах 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1 – Определение среднеквадратического отклонения частных критериев

Параметр	Частные критерии					
	m	L_0	M_{max}	M'_o	M'_{max}	L_{max}
$x_{i\ max}$	3	0,4076	3,147	0,6491	31,65	357,4
\bar{Y}_i	0,8	0,3320	0,1271	0,3891	0,5855	0,7934
$\sum_{j=1}^N (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2$	28	81,72	35,98	88,31	14,88	17,15
σ_i	0,1634	0,2791	0,1852	0,2901	0,1191	0,1279

Таблица 3.2 – Верхний треугольник корреляционной матрицы нормированных значений критериев

$r(i,j)$	m	L_0	M_{max}	M'_o	M'_{max}	L_{max}
m	1	-0,6090	0,1168	-0,6153	0,4240	0,8804
L_0		1	-0,01338	0,9897	0,3939	-0,1821
M_{max}			1	0,1083	0,02381	0,0421
M'_o				1	0,3591	-0,2097
M'_{max}					1	0,78069
L_{max}						1

Критическое значение распределения Стьюдента для двухсторонней критической области для уровня значимости $\alpha=0,05$ и числа степенной свободы $k=N-2=1050-2=1048$ равно $t_{кр}(\alpha;k)=1.962$ [123].

Согласно (2.33) частные критерии x_i считаются коррелированными, если их коэффициенты корреляции $r(i,j)$ больше 0,0605. Согласно таблице 3.2, не коррелирующими критериями являются пары M_{max} и L_0 , M_{max} и L_{max} , M_{max} и M'_{max} . Однако, критерий M_{max} коррелирует с критерием M'_o , который имеет наибольшую значимость ($\sigma_i=0,2901$). В свою очередь критерий M'_o коррелирует с критериями m , L_0 , и L_{max} . Поэтому для сравнительной оценки вариантов следует оставить один частный критерий – относительный размах нормированных значений крутящего момента на буровом инструменте M'_o , который имеет большее значение средне-квадратичного отклонения ($\sigma_i=0,2901$).

Отобраны представительные оцениваемые варианты, в том числе которые имеют максимальны и минимальные значения частного критерия M'_o , а также варианты с максимальным и минимальным значением интегрального критерия, которые представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Варианты форм поперечного сечения и значения интегрального критерия по конструктивным параметрам

Вариант, j	m	n	α , град	b , мм	μ , град	Частный критерий	U_j
						M'_o	
1	2	4	50	0	80	0,508	0,220
2	2	3	83,6	30	40	0,456	0,300
3	2	3	83,6	0	80	0,0636	0,910
4	2	3	83,6	30	80	0,0389	0,948
5	2	4	50	0	40	0,649	0

Продолжение таблицы 3.3

Вариант, j	m	n	a	b	μ	Частный критерий	U_j
						M'_o	
6	2	4	50	30	40	0,574	0,117
7	2	2	50	30	80	0,134	0,800
8	2	4	50	30	80	0,134	0,800
9	2	3	82,8	0	40	0,586	0,0986
10	3	4	60	30	80	0,00553	1
11	2	2	60	0	80	0,176	0,735
12	2	2	56	0	40	0,649	0
13	2	2	60	30	40	0,581	0,106
14	2	2	50	0	40	0,649	0
15	3	4	50	0	80	0,0202	0,977
16	3	2	50	30	40	0,262	0,602
P						1	–

Согласно данным, представленным в таблице 3.3, сравнительная оценка шарошечного инструмента по силовым параметрам показала, что наиболее эффективным является вариант номер 10, при котором значение относительного размаха нормированных значений крутящего момента M'_o является минимальным и происходит получение четырехугольного поперечного сечения скважины с максимальным из рассмотренных притуплении углов ($b=30$ мм) трехшарошечным буровым инструментом.

Наихудшими являются варианты 5, 12 и 14 для получения поперечного сечения с двумя и четырьмя углами, не имеющими скругления, двухшарошечным буровым инструментом, который имеет максимальное значение относительного размаха нормированных значений крутящего момента M'_o .

3.5 Выводы

1. Разработанные модели формирования силовых параметров взаимодействия шарошечного инструмента с забоем некруглой скважины позволили установить, что конструктивные параметры и форма и параметры поперечного сечения скважины с угловыми концентраторами напряжений, являются факторами, влияющими на характер изменения за один оборот осевого усилия, крутящего момента и момента, отклоняющего буровой инструмент от оси его вращения, которые определены из условия пропорциональности реакций забоя скважины и сопротивления перекачиванию шарошек длине линии их контакта с забоем скважины.

2. Момент, отклоняющий буровой инструмент от оси его вращения, возникает при дробной кратности отношения количества углов поперечного сечения скважины к количеству шарошек: при образовании поперечного сечения с двумя и четырьмя углами тремя шарошками, а также при образовании поперечного сечения с тремя углами двумя шарошками. При образовании четырехугольного поперечного сечения тремя шарошками возникающие максимальные значения момента, отклоняющего буровой инструмент от оси его вращения, размахи нормированных значений осевого усилия и крутящего момента являются наименьшими. Максимальные значения осевого усилия и крутящего момента являются наименьшими при образовании треугольного поперечного сечения двумя шарошками. Максимальные значения и относительные размахи нормированных значений силовых параметров уменьшаются при увеличении выпуклости и притупления углов сопряжения стенок скважины.

3. Относительный размах нормированных значений осевого усилия, пропорциональный размаху суммарной длины линии контакта шарошек с забоем скважины за один оборот бурового инструмента, обусловленный некруглой формой поперечного сечения, при поперечных сечениях с двумя и четырьмя углами увеличивается при уменьшении количества шарошек с трех до двух. Данный относительный размах осевого усилия в случае двухшарошечного бурового

инструмента при получении треугольного поперечного сечения меньше, чем при получении поперечных сечений скважины с двумя и четырьмя углами.

4. Максимальное осевое усилие, пропорциональное максимальной суммарной длине линии контакта шарошек с забоем скважины за один оборот бурового инструмента, обусловленное некруглой формой поперечного сечения скважины, при равной его площади, при поперечных сечениях с двумя и четырьмя углами увеличивается при увеличении количества шарошек с двух до трех.

5. Максимальный крутящий момент на буровом инструменте за один его оборот (при условии пропорциональности сопротивления перекачиванию шарошек длине линии контакта шарошек с забоем скважины и при равной его площади), при поперечном сечении с двумя и четырьмя углами больше, чем при четырехугольно поперечном сечении в случае трехшарошечного бурового инструмента при больших значениях угла μ наклона секущей плоскости.

6. Определено, что сравнительная оценка силового взаимодействия конструкций шарошечного бурового инструмента с забоем скважин, имеющих различное поперечное сечение с помощью функции полезности производится с использованием одного критерия – относительного размаха нормированных значений крутящего момента на буровом инструменте (M'_o). Установлено, что наиболее эффективной по силовым параметрам является конструкция (интегральный критерий $U=1,000$) при которой обеспечивается минимальное значение относительного размаха нормированных значений крутящего момента на буровом инструменте ($M'_o=0,00553$), когда происходит получение четырехугольного поперечного сечения скважины трехшарошечным буровым инструментом с шарошками, имеющими максимальный угол конусности ($\alpha=60^0$), который достигается при четырехугольном поперечном сечении, максимальном из рассмотренных значениях притупления углов сопряжения стенок скважины ($b=30$ мм) и максимальной выпуклости их сторон, полученной при максимальном из рассмотренных значениях угла наклона секущей плоскости ($\mu=80^0$).

4 ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ И РАЗРАБОТКА СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ ШАРОШЕЧНОГО ИНСТРУМЕНТА

4.1 Сравнительная оценка шарошечного инструмента на основании комплексной оценки его эффективности для бурения взрывных скважин с различными формой и параметрами некруглого поперечного сечения

Для сравнительной оценки эффективности различных вариантов по интегральному критерию использованы частные критерии, определенные с точки зрения эффективности действия взрыва (подраздел 2.2), по конструктивным (подраздел 2.3) и силовым параметрам (подраздел 3.4):

- количество углов сопряжения стенок скважины n ;
- притупление углов сопряжения стенок скважины b , мм;
- относительный размах радиусов R_0 ;
- угол конусности шарошки α , град;
- угол μ наклона секущей плоскости к оси вращения шарошки, град;
- относительный размах нормированных значений крутящего момента на буровом инструменте M'_0 .

Притупление углов сопряжения стенок скважины b является значимым частным критерием как с точки зрения эффективности действия взрыва, так и по конструктивным параметрам. Для сравнительной оценки по интегральному критерию частный критерий – притупление углов сопряжения стенок скважины b , учтен один раз, в качестве критерия с точки зрения эффективности действия взрыва. Такое решение принято, так как при меньших значениях притупления b , при которых выступающая часть тела шарошки более тонкая и происходит снижение ее прочности, при этом имеется потенциальная возможность увеличить прочность другими способами, пока не известными, в то время как нивелировать влияние притупления b с точки зрения эффективности действия взрыва не представляется возможным.

Комбинация максимальных и минимальных значений частных критериев позволила провести сравнительную оценку по 40 вариантам конструктивного исполнения бурового инструмента, результаты которой приведены в таблицах 4.1–4.3.

Таблица 4.1 – Определение среднеквадратического отклонения частных критериев

Параметр	Частные критерии					
	n	b	R_0	α	μ	M'_o
$x_{i \max}$	4	30	0,6114	83,6	80	0,649
\bar{Y}_i	0,75	0,5	0,4160	0,7252	0,75	0,4008
$\sum_{j=1}^N (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2$	2	10	3,292	0,8430	2,5	4,924
σ_i	0,2265	0,5064	0,2906	0,1470	0,2532	0,3553

Таблица 4.2 – Верхний треугольник корреляционной матрицы нормированных значений критериев

$r(i,j)$	n	b	R_0	α	μ	M'_o
n	1	0	-0,003779	$-7,735 \cdot 10^{-17}$	0	0,09327
b		1	0,11789	0	0	-0,1251
R_0			1	0,2596	-0,9356	-0,7835
α				1	0	-0,05299
μ					1	0,7766
M'_o						1

Критическое значение распределения Стьюдента для двухсторонней критической области для уровня значимости $\alpha=0,05$ и числа степенной свободы $k=N-2=40-2=38$ равно $t_{кр}(\alpha;k)=2.021$ [123].

Согласно (2.33) частные критерии x_i считаются коррелированными, если их коэффициенты корреляции $r(i,j)$ больше 0,3115. На основании этого, согласно таблице 4.2, имеется группа некоррелированных частных критериев n , α , b и μ . Из коррелирующих критериев R_0 и μ оставляем критерий R_0 , который имеет

большую значимость ($\sigma=0,2906$). Далее, из оставшихся коррелирующих критериев R_0 и M'_0 оставляем критерий M'_0 , который имеет большую значимость ($\sigma=0,3553$). Таким образом для комплексной оценки определена группа частных критериев, которые приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Варианты форм параметров бурового инструмента и формы поперечного сечения и значения интегрального критерия

Вариант, j	μ , град	m	Частные критерии, i				U_j
			n	α , град	b , мм	M'_0	
1	40	2	2	50	30	0,581	0,0304
2	40	2	2	60	30	0,581	0,0658
3	40	3	2	50	30	0,262	0,173
4	40	3	2	60	30	0,262	0,208
5	40	2	4	50	30	0,574	0,217
6	80	2	2	50	30	0,134	0,230
7	40	2	4	60	30	0,574	0,252
8	80	2	2	60	30	0,134	0,265
9	80	3	2	50	30	0,0332	0,275
10	40	2	3	82,8	30	0,456	0,294
11	40	2	3	83,6	30	0,456	0,297
12	80	3	2	60	30	0,033	0,311
13	40	2	2	50	0	0,649	0,410
14	80	2	4	50	30	0,134	0,414
15	40	3	4	50	30	0,098	0,430
16	40	2	2	60	0	0,649	0,445
17	80	2	4	60	30	0,134	0,449
18	40	3	4	60	30	0,098	0,465
19	80	3	4	50	30	0,00553	0,471
20	80	2	3	82,8	30	0,0388	0,481

Продолжение таблицы 4.3

Вариант, <i>j</i>	μ , град	<i>m</i>	Частные критерии, <i>i</i>				U_j
			<i>n</i>	α , град	<i>b</i> , мм	M'_o	
21	80	2	3	83,6	30	0,0388	0,483
22	80	3	4	60	30	0,00553	0,506
23	40	3	2	50	0	0,332	0,552
24	40	3	2	60	0	0,332	0,587
25	40	2	4	50	0	0,649	0,593
26	80	2	2	50	0	0,176	0,621
27	40	2	4	60	0	0,649	0,629
28	40	2	3	82,8	0	0,586	0,646
29	40	2	3	83,6	0	0,586	0,649
30	80	2	2	60	0	0,176	0,657
31	80	3	2	50	0	0,0509	0,677
32	80	3	2	60	0	0,0509	0,713
33	40	3	4	50	0	0,183	0,802
34	80	2	4	50	0	0,176	0,805
35	40	3	4	60	0	0,183	0,837
36	80	2	4	60	0	0,176	0,840
37	80	3	4	50	0	0,0202	0,874
38	80	2	3	82,8	0	0,0636	0,879
39	80	2	3	83,6	0	0,0636	0,882
40	80	3	4	60	0	0,0202	0,910
<i>P</i>			0,1833	0,1190	0,4100	0,2877	–

Согласно данным, представленным в таблице 4.3, комплексная сравнительная оценка шарошечного инструмента по интегральному критерию показала, что наиболее эффективным является вариант номер 40 ($U=0,910$), при котором происходит получение четырехугольного поперечного сечения скважины

трехшарошечным буровым инструментом, шарошки которого имеют максимально возможный для четырехугольного поперечного сечения угол конусности ($\alpha=60^0$). При этом наибольшее количество углов поперечного сечения скважины ($n=4$) оказывает положительное влияние как на эффективность действия взрыва (подраздел 2.3.2), так и на силовые параметры (подраздел 3.4). Наибольшее из рассмотренных значение угла наклона секущей плоскости ($\mu=80^0$) оказывает положительное влияние как на конструкцию бурового инструмента (подраздел 2.4.1), так и на силовые параметры (подраздел 3.4). Полученное отношение количества углов некруглого поперечного сечения скважины к количеству шарошек ($4/3$) является наиболее предпочтительным с точки зрения эффективности по силовым параметрам (подраздел 3.4). Образование некруглого поперечного сечения скважины без притупления углов сопряжения ее стенок ($b=0$) является наиболее предпочтительным с точки зрения эффективности действия взрыва (подраздел 2.3.2).

Имеющим близкое к максимальному значение интегрального критерия является вариант номер 39 ($U=0,882$), при котором происходит получение треугольного поперечного сечения скважины двухшарошечным буровым инструментом и обеспечивается наибольший угол конусности шарошек ($\alpha=83,6^0$). Поэтому целесообразна разработка схемных решений шарошечного бурового инструмента, в которых предусмотрено использование как трех, так и двух шарошек.

4.2 Разработка схемных решений шарошечного инструмента для бурения некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений

Для разработки схемных решений шарошечного бурового инструмента послужили результаты исследований, полученные во втором и третьем разделе:

1. Необходимость обеспечения передаточного отношения долота (i), равным 1,5 и 2 для возможности получения двуугольного, треугольного и четырехугольного поперечных сечений, при которых углы конусности α шарошек должны иметь значения, не более 83,6 (для треугольного сечения) и 60 (для двуугольного

и четырехугольного сечения) градусов для получения вогнутой или плоской формы забоя скважины (подраздел 2.1). Выполнение шарошек одноконусными с такими углами конусности в условиях уменьшенных размеров подшипниковых опор шарошек обуславливает необходимость разработки схемных решений, направленных на обеспечение ремонтпригодности шарошечного бурового инструмента и снижение нагрузок на шарошки, которые формируют некруглое поперечное сечение скважины.

2. С точки зрения повышения эффективности действия взрыва требуется обеспечение форм поперечного сечения скважин с большим относительным размахом радиусов, получаемых при меньшем притуплении углов сопряжения стенок скважины и большем угле наклона секущей конус шарошки плоскости (подраздел 2.2), что предъявляет особые требования к прочности тела шарошки, так как в этом случае конструктивные параметры бурового инструмента ухудшаются (подраздел 2.3). При этом для обеспечения более надежной кинематической связи требуется выполнение вооружения шарошек зубчатым, по крайней мере, в периферийной их части. В этом случае зубья шарошек в периферийной их части должны являться ребрами жесткости участков тела шарошек, формирующих углы сопряжения стенок скважины с некруглым поперечным сечением.

3. С точки зрения уменьшения отрицательного влияния некруглой формы поперечного сечения скважины на силовое взаимодействие бурового инструмента с забоем скважины (в части возникновения изменений нагрузок за один оборот инструмента, установленного в подразделе 3.4), а также с точки зрения эффективности по комплексу показателей (подраздел 4.1), требуется разработка схемных решений, которые предусматривают использование как двух, так и трех шарошек.

Снижение нагрузок на шарошки, формирующие некруглое поперечное сечение скважины, возможно, когда происходит уменьшение разрушаемой ими площади забоя скважины. Это может быть достигнуто в комбинированном буровом инструменте, в котором кроме формирующих некруглое поперечное сечение шарошек имеются другие породоразрушающие органы [153]. В исследования, направленные на обеспечение ремонтпригодности шарошечного бурового

инструмента, наибольший вклад внесли Буткин В. Д. [154], Гилев А. В. [154, 155], Гребенников Н. В. [156]. При этом основным способом повышения ремонтпригодности шарошечного бурового инструмента является обеспечение его разборности, обеспечивающей замену шарошек и их подшипниковых опор. Поэтому разработаны схемные решения шарошечных буровых инструментов, в которых достигается уменьшение нагрузки на шарошки, формирующие некруглое поперечное сечение, которые представляют собой разборные шарошечные расширители.

Разборный шарошечный расширитель по патенту РФ на полезную модель №141741 (рисунок 4.1) [157] имеет корпус 1, к которому разъемно крепятся лапы 2, например, при помощи болтов 3. На лапы 1 с возможностью демонтажа установлены шарошки 4. Тело шарошек 4 имеет сквозное осевое отверстие, в котором установлены сменные подшипники 5 и 6, способные воспринимать радиальную и разнонаправленную осевую нагрузку. Это достигается тем, что подшипники 6 и 7 установлены в распор, в сквозном осевом отверстии шарошек 4, с разных ее сторон. Шарошки 4 зафиксированы со стороны вершины ее конуса при помощи подшипника 6, способного воспринимать от шарошек 4 обратную осевую нагрузку. Это достигается тем, что внутренне кольцо подшипника 6 застопорено на конце лапы 2 посредством съемного стопорящего элемента, выполненного, например в виде гайки 7 со стопорной шайбой 8.

Присоединенный к резьбовой муфте 10 опережающий буровой инструмент, например шарошечное буровое долото, производит образование опережающего уступа скважины, и таким образом освобождает место для узла фиксации шарошек 4 со стороны их вершины. Узел фиксации шарошек 4 со стороны их вершины не требует дополнительного места в нагруженной зоне подшипникового узла, поэтому обеспечивается увеличение прочности и долговечности сменных шарошек 4 и их опор, включающих лапы 2 и подшипники 5 и 6.

Замена лап 2 с шарошками 4 производится путем отвинчивания болтов 3 и снятия лап 2, а также снятия шарошек 4, путем разборки их подшипникового узла. Для этого снимают стопорную шайбу 8, откручивают гайку 7, и затем демонтируют подшипники 5 и 6.

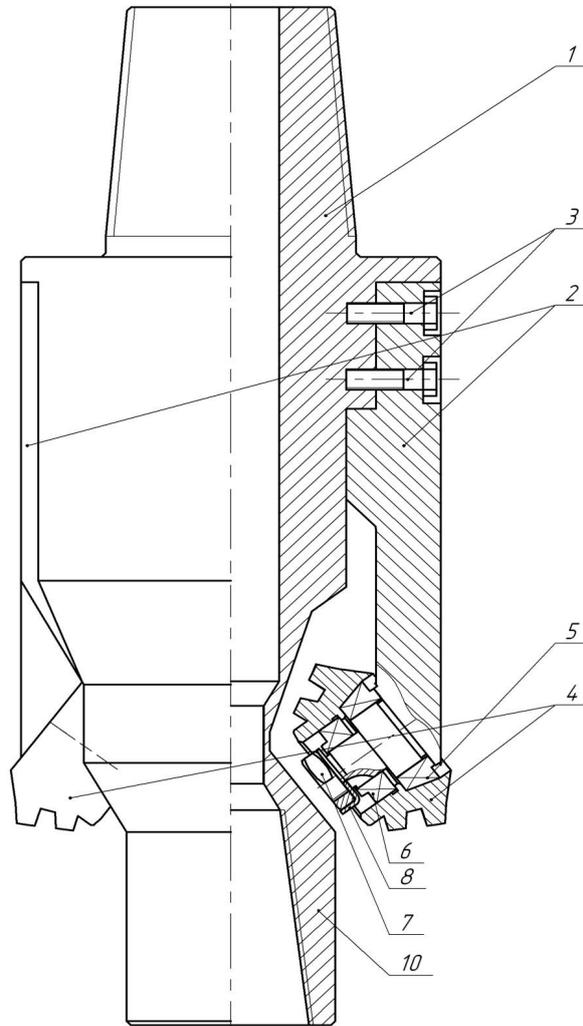


Рисунок 4.1 – Разборный шарошечный расширитель по патенту РФ на полезную модель №141741 [157]

Разборный шарошечный расширитель по патенту РФ на изобретение №2548274 (рисунок 4.2) [158] имеет корпус 1, к которому, например при помощи болтов 2, разъемно закреплены лапы 3 со съемными шарошками 4 на сменных подшипниках 5 и 6. Подшипники 5 и 6 совместно способны воспринимать радиальную и разнонаправленную осевую нагрузку. При этом подшипник 6 выполнен таким образом, что способен воспринимать осевую нагрузку, направленную от вершины шарошек. Корпус 1 удлинен в сторону забоя и для обеспечения формирования опережающей скважины меньшего диаметра снабжен на конце породоразрушающими элементами или устройством для их присоединения, например в виде резьбовой муфты 7. Шарошки 4 застопорены узлами фиксации, которые расположены со стороны вершины их конуса и выполнены в виде упора 8

на корпусе 1. Упор 8 стопорит в сквозном осевом отверстии шарошек 4 подшипник 6, так как уперт в его внутренне кольцо. Такая конструкция обеспечивает вынесение узла фиксации шарошек 4 в наименее нагруженную зону, а значит увеличение прочности и долговечности съемных шарошек 4 и их подшипниковых опор.

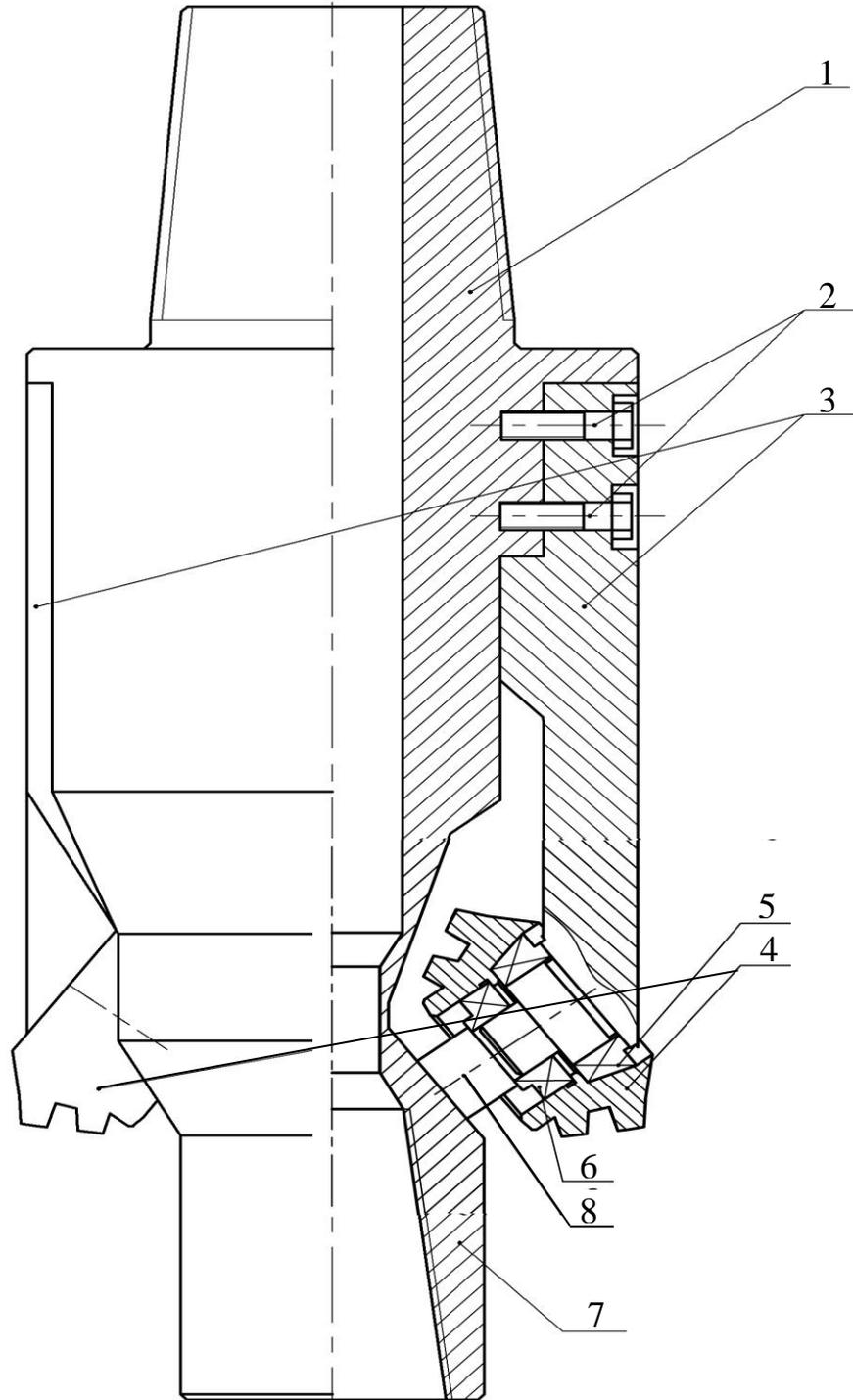


Рисунок 4.2 – Разборный шарошечный расширитель по патенту РФ на изобретение №2548274 [158]

Разборный шарошечный расширитель по патенту РФ на изобретение №2549336 (рисунок 4.3) [159] имеет лапы 1, снабженные с одной стороны хвостовиками, а с другой – шарошками 2. Чаще всего на практике применяют три лапы 1, также может быть применено две лапы 1 с соответствующим количеством шарошек 2. Также имеется корпус-муфта, который состоит из верхней 3 с кольцевой выточкой и нижней 4 частей, которые образуют пространство с проемом для лап 1. В верхнюю часть 3 корпуса-муфты ввинчен переводник 5 с устройством соединения, например, резьбовым ниппелем для свинчивания с буровой штангой. В этом случае направление резьбы ниппеля, совпадающее с направлением вращения при бурении, является одинаковым с направлением резьбы, соединяющей переводник 5 с верхней частью 3 корпуса-муфты. В переводнике 5 выполнен центральный воздушный канал.

Имеется плавающий распорный конус 6, который контактирует с торцом переводника 5 и внутренней конической поверхностью хвостовиков лап 1. Наружная поверхность хвостовиков лап 1 уперта при помощи кольцевой выточки в ответные поверхности верхней части 3 корпуса-муфты. Распорный конус 6 снабжен центральным воздушным каналом, который сообщен с центральным воздушным каналом переводника 5.

Поверхности лап 1 сопряжены с поверхностями, способными воспринимать крутящий момент и образованными на нижней части 4 корпуса-муфты в виде проемов для лап 1 во внутреннюю полость. Одна из сторон проемов является для лапы 1 опорным буртом на верхней части 3 корпуса-муфты. Для этого в нижней части 4 корпуса-муфты прорезаны, например, два прямоугольных паза, расположенных диаметрально, в который установлены две лапы 1.

Нижняя часть 4 корпуса-муфты по направлению бурения выполнена с возможностью закрепления опережающего бурового инструмента, либо на ней установлены опережающие породоразрушающие органы, например резцы. Если в качестве опережающего бурового инструмента использовано шарошечное долото, имеется центральный воздушный канал на нижней части 4 корпуса-муфты, сообщенный с воздушным каналом плавающего распорного конуса 6. Также имеются

боковые выходные воздушные каналы 8, подающие воздух в зону действия шарошек 2. Зона сопряжения каналов плавающего распорного конуса 6 и нижней части 4 корпуса-муфты выполнена с осевым и радиальным зазором, который является бесконтактным щелевым уплотнением, либо в него может быть установлена контактная упругая герметизирующая прокладка.

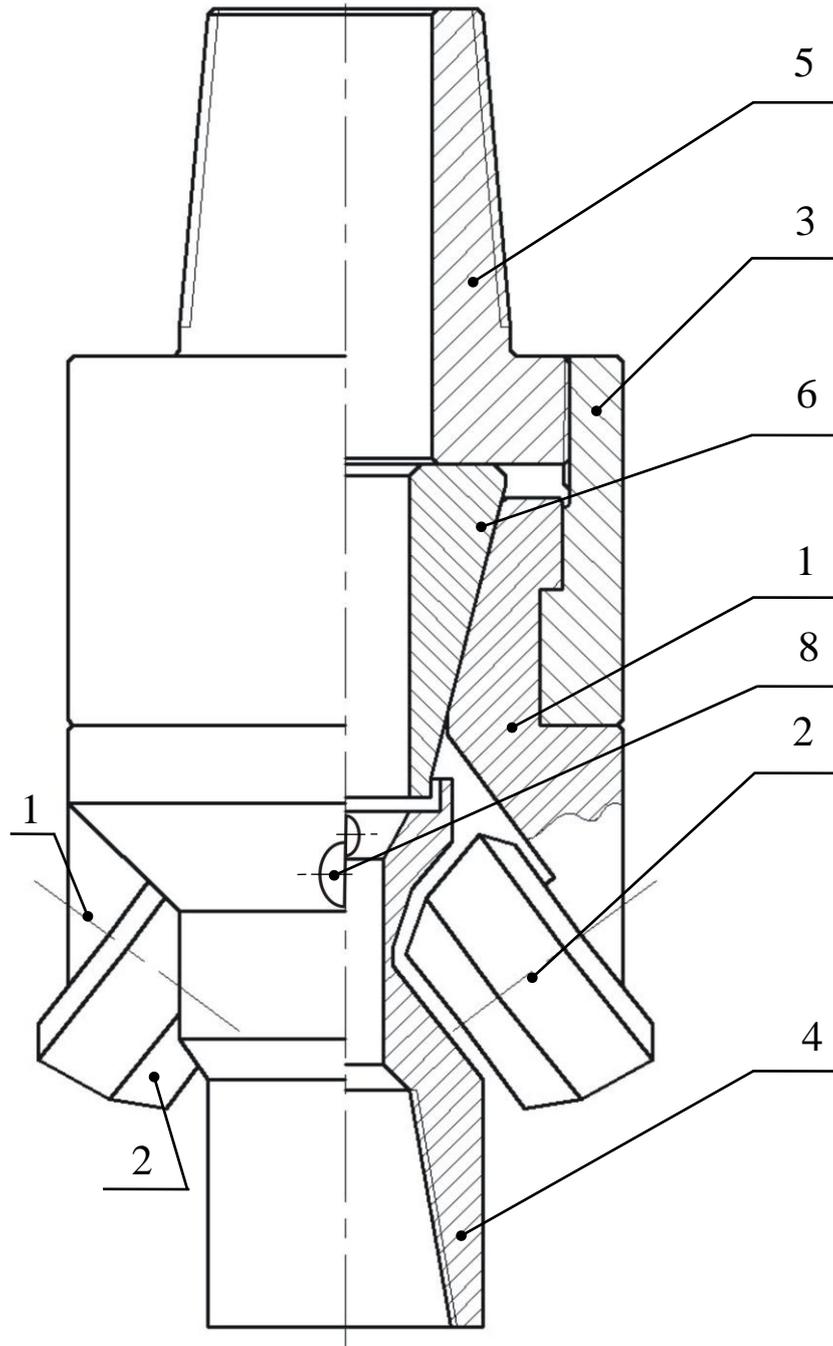


Рисунок 4.3 – Разборный шарошечный расширитель по патенту РФ на изобретение № 2549336 [159]

При бурении на переводник 6 от буровой штанги передается крутящий момент и осевое усилие. На лапы 1 от переводника 6 осевое усилие передается через опорный бурт на верхней части 3 корпуса-муфты, а крутящий момент – через поверхности проемов для лап 1. При этом лапы 1 передают осевое усилие и крутящий момент на шарошки 2, в результате чего происходит перекатывание шарошек 2 по разрушаемому забою. Сопротивление перекатыванию шарошек 2 создает усилие на затягивание резьбы в сопряжении переводника 5 и верхней части 3 корпуса-муфты. Поэтому торец переводника 5 в процессе бурения давит на плавающий распорный конус 6, который вследствие конической поверхности сопряжения с лапами 1, создает скрепляющее лапы 1 усилие. Опережающее шарошечное долото или опережающие резцы позволяют создавать ступенчатую форму забоя, с опережающей центральной частью. Поэтому образуется ступенчатая форма забоя, при которой создаются благоприятные условия для разрушения породы шарошками 2, облегчая нагрузку на них и сменные лапы 1.

Предложен разборный шарошечный буровой инструмент по патенту РФ на изобретение №2592911 [160], конструкция которого обеспечивает увеличение прочности опор шарошек и увеличение долговечности подшипников путем обеспечения двухопорного крепления оси и поддержания предварительного натяга радиально-упорных подшипников с помощью пружин, с одновременным уменьшением требований к точности изготовления и монтажа опор шарошек, а значит уменьшения трудоемкости изготовления. Шарошечный буровой инструмент имеет (рисунок 4.4) корпус 1, к которому прикреплены лапы 2 с осью 3, на каждой из которых установлена шарошка 4. Имеются подшипники, расположенные в сквозном осевом отверстии шарошек 4, способные воспринимать радиальную и разнонаправленную осевую нагрузку. Подшипник 5 способен воспринимать от шарошки 4 обратную осевую нагрузку и для этого выполнен радиально-упорным, а его внутреннее кольцо установлено на оси 3 с возможностью осевого перемещения и уперто в корпус 1 посредством, например двух, тарельчатых пружин 6. Два радиально-упорных подшипника 7 и 8 способны воспринимать от шарошки 4 прямую осевую нагрузку. Доля этого внутреннее кольцо подшипника 7, ближнего

к вершине шарошки 4, установлено на оси 3 с возможностью осевого перемещения и уперто в бурт оси 3 через тарельчатую пружину 9.

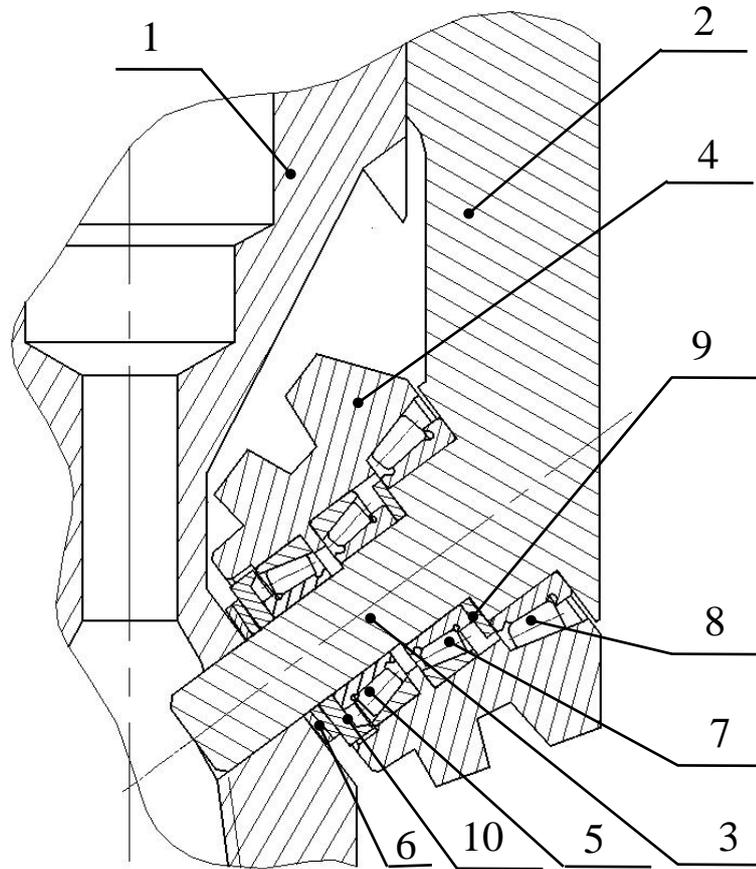


Рисунок 4.4 – Разборный шарошечный буровой инструмент по патенту РФ на изобретение № 2592911 [160]

Имеется предварительный натяг, образованный в радиально-упорных подшипниках 5, 7 и 8 в результате сжатия тарельчатых пружин 6 и 9. Для уплотнения подшипникового узла применена шайба 10, которая может передавать осевую силу предварительного натяга от пружин 6 к внутреннему кольцу подшипника 7.

При бурении на корпус 1 и лапы 2 передается осевое усилие и крутящий момент и происходит вращение корпуса 1 и качение шарошек 4, с помощью которых разрушается забой скважины. Опережающие породоразрушающие элементы меньшего диаметра или присоединенный к резьбовой муфте опережающий

буровой инструмент производят образование уступа скважины, освобождая место для расположения вершинной части шарошек 4, которая не имеет породоразрушающего вооружения.

Усилия от шарошек 4 передаются на подшипники 5, 7 и 8 и на две опоры оси 3: с одной стороны – на лапе 2; с другой – на корпусе 1. Двухопорное крепление оси 3 увеличивает ее прочность. В результате предварительного сжатия тарельчатых пружин 6 и 9, образуется предварительный натяг в радиально-упорных подшипниках 5, 7 и 8. Это способствует их лучшей радиальной грузоподъемности при разнонаправленных внешних осевых усилий от шарошек 4. Прямое осевое усилие от шарошек 4, направленное от их вершин, является большим, чем обратное, и воздействует на два радиально-упорных подшипника 7 и 8. Тарельчатая пружина 9 создает предварительный осевой натяг и компенсирует погрешности базирования колец подшипников 7 и 8. Незначительные отклонения в точности изготовления или сборки не приводят к потере предварительного осевого натяга подшипников 5, 7 и 8, а значит обеспечиваются лучшие условия работы опор шарошек 4 и снижается трудоемкость изготовления шарошечного бурового инструмента.

Таким образом, разработаны схемные решения шарошечного бурового инструмента, которые предусматривают использование двух или трех шарошек, обеспечивают снижение нагрузки на шарошки, формирующие некруглое поперечное скважины и обеспечивают ремонтпригодность бурового инструмента путем обеспечения возможности замены шарошек и замены или технического обслуживания их подшипниковых опор.

4.3 Разработка конструкции экспериментального образца шарошечного инструмента для бурения некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений

На основании разработанных в подразделе 4.2 схемных решений шарошечного бурового инструмента, разработана конструкция двухшарошечного расширителя (рисунок 4.5).

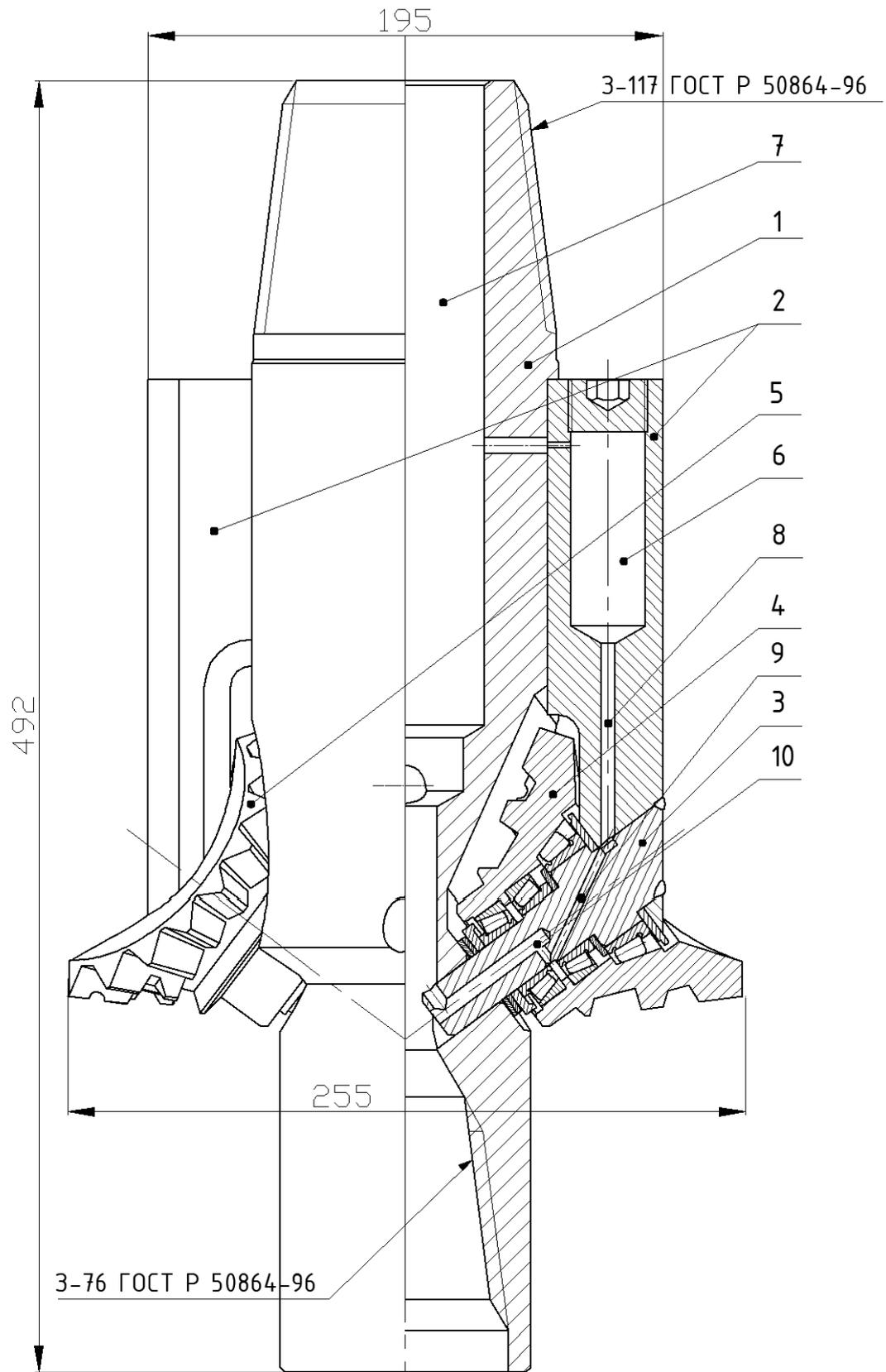


Рисунок 4.5 – Конструктивное решение экспериментального образца шарошечного бурового инструмента

Назначением экспериментального образца шарошечного бурового инструмента явилось проведение испытаний для подтверждения получения скважины с заданным некруглым поперечным сечением в промышленных условиях на базе серийного шарошечного бурового станка. Поэтому конструкция бурового инструмента представляет собой шарошечный расширитель, в котором достигается уменьшение нагрузки на шарошки, формирующие некруглое поперечное сечение, применена конструкция подшипниковой опоры шарошек, предусматривающая возможность ее ремонта и технического обслуживания, но лапы шарошек установлены на корпусе без возможности разборки конструкции, так как это не требует цель испытаний в промышленных условиях.

Экспериментальный образец шарошечного бурового инструмента содержит корпус 1, к которому методом сварки закреплены лапы 2. Имеются двухопорные оси 3, одним концом закрепленные методом сварки на лапах 2, а другим концом установленные на скользящей посадке в отверстие корпуса 1. Конструкция подшипниковой опоры шарошек 4 и 5 соответствует конструкции, представленной на рисунке 4.4, и выполнена открытого типа с возможностью продувки сжатым воздухом.

Разработана система смазки и продувки подшипниковой опоры шарошек 4 и 5, на которую получен патент на изобретение №2655505 [161]. Имеется резервуар 6, содержащий запас смазочного материала. Резервуар 6 с одной стороны сообщен с центральным воздушным каналом 7, в котором имеется избыточное давление воздуха, а другим концом со стороны его дна с помощью смазочных каналов 8 и 9 сообщен с полостью подшипниковой опоры.

В лапах 2 выполнены воздушные каналы 10, которые с одной стороны сообщены с центральным каналом 7, а с другой стороны совмещены с выходным отверстием смазочного канала 9. Поэтому смазочный материал из резервуара 6 в процессе бурения способен поступать в подшипниковую опору, где происходит его распределение, а поступающий по каналам 10 воздух создает избыточное давление в полости подшипниковой опоры и, охлаждая ее, выходит наружу.

Конструкция шарошек 4 и 5 имеет одноконусное исполнение для получения четырехугольного поперечного сечения (рисунок 4.6) без скругления сопряжения стенок скважины ($\beta=0^0$, $b=0$ или $S=0$) с минимальным радиусом поперечного сечения $R_{min}=102$ мм. Стороны четырехугольного поперечного сечения являются выпуклыми и получены по формуле (2.19) благодаря образованию калибрующей кромки шарошки с углом наклона секущей конус шарошки плоскости $\mu=65,5^0$.

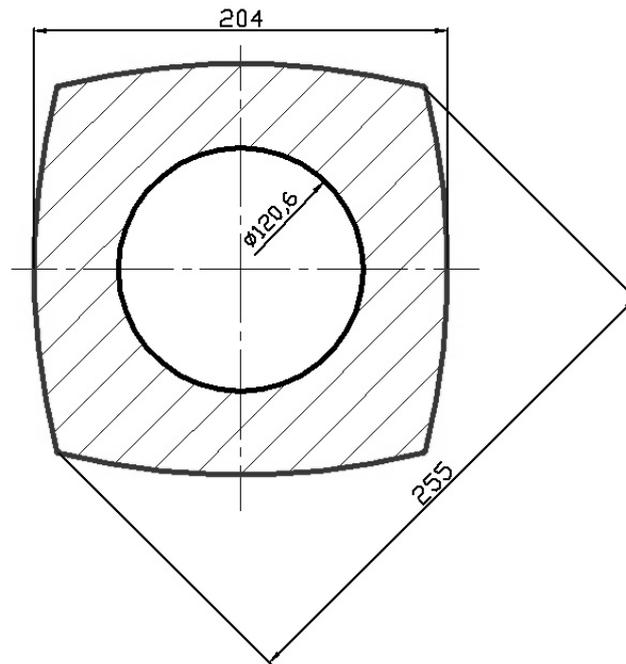


Рисунок 4.6 – Форма и размеры некруглого поперечного сечения, для получения которых предназначен экспериментальный образец шарошечного бурового инструмента

Центральная часть забоя скважины подлежит разрушению опережающим трехшарошечным долотом диаметром 120,6 мм.

Угол конусности шарошек принят $\alpha=59,5^0$ при угле наклона осей их вращения к оси вращения бурового инструмента, согласно зависимости (2.10), $\theta=53^0$ при $i=2$.

В конструкции инструмента использованы особенности долот типа Т (ГОСТ 20692-2003). Поэтому вооружение шарошек (рисунок 4.7), спроектированное согласно рекомендациям [162], имеет периферийный зубчатый венец 1, высота

зубьев которого составляет 8–12 мм, шаг зубьев – 18–24 мм с углом заострения зуба – 50 мм и шириной притупления зубьев – 3 мм.

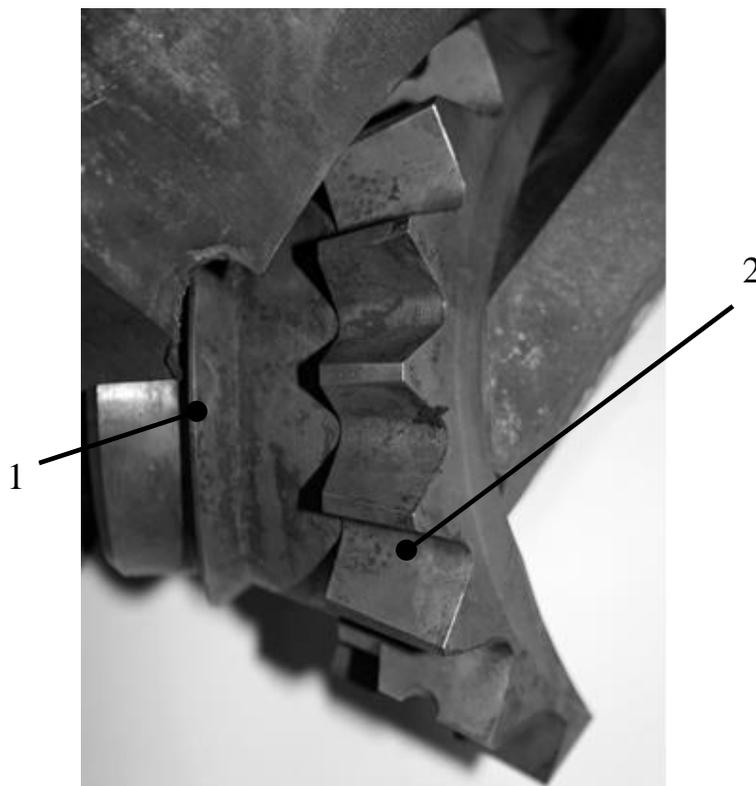


Рисунок 4.7 – Шарошка экспериментального образца шарошечного бурового инструмента

Шарошки выполнены из стали 20ХН3МА (ГОСТ 2590-2006), при этом обеспечена глубина цементированного слоя со стороны поверхности зубьев 1,5–1,8 мм с твердостью поверхности HRC 55–59. Внутреннее вооружение шарошек выполнено дисковым для обеспечения больших размеров минимальной толщины металла тела шарошки. Благодаря близкому расположению к уступу забоя диска 2 вооружения шарошек, его предназначением является скалывание горной породы к центру скважины и освобождение пространства для тела шарошек.

4.4 Апробация экспериментального образца шарошечного инструмента в промышленных условиях [163]

Испытания проведены в условиях разреза «Заречный» ОА «СУЭК-Кузбасс», крепость буримой горной породы по шкале М. М. Протодьяконова

составила $f=4$. Для испытаний использован шарошечный буровой станок DML1200. Буровой инструмент установлен путем навинчивания вручную на переходник буровой штанги (рисунок 4.8).



Рисунок 4.8 – Экспериментальный шарошечный буровой инструмент, установленный на шарошечном станке DML1200

Забуривание произведено при нагрузке 30 % от применяемой для данных диаметра и крепости породы (осевое усилие 45 кН) на глубину 0,8 м.

Результаты забуривания на глубину 0,8 м:

1. С момента начала контакта шарошек расширителя с горной породой получена заданная форма поперечного сечения (рисунок 4.9).

2. При продолжении бурения скважина сформирована с поворотом профиля поперечного сечения в сторону вращения с шагом винтовой линии около 1,5 м (рисунки 4.10 и 4.11).



Рисунок 4.9 – Вид сбоку забуренной скважины



Рисунок 4.10 – Вид сверху на забуренную скважину (глубина 0,8 м)



Рисунок 4.11 – Полученная форма поперечного сечения скважины

Бурение продолжено после опускания бурового инструмента с вращением в ранее пробуренную скважину с параметрами, представленными в таблице 4.4. Величина осевого усилия имела значения, которые достигаются для данных диаметра и крепости породы на серийных шарошечных долотах (усилие 112–135 кН). При этом сформирована скважина глубиной 15 м (рисунок 4.12) за 9,36 мин чистого времени бурения. При наращивании бурового става производился подъем инструмента на высоту около 0,5 м.



Рисунок 4.12 – Вид сверху скважины (глубина 15 м)

Таблица 4.4 – Параметры процесса бурения

Параметр	Значение
Глубина скважины, м	15
Угол наклона скважины, град	15
Осевое усилие, кН	112–135
Частота вращения, об/мин	134–138
Показания манометра рабочего давления гидросистемы вращателя, фунтов/дюйм ²	2500–3000
Давление компрессора, кгс/см ²	5
Средняя скорость бурения	96 м/ч

В результате осмотра отработанного бурового инструмента (рисунок 4.13) выявлены данные, представленные в таблице 4.5.



Рисунок 4.13 – Отработанный опытный шарошечный буровой инструмент

Таблица 4.5 – Результаты осмотра отработанного бурового инструмента

Показатель	Значение
Состояние подшипниковых опор шарошек расширителя:	невозможность поворота в ручную
шарошка 1	
шарошка 2	нормальное состояние
Состояние подшипниковых опор шарошек опережающего долота 120,6 (4 ¾) STD 421 СТЦВ	наличие осевого и радиального люфтов
Нагрев шарошек расширителя (на ощупь)	около 40 ⁰ С
Нагрев шарошек опережающего долота (на ощупь)	более 100 ⁰ С
Износ вооружения шарошек расширителя и опережающего долота	отсутствует
Расход содержимого резервуаров смазки расширителем	Шарошка 1 – 100 % (резервуар пуст) Шарошка 2 – 95 %

Результаты бурения на глубину 15 м:

1. Боковые стенки имеют угловые концентраторы напряжений спиралевидной формы.

2. В процессе бурения наблюдались колебания осевого усилия и крутящего момента 10–15 %.

3. Начиная с глубины 13 м, неоднократно происходило подклинивание вращения, бурение останавливалось, инструмент приподнимался с вращением, затем бурение продолжалось.

Подъем инструмента на поверхность происходил с вращением, наблюдались рывки. Демонтаж бурового инструмента с переходника буровой штанги произведен в ручную с затруднением, путем нанесения ударов по корпусу инструмента.

Выводы:

1. Шарошечный буровой инструмент способен создавать заданную некруглую форму поперечного сечения скважины с угловыми концентраторами напряжений.

2. Спиралевидная форма стенок пробуренной скважины вызвана слабой нагруженностью шарошек расширителя вследствие перегрузки опережающего долота, которое не справлялось со своей работой (об этом свидетельствует перегрев шарошек опережающего долота и слабый нагрев шарошек расширителя). В таких условиях шарошки расширителя перекатываются со скольжением зубьев по забою, что приводит к формированию слабо выраженной зубчатой рейки на забое скважины и повороту некруглого профиля поперечного сечения скважины по направлению вращения.

3. Наличие преждевременного износа подшипниковых опор опережающего шарошечного долота вызвано тем, что его конструкция предназначена для бурения с промывкой.

4. Невозможность вращения в ручную одной из шарошек свидетельствует о поломке подшипникового узла.

5. Подклинивание вращения инструмента на глубине более 13 м вызвано поломкой подшипникового узла одной из шарошек.

6. Колебания осевого усилия и крутящего момента на глубине от 0,8 до 13 м вызваны:

- некруглой формой поперечного сечения;
- рассогласованием исходного положения шарошек после повторного опускания бурового инструмента в скважину с винтовой поверхностью ее стенок.

7. Рывки при подъеме бурового инструмента вызваны спиралевидностью формы стенок скважины и наличием вращения бурового инструмента.

8. Конструкция экспериментального образца шарошечного расширителя не позволяет механизировать процесс его монтажа и демонтажа на буровой став с использованием штатного ключа бурового станка DML1200.

4.5 Выводы

1. Значимыми критериями для обоснования параметров шарошечного инструмента для бурения некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений с точки зрения эффективности действия взрыва, по конструктивным и силовым параметрам являются: количество углов n сопряжения стенок скважины и их притупление b , угол конусности шарошки α и относительный размах нормированных значений крутящего момента M'_o .

2. С помощью комплексной сравнительной оценки доказано, при формировании угловых концентраторов напряжений на стенках некруглой скважины наиболее эффективным по интегральному критерию функции полезности ($U=0,910$) является вариант, при котором происходит образование четырехугольного поперечного сечения скважины без притупления углов сопряжения ее стенок ($b=0$) трехшарошечным буровым инструментом, шарошки которого имеют наибольшее для такого поперечного сечения значение угла конусности ($\alpha=60^0$), при котором реализуется плоская или вогнутая форма поверхности забоя скважины, а относительный размах нормированных значений крутящего момента ($M'_o=0,0202$) получен при максимальном из рассмотренных значениях угла наклона секущих плоскостей к оси вращения шарошек, образующих калибрующие кромки шарошек ($\mu=80^0$). Наибольший коэффициент весомости имеет частный критерий (параметр) b (0,4100).

3. Разработаны схемные решения шарошечного инструмента и рекомендованы конструкции разборных шарошечных расширителей со сниженными нагрузками на шарошки, формирующие некруглое поперечное сечение скважины.

4. Промышленная апробация экспериментального образца шарошечного расширителя в условиях разреза «Заречный» ОА «СУЭК-Кузбасс» показала его работоспособность при бурении некруглой скважины с угловыми концентраторами напряжений на базе серийного шарошечного бурового станка DML1200.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача обоснования параметров шарошечного инструмента для бурения скважин с некруглым поперечным сечением с угловыми концентраторами напряжений, что имеет существенное значение для развития буровзрывных работ в области горного дела.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработаны модели зависимости кинематических и конструктивных параметров шарошечного бурового инструмента от формы и параметров некруглого поперечного сечения скважины с угловыми концентраторами напряжений, которые определяются передаточным отношением, количеством одноконусных шарошек, углами конусности и наклона оси их вращения к оси скважины, расположением на них секущих плоскостей для образования калибрующих кромок.

2. Выявлено, что максимальное число одноконусных шарошек, способных образовывать вогнутую или плоскую поверхность забоя некруглой скважины, для поперечного сечения с двумя и четырьмя угловыми концентраторами напряжений равно трем, а для треугольного поперечного сечения – двум. Перекатывание шарошки по забою воспроизводит стороны стенок скважины разной кривизны: при угле (μ) наклона секущей плоскости к оси конуса шарошки большем или равным 60 градусам – выпуклые, а при величине этого угла менее 60 градусов – вогнутые.

3. Разработаны модели влияния формы и параметров забоя некруглой скважины с концентраторами напряжений на силовые параметры шарошечного инструмента и определен характер изменения за один оборот инструмента осевого усилия, крутящего момента и момента, отклоняющего буровой инструмент от оси его вращения. Установлено, что максимальные значения момента, отклоняющего буровой инструмент от оси его вращения, размахи нормированных значений осевого усилия и крутящего момента являются наименьшими при образовании четырехугольного поперечного сечения тремя шарошками. Максимальные значения осевого усилия и крутящего момента являются наименьшими при образовании треугольного поперечного сечения двумя шарошками. Максимальные значения

и относительные размахи нормированных значений силовых параметров уменьшаются при увеличении выпуклости и притупления углов сопряжения стенок скважины.

4. Обоснованы параметры шарошечного инструмента и доказано, при формировании угловых концентраторов напряжений на стенках некруглой скважины наиболее эффективным по интегральному критерию функции полезности ($U=0,910$) является вариант, при котором происходит образование четырехугольного поперечного сечения скважины без притупления углов сопряжения ее стенок ($b=0$) трехшарошечным буровым инструментом, шарошки которого имеют наибольшее для такого поперечного сечения значение угла конусности ($\alpha=60^0$), при котором реализуется плоская или вогнутая форма поверхности забоя скважины, а относительный размах нормированных значений крутящего момента ($M'_o=0,0202$) получен при максимальном из рассмотренных значениях угла наклона секущих плоскостей к оси вращения шарошек, образующих калибрующие кромки шарошек ($\mu=80^0$).

5. Разработаны схемные решения шарошечного инструмента и рекомендованы конструкции разборных шарошечных расширителей со сниженными нагрузками на шарошки, формирующие некруглое поперечное сечение скважины. Промышленная апробация экспериментального образца шарошечного расширителя в условиях разреза «Заречный» ОА «СУЭК-Кузбасс» показала его работоспособность при бурении некруглой скважины с угловыми концентраторами напряжений на базе серийного бурового станка.

Направления дальнейших исследований:

- исследование влияния геометрии различного вооружения одноконусных шарошек на передаточное отношение инструмента и силовые параметры процесса бурения, разработка рекомендации по выбору параметров вооружения шарошек;
- обоснование рекомендации по выбору режимных параметров процесса бурения некруглых скважин шарошечным инструментом;
- исследование процессов транспортирования буровой мелочи сжатым воздухом при бурении некруглых скважин шарошечным инструментом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таразанов, И. Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь-декабрь 2019 года / И. Г. Таразанов, Д. А. Губанов // Уголь. – 2020. – № 3. – С. 54-69.
2. Кантемиров, В. Д. Основные тенденции производства железорудного сырья в России / В. Д. Кантемиров, Р. С. Титов, А. М. Яковлев // Горная промышленность. – 2018. – № 1. – С. 72-74.
3. Мачулов, В. Н. Системы точного управления и позиционирования буровых станков - решение для повышения производительности и эффективности ведения буровзрывных работ в карьерах / В. Н. Мачулов // Горная промышленность. – 2014. – № 6. – С. 66-69.
4. Кузнецов, В. А. Обобщенная прогнозная оценка себестоимости бурения взрывных скважин и шпуров / В. А. Кузнецов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 5. – С. 127-137.
5. Копытов, А. И. Влияние технологии взрывных работ на состояние окружающей среды в Кузбассе / А. И. Копытов, Ю. А. Масаев, В. Ю. Масаев // Уголь. – 2020. – № 5. – С. 57-62.
6. Буткевич, Г. Р. Анализ способов разрушения скальных пород / Г. Р. Буткевич // Горный журнал. – 1997. – № 10. – С. 33-37.
7. Анистратов, Ю. И. Оценка эффективности безвзрывных технологий разработки крепких горных пород на карьерах / Ю. И. Анистратов // Горный журнал. – 1997. – № 10. – С. 37-39.
8. Алешин, Б. Г. Опыт внедрения технологии подготовки массивов крепких пород к экскавации на открытых горных работах физико-химическими методами / Б. Г. Алешин, Г. Я. Воронков, А. А. Кузнецов // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности : труды Международной научно-практической конференции, 18-21 сентября 2001 года, г. Кемерово. – Кемерово, 2001. – С. 74-75.

9. Реготунов, А. С. Совершенствование буровой техники в изменяющихся условиях железорудных карьеров / А. С. Реготунов, Р. И. Сухов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : сборник трудов XVII Международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека», 4-5 апреля, 2019 г., г. Екатеринбург.– Екатеринбург, 2019. – С. 245-249.
10. Васильев, М. В. Влияние возрастающей глубины карьеров на эффективность горного производства / М. В. Васильев // Горный журнал. – 1983. – № 2. – С. 29–33.
11. Котяшев, А. А. Закономерности изменения условий и показателей эксплуатации буровзрывного комплекса на открытых горных разработках / А. А. Котяшев // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2018. – № 8. – С. 34-40.
12. Временная классификация горных пород по степени трещиноватости в массиве : (Применительно к взрывной отбойке на карьерах). – Москва : Изд-во ИГД, 1968. – 20 с. – (Межведомственная комиссия по взрывному делу. Информационный выпуск / ИГД им. А. А. Скочинского ; №199).
13. Субботин, А. И. Проблемы безопасности при ведении горных работ / А. И. Субботин, А. М. Ильин // Промышленная безопасность и эффективность новых технологий в горном деле : Международная научно-практическая конференция «Горное дело-2000» : Сборник материалов (доклады, статьи, решение). – Москва : МГГУ, 2001. – С. 8-37.
14. Жариков, С. Н. Устойчивость бортов карьеров и буровзрывные работы / С. Н. Жариков // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2018. – Т. 5, № 1. – С. 49-54.
15. Сеинов, Н. П. Влияние структурной нарушенности горного массива на параметры буровзрывной подготовки / Н. П. Сеинов, И. Ф. Жариков // Взрывное дело. – 2013. – № 109-66. – С. 135-146.
16. Беляков, Ю. И. Выемочно-погрузочные работы на карьерах / Ю. И. Беляков. – Москва : Недра, 1987. – 268 с.

17. Бирюков, А. В. Статистические модели в процессах горного производства / А. В. Бирюков, В. И. Кузнецов, А. С. Ташкинов. – Кемерово : Кузбассвуиздат, 1996. – 228 с.
18. Научные основы проектирования карьеров / под общей редакцией В. В. Ржевского, М. Г. Новожилова, Б. П. Юматова. – Москва : Недра, 1971. – 600 с.
19. Тангаев И. А. Буримость и взрываемость горных пород / И. А. Тангаев. – Москва : Недра, 1978. – 184 с.
20. Bhandari, S. Fines and dust generation and control in rock fragmentation by blasting / S. Bhandari // Proceedings of Rock Fragmentation by Blasting : Fragblast 10 / Taylor & Francis Group, London. – Leiden, The Netherlands : CRC Press, 2013. – P. 511-520. – ISBN 9780415621434, 9780203387672, 9781136695636.
21. Уменьшение пылегазового загрязнения атмосферы при производстве массовых взрывов на карьерах / И. Т. Мислибаев, Ш. Ш. Заиров, А. Б. Тухташев, М. Ж. Норматова // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2017. – № 2. – С. 39-43.
22. Сытенков, В. Н. Управление пылегазовым режимом глубоких карьеров / В. Н. Сытенков. – Москва : Геоинформцентр, 2003. – 288 с.
23. Сурков, А. В. Основные направления по снижению риска опасности производства взрывных работ на угольных предприятиях Кузбасса / А. В. Сурков, В. А. Сурков, В. Н. Киреев // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2001 : материалы IV Международной научно-практической конференции, 27-29 ноября 2001 г., г. Кемерово. – Кемерово, 2001. – С. 37-41.
24. Масаев, Ю. А. Влияние буровзрывных работ, применяемых при угледобыче на экологическую обстановку в Кузбассе / Ю. А. Масаев, И. А. Паначев // Актуальные вопросы подземного и наземного строительства : сборник научных трудов / Кузбасский государственный технический университет. – Кемерово, 1996. – С. 96-102.

25. Оборин, В. В. Влияние взрывной подготовки горной массы на загрязнение окружающей среды / В. В. Оборин, В. Г. Кузнецов, А. И. Ермолаев // Промышленная безопасность и эффективность новых технологий в горном деле : Международная научно-практическая конференция «Горное дело-2000» : Сборник материалов (доклады, статьи, решение). – Москва : МГГУ, 2001. – С. 286-290.
26. Кутузов, Б. Н. Взрывные работы : учебник для горных техникумов / Б. Н. Кутузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Недра, 1980. – 392 с.
27. Викторов, С. Д. Влияние верхней зоны нерегулируемого дробления на выход негабарита по карьерному блоку / С. Д. Викторов, Н. Н. Казаков, А. В. Шляпин // Взрывное дело. – 2016. – № 116-73. – С. 5-17.
28. Кутузов, Б. Н. Определение размера зоны регулируемого дробления при взрыве заряда в трещиноватом массиве / Б. Н. Кутузов, В. Н. Тюпин // Известия вузов. Горный журнал. – 1979. – № 8. – С.30-35.
29. Демидюк, Г. П. К вопросу зависимости степени дробления породы взрывом от диаметра заряда ВВ / Г. П. Демидюк // Взрывное дело : сборник. – Москва : Недра, 1969. – № 67/24. – С. 65 – 56.
30. О влиянии направления трещиноватости массива горных пород на степень его дробления взрывом / А. Хафсауи, А. Хадуш, Е. Хаджадж, М. Шеттиби // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. – № 8. – С. 53-55.
31. Белин, В. А. Влияние трещиноватости массива на распространение взрывных волн / В. А. Белин, Е. П. Белина // Исследование физических свойств горных пород и процессов горного производства : сборник научных трудов. – Москва, 1984. – С.28-36.
32. Барон, Л. И. Контурное взрывание при проходке выработок / Л. И. Барон, А. В. Ключников. – Ленинград : Наука, 1967. – 204 с.
33. Филиппов, В. К. Направление распространения трещин, образовавшихся при разрушении крепких горных пород взрывом / В. К. Филиппов // Взрывное дело : сборник. – Москва : Госгортехиздат, 1961. – № 47/4. – С.172-177.

34. Шер, Е. Н. Исследование влияния конструкции скважинного заряда на размер зоны разрушения и время ее развития в горных породах при взрыве / Е. Н. Шер, Н. И. Александрова // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2007. – № 4. – С. 76-85.
35. Уваров, В. Н. Промышленное освоение кумулятивных зарядов в профилированных оболочках / В. Н. Уваров, А. Г. Фридман, С. И. Протасов // Горный журнал. – 1998. – № 11-12. – С. 113-114.
36. Каркашадзе, Г. Г., Алексеева В. А. Влияние формы горизонтального сечения скважинных зарядов на величину энергонасыщения породного массива при взрывной отбойке / Г. Г. Каркашадзе, В. А. Алексеева // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2000. – № 1. – С. 33-35.
37. Dexing, D. Theoretical and experimental studies an fracture plane control blast with notched boreholes / Ding Dexing, Zhv. Chenghang // Trans Nonferrous Metals Soc China. – 1999. – № 1. – P. 188-191.
38. Жуков, И. А. Обоснование практической необходимости и возможности разрушения ударом хрупких сред с образованием отверстий полигонального сечения / И. А. Жуков // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013. – №2. – С. 46-48.
39. Кочанов, А. Н. К вопросу о механизме развития трещины в граните в условиях взрывного воздействия / А. Н. Кочанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 12. – С. 243-247.
40. Снижение интенсивности разрушения законтурного массива при проведении выработок / К. Г. Каргинов, А. И. Липовой, Т. М. Тезиев, Д. В. Рябов // Горный журнал. – 2001. – № 4. – С. 34-39.
41. Некоторые результаты исследования действия взрыва шпуровых кумулятивных зарядов / В. Ф. Ведутин, В. А. Кропотов, П. Е. Бекетов, В. П. Николаев // Взрывное дело: Управление действием взрыва : сборник. – Москва : Недра, 1964. – № 54/11. – С. 219-230.

42. Влияние формы поперечного сечения зарядной камеры и конструкции заряда на эффект направленного раскола твердых тел / Г. А. Беришвили, Р. В. Михельсов, Н. Н. Гугушвили, Р. И. Эбралидзе // Физика и механика горных пород : [сборник статей]. – Тбилиси, 1975. – Вып. 2. – С. 64-69.
43. Друкованный, М. В. Управление действием взрыва скважинных зарядов на карьерах / М. В. Друкованный, В. С. Куц, В. И. Ильин. – Москва : Недра, 1980. – 223 с.
44. Щерабак, Г. С. О рациональности применения щелевых скважин / Г. С. Щерабак, А. О. Ансабаев // Взрывное дело: Достижения техники и технологии взрывных работ в горном деле : сборник. – Москва : Недра, 1966. – № 59/16. – С. 83-94.
45. Неборский, В. М. Устройство для образования в скважинах продольных зародышевых щелей / В. М. Неборский, Е. В. Романов // Безопасность труда в промышленности. – 1990. – № 1. – С. 46-47.
46. Экспериментально-аналитические исследования геомеханических процессов в массиве крепких сложноструктурных горных пород при взрыве зарядов вв различной формы / К. С. Ищенко, С. В. Коновал, И. Л. Кратковский [и др.] // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2014. – Т. 1, № 1. – С. 12-127.
47. Numerical study of fracture plane control in laboratory-scale blasting / S. H. Cho, Y. Nakamura, B. Mohanty, H. S. Yang, K. Kaneko // Engineering Fracture Mechanics. – 2008. – V. 75. – P. 3966–3984. – DOI:10.1016/J.ENGFRACMECH.2008.02.007.
48. Машуков, В. И. Перспективы применения зарядов линейно-винтовой формы / В. И. Машуков, И. В. Машуков // Взрывное дело: Дробление горных пород взрывом : сборник. – Москва : Недра, 1984. – № 86/43. – С. 75-81.
49. Шестимирова, В. И. Состояние и тенденции развития шарошечного бурения / В. И. Шестимирова, В. И. Антошенков – Москва : ЦНИИТЭИТяжмаш, 1989. – 36 с. – (Обзорная информация «Горное оборудование» / ЦНИИТЭИТяжмаш ; вып. 3).

50. Кузнецов, В. И. Опыт применения скважин большого диаметра на Разрезах Кузбасса / В. И. Кузнецов, А. С. Ташкинов, В. М. Мазаев // Уголь. – 1992. – № 1. – С. 26-28.
51. Шигин, А. О. Методология проектирования адаптивных вращательно-подающих органов буровых станков и технологий их применения в сложноструктурных породных массивах : монография / А. О. Шигин, А. В. Гилев, А. А. Шигина. – Москва : Издательский дом Академии Естествознания, 2017. – 266 с. – ISBN 978-5-91327-485-4. – DOI 10.17513/np.282.
52. Иванов К. И. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых / К. И. Иванов, В. А. Латышев, В. Д. Андреев. – 3-е издание перераб. и доп. – Москва : Недра, 1989. – 272 с.
53. Карпов, В. Н. О проблемах повышения производительности буровых работ на отечественных рудниках / В. Н. Карпов, В. В. Тимонин, А. И. Конурин, Е. М. Черниенков // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2018. – Том 5. – № 2. – С. 46-56.
54. Тимонин, В. В. Погружной пневмоударник для открытых горных работ для бурения скважин на высоком давлении сжатого воздуха / В. В. Тимонин, А. С. Крондратенко // Интерэкспо Гео-сибирь. – 2015. – № 3. – С. 251-255.
55. Тангаев, И. А. Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых / И. А. Тангаев. – Москва : Недра, 1986. – 231 с.
56. Алимов, О. Д. Научно-методические основы синтеза параметров привода буровых машин : Препринт / О. Д. Алимов, А. В. Фролов. – Фрунзе : Илим, 1981. – 65 с.
57. Бовин К.А., Гилев А.В. Шигин А.О., Плотников И.С. Анализ эксплуатации техники бурения взрывных скважин на карьерах Красноярского края и Республики Хакасии // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2017. Т. 40. № 3. С. 99–106. DOI: 10.21285/2541-9455-2017-40-3-99-106

58. Мальченко, В. О. Интенсификация процесса бурения шарошечными стаками // Иванов, К. И. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых. / К. И. Иванов, В. А. Латышев, В. Д. Андреев. – Москва : Недра, 1978. – С. 179-184.
59. Опытнo-промышленные испытания ударно-шарошечного способа бурения взрывных скважин / Е. С. Быстров, И. Е. Домолен, Г. М. Крюков [и др.] // Горный журнал. – 1991. – № 6. – С. 6-7.
60. Рубан, А. Ю. О некоторых приоритетных направлениях НИОКР в ИГД им. А. А. Скочинского / А. Ю. Рубан // Уголь. – 1997. – № 9. – С. 9-12.
61. Беляев, А. Е. Принципы комбинированного воздействия на забой режуще-шарошечного долота / А. Е. Беляев // Горный журнал. – 2000. – № 5. – С. 52-54.
62. Дмитриев, А. П. Термическое и комбинированное разрушение горных пород / А. П. Дмитриев, С. А. Гончаров. – Москва : Недра, 1978. – 304 с.
63. Справочник по бурению на карьерах / под редакцией А. Б. Симкина. – Москва : Недра, 1981. – 269 с.
64. Подэрни, Р. Ю. Основные концепции создания бурового станка нового технического уровня / Р. Ю. Подэрни, М. Р. Хромой // Горный журнал. – 1994. – № 3. – С. 35-39.
65. Федоров, А. Н. Буровой станок нового поколения: концепция / А. Н. Федоров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2000. – № 4. – С. 165-168.
66. Дружинский, И. А. Сложные поверхности : Справочник / И. А. Дружинский. – Ленинград : Машиностроение : Ленинградское отделение, 1985. – 263 с.
67. Коновалов, Е. Г. Ротационная обработка поверхностей с автоматической подачей / Е. Г. Коновалов. – Минск : Вышэйшая школа, 1976. – 190 с.
68. Коновалов, Е. Г. Основы новых способов металлообработки / Е. Г. Коновалов ; Академия наук БССР, Физ.-техн. ин-т. – Минск : Изд-во Академии наук БССР, 1961. – 296 с.

69. Богомолов, И. Д. Анализ направлений по созданию исполнительного органа для бурения скважин с концентраторами напряжений / И. Д. Богомолов, М. К. Хуснутдинов // Совершенствование технологических процессов при разработке месторождений полезных ископаемых. – Кемерово, 2002. – С. 120-127. – (Сборник научных трудов / Научно-техн. центр «Кузбассуглетехнология»; № 19).
70. Авторское свидетельство № 378622 СССР, МК Е 21С19/00 (2000.01). Устройство для прорезания щели в массиве горных пород : № 1675837/22-3 : заявлено 27.07.71 : опубликовано 18.06.73 / Фрянов В. Н., Златицкий А. Н., Керничанский В. Н., Солдатенко А. В. – Бюл. № 19
71. Авторское свидетельство № 724717 СССР, МПК Е21В 7/28 (2000.01) Е21В 10/26 (2000.01). Устройство для выполнения борозд в шпурах : № 2482484 : заявлено 04.05.77 : опубликовано 30.03.1980 / Аксель А. М., Немова О. К. – Бюл. № 19
72. Авторское свидетельство № 1201505 СССР, МПК Е21С 37/00 (2000.01). Инструмент для выполнения продольных профильных углублений на стенках шпуров : № 371144 : заявлено 20.03.84 : опубликовано 30.12.85 / Гриценко В. Ф., Чувилин А. М., Панкратов В. В. [и др.]. – Бюл. № 48.
73. Авторское свидетельство № 1283380 СССР, МПК Е21С 37/00 (2000.01). Инструмент для нанесения профильных углублений на стенки шпуров : № 3877143 : заявлено 01.04.85 : опубликовано 15.01.87 / Гриценко В. Ф., Чувилин А. М., Синцов Е. А. [и др.]. – Бюл. № 2.
74. Авторское свидетельство № 1370221 СССР, МПК Е21В 7/04(2000.01), Е02F 5/20 (2000.01). Устройство для формирования продольных щелевых выработок : № 4046728 : заявлено 26.02.86 : опубликовано 30.01.88 / Коротеев Д. В., Котов А. П. – Бюл. № 4.
75. Авторское свидетельство № 939763 СССР, МПК Е21С 37/00 (2000.01). Устройство для нанесения профильных углублений на стенках шпуров : № 3219685 : заявлено 17.12.80 : опубликовано 30.06.82 / Кононов В. М. – Бюл. № 24.

76. Патент № 2555964 Российская Федерация, МПК E21B 10/40 (2006.01) E21C 37/00 (2006.01). Инструмент для выполнения профильных надрезов в шпурах : № 2014126057/03 : заявлено 27.06.2014 : опубликовано 10.07.2015 / Кононов В. М. – Бюл. № 19.
77. Патент № 2595281 Российская Федерация, МПК E21B 10/40 (2006.01) E21C 37/00 (2006.01). Инструмент для выполнения профильных надрезов в пробуренных шпурах : № 2015129585/03 : заявлено 20.07.2015 : опубликовано 27.08.2016 / Кононов В. М., Кононова Ю. М. – Бюл. № 24.
78. Авторское свидетельство № 1099040 СССР, МПК E21B 7/28 (2000.01). Устройство для выполнения борозд в шпурах горных пород : № 3585253 : заявлено 26.04.1983 : опубликовано 23.06.1984 / Аксель А. М. – Бюл. № 23.
79. Авторское свидетельство № 1641994 СССР, МПК E21C 37/00 (2000.01). Устройство для нарезания щелей на стенках скважин : № 4666055 : заявлено 24.03.1989 : опубликовано 15.04.1991 / Баранов В. А. , Неборский В. М. , Лохов В. И. , Беляев Н. И. – Бюл. № 14
80. Богомолов, И. Д. Научно-технические основы создания бурового оборудования для сооружения восстающих выработок на угольных шахтах : специальность 05.05.06 «Горные машины» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Богомолов, Игорь Дмитриевич ; Кузбасский политехнический институт. – Кемерово, 1992. – 32 с.
81. Авторское свидетельство № 1252471 СССР, МПК E21B 7/30 (2000.01). Устройство для бурения скважин с прямоугольным поперечным сечением : № 3754047 : заявлено 18.06.1984 : опубликовано 23.08.1986 / Богомолов И. Д. , Начев К. В. , Акулов В. А., Ермолаев В. С. – Бюл. № 31.
82. Авторское свидетельство № 358510 СССР, МПК E21D 13/04 (2000.01), E21D 3/00 (2000.01). Устройство для расширения восстающих скважин : № 1363279/22-3 : заявлено 17.09.1969 : опубликовано 03.11.1972 / Логунов Н. Ф., Акулов В. А., Орлов В. Д., Гревизирский В. Н. ; заявитель Анжерский машиностроительный завод. – Бюл. № 34.

83. Авторское свидетельство № 1208168 СССР, МПК E21B 7/24 (2000.01). Породоразрушающий снаряд : № 3775820/22-03 : заявлено 30.07.1984 : опубликовано : 30.01.1986 / Рякишев Б. Р., Архипкин В. И., Бобович В. С. [и др.] ; заявитель Казахский политехнический институт им. В. И. Ленина. – Бюл. № 4.
84. Авторское свидетельство № 1476100 СССР, МПК E21B 7/28 (2000.01). Устройство для бурения скважин с прямоугольным поперечным сечением : № 4270653/23-03 : заявлено 27.05.1989 : опубликовано 30.04.1989 / Богомолов И. Д., Начев К. В., Бурцев В. Ю. [и др.] ; заявитель Кузбасский политехнический институт. – Бюл. № 16.
85. Авторское свидетельство № 1252471 СССР, МПК E21B 7/28 (2000.01). Устройство для бурения скважин с прямоугольным поперечным сечением : № 3754047/22-03 : заявлено 18.06.1984 : опубликовано 23.08.1986 / Богомолов И. Д., Начев К. В., Акулов В. А., Ермолаев В. С. ; заявитель Кузбасский политехнический институт. – Бюл. № 31.
86. Авторское свидетельство № 1557317 СССР, МПК E21C 37/00 (2000.01). Устройство для образования щелей на стенках шпуров : № 4372631 : заявлено 03.11.1987 : опубликовано 15.04.1990 / Славолубов В. В. , Баранов Л. В., Масаев Ю. А. – Бюл. № 14.
87. Авторское свидетельство № 883422 СССР, МПК E21C 37/00 (2000.01). Устройство для образования канавки на стенках взрывных скважин : № 2897491 : заявлено 19.03.1980 : опубликовано 23.11.1981 / Машуков В. И., Седько А. П. , Махов А. П. [и др.]. – Бюл. № 43.
88. Авторское свидетельство № 1458569 А СССР, МПК E21C37/00, E21B 7/28 (2000.01). Устройство для образования щелей на стенках скважины : № 4145597/22-03 : заявлено 12.11.1986 : опубликовано 15.02.1989 / Гребенник О. И., Чернов О. И. ; заявитель Специальное конструкторское бюро прикладной геофизики СО АН СССР. – Бюл. № 6.

89. Авторское свидетельство № 1177479 А СССР, МПК E21C 37/00 (2000.01). Устройство для образования щелей в скважинах : № 3735248/22-03 : заявлено 29.04.1984 : опубликовано 07.09.1985 / Неборский В. М., Полевщиков Г. Я., Умрихин А. Н. [и др.] ; заявитель Восточный научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности. – Бюл. № 33.
90. Авторское свидетельство № 1323710 А1 СССР, МПК E21C 37/00 (2000.01). Устройство для образования щелей в скважинах : № 4039399/22-03 : заявлено 19.03.1986 : опубликовано 15.07.1987 / Г. Я., Умрихин А. Н., Неборский В. М., Майков В. И. [и др.] ; заявитель Восточный научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности. – Бюл. № 26.
91. Авторское свидетельство № 192728 СССР, E21B10/36 (2000.01). Устройство для ударно-поворотного бурения шпуров фасонного профиля : №1066682/03 : заявлено 05.04.1966 : опубликовано 02.03.1967 / Ведутин В. Ф., Легастаев Е. Г., Николаев В. П. – Бюл. № 6.
92. Авторское свидетельство № 1680978 СССР, E21C37/00 (2000.01). Инструмент для нанесения продольных углублений на стенках шпуров и скважин : №4674308/03 : заявлено 04.04.1989 : опубликовано 30.09.1991 / Вороненко В. К., Гааль А. В., Коротаев А. Е., Хан А. – Бюл. № 36.
93. Авторское свидетельство № 899822 СССР, E21B7/28 (2000.01). Устройство для выполнения взрывных шпуров и скважин : № 2791330/22-3 : заявлено 10.07.1979 : опубликовано 01.10.1971 / Лобанов Д. П., Фонберштейн Е. Г., Экомасов С. П., Трегуб А. М. – Бюл. № 26.
94. Авторское свидетельство № 968394 СССР, E21C37/00 (2000.01). Инструмент для выполнения профильных углублений на стенках шпуров : №3272901/22-03 : заявлено 03.04.1981 : опубликовано 23.10.1982 / Кононов В. М. – Бюл. № 39.
95. Авторское свидетельство № 1335695 СССР, E21C37/00 (2000.01). Инструмент для выполнения профильных углублений на стенках шпуров : №4049037/22-03 : заявлено 01.04.1986 : опубликовано 07.09.1987 / Климентов М. Н., Коваленко А. И. – Бюл. № 33.

96. Авторское свидетельство № 1519847 СССР, E21B7/28 (2000.01). Устройство для бурения скважин : №4348330/22-03 : заявлено 23.12.1987 : опубликовано 15.10.1989 / Климентов М. Н., Коваленко А. И. – Бюл. № 38.
97. Авторское свидетельство № 12011481 СССР, E21B7/28 (2000.01). Буровое устройство : №3753584/22-03 : заявлено 12.11.1984 : опубликовано 30.12.1985 / Фонберштейн Е. Г., Экомасов С. П., Лучинин Г. А. – Бюл. № 48.
98. Авторское свидетельство № 1283380 СССР, E21C37/00 (2000.01). Инструмент для нанесения профильных углублений на стенки шпуров : №3877143/22-03 : заявлено 01.04.1985 : опубликовано 15.01.1987 / Гриценко В. Ф., Чувилин М. А., Синцов Е. А. [и др.] – Бюл. № 2.
99. Авторское свидетельство № 400699 СССР, E21C13/08 (2000.01). Буровой инструмент для образования скважин прямоугольного сечения : №1615931/22-03 : заявлено 29.06.1971 : опубликовано 23.01.1982 / Лысенко В. М., Ситников В. Д., Ситников Е. В. – Бюл. № 3.
100. Авторское свидетельство № 821654 СССР, E02D17/14 (2000.01). Устройство для бурения неглубоких скважин прямоугольного сечения : №2521067/22-03 : заявлено 28.06.1977 : опубликовано 15.04.1981 / Токарь М. Г. – Бюл. № 14.
101. Авторское свидетельство № 1694843 СССР, E21B7/24 (2000.01). Устройство для образования скважин для буронабивных свай : №4764209/22-03 : заявлено 16.11.1989 : опубликовано 30.11.1991 / Габибов Ф. Г., Терехин И. И., – Бюл. № 44.
102. Авторское свидетельство № 945354 СССР, E21B10/40 (2000.01). Устройство для бурения шпуров с профильными углублениями : №3237261/22-03 : заявлено 14.01.1981 : опубликовано 23.07.1982 / Кононов В. М., Головашкин Ю. В., Чельшев А. М., Шаповалов Е. А. – Бюл. № 27.
103. Авторское свидетельство № 825919 СССР, E21C17/00 (2000.01). Устройство для бурения шпуров некруглой формы : №2805425/22-03 : заявлено 02.08.1979 : опубликовано 30.04.1981 / Михайлов В. В., Орт В. Г., Аржевикин С. И., Мацько А. П. – Бюл. № 16.

104. Авторское свидетельство № 1514897 СССР, E21B7/28 (2000.01). Устройство для бурения скважин : №4348330/22-03 : заявлено 23.12.1987 : опубликовано 15.10.1989 / Климентов М. Н., Коваленко А. И. – Бюл. № 38.
105. Авторское свидетельство № 1216318 СССР, E21B7/00 (2000.01). Устройство для бурения скважин квадратного сечения : №3773161/22-03 : заявлено 24.07.1984 : опубликовано 07.03.1986 / Романенко А. Е. – Бюл. № 9.
106. Авторское свидетельство № 1023079 СССР, E21C11/00 (2000.01). Устройство для образования щелей в массиве горной породы : №3356308/22-03 : заявлено 31.08.1981 : опубликовано 15.06.1983 / Кудинцев Э. М. – Бюл. № 22.
107. Патент № 2065022 Российская Федерация. E21B10/36 (2006.01) Буровая коронка для ударного бурения : № 93040942/03 : заявлено 12.08.1993 : опубликовано 10.08.1996 / Дворников Л. Т., Прядко Ю. А., Губанов Е. Ф. ; Патентообладатель(и): Сибирская государственная горно-металлургическая академия (RU). – Бюл. № 26. – 5 с.
108. Авторское свидетельство № 506310 СССР, E21B5/00 (2000.01). Устройство для бурения : №1683658/22-03 : заявлено 19.07.1971 : опубликовано 05.03.1976 / Аллан Р. Х. – Бюл. № 9.
109. Авторское свидетельство № 912927 СССР, E21C17/00 (2000.01). Устройство для бурения шпуров некруглой формы : №2925988/22-03 : заявлено 16.05.1980 : опубликовано 15.03.1982 / Михайлов В. В., Орт В. Г., Аржевикин С. И., Мацько А. П., Павлов В. Д., Рындин Э. Г. – Бюл. № 10.
110. Авторское свидетельство № 949154 СССР, E21B7/28 (2000.01). Устройство для бурения шпуров : №3216314/22-03 : заявлено 12.12.1980 : опубликовано 07.08.1982 / Михайлов В. В., Орт В. Г., Аржевикин С. И. – Бюл. № 29.
111. Авторское свидетельство № 1006699 СССР, E21B10/32 (2000.01). Буровое устройство : №3328212/22-03 : заявлено 12.08.1981 : опубликовано 23.03.1981 / Фонберштейн Е. Г., Экомасов С. П., Лучинин Г. А. – Бюл. № 11.

112. Авторское свидетельство № 977680 СССР, E21B10/32 (2000.01). Долото для бурения взрывных скважин : №3307648/22-03 : заявлено 25.06.1981 : опубликовано 30.11.1982 / Фонберштейн Е. Г., Экомасов С. П., Садыков С. Г., Тимоненко Г. Н. – Бюл. № 44.
113. Авторское свидетельство № 1201481 СССР, E21B7/28 (2000.01). Буровое устройство : №3753584/22-03 : заявлено 20.04.1984 : опубликовано 30.12.1985 / Фонберштейн Е. Г., Экомасов С. П., Лучинин Г. А. – Бюл. № 48.
114. Zhukov, I. A. About creation of machines for rock destruction with formation of apertures of various cross-sections / I. A. Zhukov, L. T. Dvornikov, S. M. Nikitenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 124. – P. 012171. – doi: 10.1088/1757-899X/124/1/012171.
115. Патент № 2407875 Российская Федерация. Устройство для бурения скважин некруглого сечения : № 2009129807/03 : заявлено 03.08.2009 : опубликовано 27.12.2010 / Юнгмейстер Д. А., Свинин В. А., Демидов Ю. В. [и др.] ; Патентообладатель(и): Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г.В. Плеханова (технический университет)» (RU), Открытое акционерное общество «Апатит» (RU). – Бюл. № 36. – 8 с.
116. Development of a drilling tool for making non-circular cross-sections of blastholes at open-cast operations / G. Buyalich, V. Tatsienko, M. Khusnutdinov, P. Podkur // The 9th China-Russia Symposium Coal in the 21st Century : Mining, Intelligent Equipment and Environmental Protection, China, Qingdao, 18–21 October 2018. – Paris : Atlantis Press, 2018. – P. 209–212. – (Advances in Engineering Research, ISSN 2352-5401). – ISBN 978-94-62520-569-6. – DOI: 2991/coal-18.2018.38
117. Авторское свидетельство № 1473762 СССР, E21B10/32 (2000.01). Долото для бурения взрывных скважин : № 4210152/23-03 : заявлено 17.03.1987 : опубликовано 15.07.1989 / Садыков Г. С., Лучинин Г. А., Пальшин А. А., Садыков С. С. – Бюл. № 40.

118. Соколова, Е. К. Моделирование устройств для бурения скважин с поперечным сечением некруглой формы / Е. К. Соколова, И. Д. Богомолов // Механизация горных работ : сборник научных трудов Кузбасского политехнического института. – Кемерово: КузПИ, 1992. – С. 78-83.
119. Бовин, К. А. Обоснование рациональных режимных параметров бурения горных пород долотами режуще-вращательного действия / К. А. Бовин, А. В. Гилев // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2017. – № 6 – С. 101-108.
120. Богомолов, И. Д. Забуривание квадратной скважины шарошечным долотом / И. Д. Богомолов, М. К. Хуснутдинов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2004. – № 6.1. – С. 39-41.
121. Хуснутдинов, М. К. О возможности создания инструмента для бурения взрывных скважин с некруглым поперечным сечением / М. К. Хуснутдинов, Д. А. Малышкин, К. В. Начев // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности : сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции, 18-21 сентября 2012 года, г. Кемерово. – Кемерово : СО РАН, КемНЦ СО РАН, ИУ СО РАН, ИУХМ СО РАН, КузГТУ, ООО КВК «Экспо-Сибирь», 2012 – С. 136–138.
122. Богомолов, И. Д. Предпосылки по созданию и использованию инструмента для получения взрывных скважин на открытых горных работах / И. Д. Богомолов, М. К. Хуснутдинов, Д. А. Малышкин, И. П. Головин, А. Н. Тимшин // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов : сборник научных статей Международной научно-практической конференции в рамках XIX международной специализированной выставки «Уголь России и Майнинг», 5-8 июня 2012 года, г. Новокузнецк. – Новокузнецк : СибГИУ, 2012. – С. 66–69.
123. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – Москва : Наука, 1968. – 720 с.
124. Богомолов, И. Д. О применении шарошечного типа исполнительного органа для бурения скважин некруглой формы / И. Д. Богомолов, М. К. Хуснутдинов // Горный информационно-аналитический бюллетень – 2003. – № 2. – С. 215-216

125. Богомолов, И. Д. Оборудование для бурения шпуров некруглого сечения / И. Д. Богомолов, М. К. Хуснутдинов // Горное оборудование и электромеханика. – 2006. – № 3. – С. 12-14.
126. Устюгов, Е. В. Поперечные колебания шарошечных долот / Е. В. Устюгов, А. Н. Глухов // Совершенствование буровых и горных работ. Среднеазиатский научно-исследовательский институт геологии и минерального сырья : сборник научных трудов – Ташкент, 1985. – С. 46-51.
127. Палащенко, Ю. Катастрофическое снижение эффективности бурения из-за эксцентричного вращения долота на забое скважины // Бурение и нефть. – 2006. – №9. – С. 28-30.
128. Трушкин, О. Б. Несбалансированность конструкции вооружения долот как причина самопроизвольного искривления скважины и формирования некруглого сечения ее ствола / О. Б. Трушкин // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2012. – № 11. – С. 4-9.
129. Фишберн, П. Теория полезности для принятия решений / П. Фишберн. – Москва : Мир, 1978. – 520 с.
130. Буялич, Г. Д. Оценка конкурирующих технических решений по нескольким критериям / Г. Д. Буялич // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2003. – № 6. – С. 39-40.
131. Буялич, Г. Д. Применение функции полезности для оценки параметров крепи / Г. Д. Буялич // Механизация горных работ: сборник научных трудов / Кузбасский государственный технический университет. – Кемерово, 1994. – С. 6-9.
132. Буткин, В. Д. Выбор и рациональная эксплуатация буровых инструментов и станков на карьерах : монография / В. Д. Буткин, А. В. Гилев, Д. Б. Нехорошев [и др.] ; под общей редакцией доктора технических наук, профессора В. Д. Буткина, доктора технических наук, профессора А. В. Гилева ; Сибирский федеральный университет. – Москва : ИНФРА-М ; Красноярск : СФУ, 2018. – 234 с. – ISBN 978-5-16-013401-7

133. Буткин, В. Д. Исследование основных параметров режима шарошечного бурения взрывных скважин на открытых горных разработках : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Буткин, Владимир Дмитриевич, Государственный комитет по топливной промышленности при Госплане СССР. Институт горного дела им. А. А. Скочинского. – Москва, 1964. – 25 с.
134. Гилев, А. В. Повышение эффективности эксплуатации буровой техники на горных предприятиях : монография / А. В. Гилёв, А.О. Шигин, В.Т. Чесноков, И. Р. Белозеров Министерство образования и науки Российской Федерации, Сибирский федеральный университет. – Красноярск : СФУ, 2013. – 370 с. – ISBN 978-5-7638-2866-5
135. Шигин, А. О. Напряжения и стойкость шарошечных долот при бурении сложноструктурных массивов горных пород / А. О. Шигин, А. В. Гилев, А. А. Шигина // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 4. – С. 325-333
136. Эйгелес, Р. М. Разрушение горных пород при бурении / Р. М. Эйгелес. – Москва : Недра, 1971. – 231 с.
137. Эйгелес, Р. М. Расчет и оптимизация процессов бурения скважин / Р. М. Эйгелес, Р. В. Стрекалова. – Москва : Недра, 1977. – 200 с.
138. Симонов, В. В. Работа шарошечных долот и их совершенствование / В. В. Симонов, В. Г. Выскребцов. – Москва : Недра, 1975. – 239 с.
139. Симонов, В. В. Влияние колебательных процессов на работу бурильного инструмента / В. В. Симонов, Е. К. Юнин. – Москва : Недра, 1977. – 217 с.
140. Балицкий, П. В. Взаимодействие бурильной колонны с забоем скважины / П. В. Балицкий. – Москва : Недра, 1975. – 294 с.
141. Юнин, Е. К. Автоколебания в глубоком бурении / Е. К. Юнин. – Москва : URSS : ЛИБРОКОМ, 2013. – 262 с. – ISBN 978-5-397-03499-9.

142. Смокотин, Г. Я. Кинематические задачи : учебно-методическое пособие по теоретической механике для строительных и строительного-механических специальностей заочных и вечерних факультетов вузов / Г. Я. Смокотин, А. Д. Ходор, Н. А. Тетерин ; Томский инженерно-строительный институт, Кафедра теоретической механики. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 1967. – 126 с., 1 л. табл. : черт.
143. Бирюков, И. М. Шарошечное бурение в горном деле / И. М. Бирюков. – Москва : Госгортехиздат, 1962. – 163 с.
144. Богомолов, И. Д. Кинематические и геометрические аспекты бурения скважин некруглой формы шарошечным долотом / И. Д. Богомолов, М. К. Хуснутдинов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2004. – № 6.1. – С. 15-18.
145. Богомолов, И. Д. Вопросы создания исполнительного органа для механического бурения скважин с некруглым поперечным сечением в крепких породах / И. Д. Богомолов, А. М. Цехин, М. К. Хуснутдинов // Динамика и прочность горных машин: Сборник трудов II Международной конференции, 28-29 мая 2003 года, Том I, г. Новосибирск. – Новосибирск, 2003. – С. 74-79
146. Буялич, Г. Д. Оценка форм поперечного сечения взрывной полости для разрушения горной породы / Г. Д. Буялич, М. К. Хуснутдинов, А. А. Баканов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2017. – № 1. – С. 53–58.
147. Раев, А. Г. Об одном способе определения весовых коэффициентов частных критериев при построении аддитивного и интегрального критерия / А. Г. Раев // Автоматика и телемеханика. – 1984. – № 5. – С. 162-165.
148. Румшицкий, Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента : Справочное руководство / Л. З. Румшицкий. – Москва : Наука, 1971. – 192 с.
149. Буялич, Г. Д. Особенности шарошечного бурового инструмента для получения некруглого поперечного сечения скважины / Г. Д. Буялич, В. Н. Шмат, М. К. Хуснутдинов // Горное оборудование и электромеханика. – 2017. – № 5. – С. 10-14.

150. Посташ, С. А. Повышение надежности и работоспособности шарошечных долот / С. А. Посташ. – Москва : Недра, 1982. – 121 с.
151. Блинков, О. Г. Возможности физического моделирования напряженно-деформированного состояния опорных элементов шарошечного долота / О. Г. Блинков, С. Г. Фролов, С. А. Майоров // Известия Уральского государственного горного университета. – 2017. – №1. – С. 65-67
152. Buyalich, G. Justification of the Shape of a Non-Circular Cross-Section for Drilling With a Roller Cutter / G. Buyalich, M. Khusnutdinov // E3S Web of Conferences. – EDP Sci-ences, 2017. – Vol. 21 : The second international innovative mining symposium. – P. 03010 – DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172103010>.
153. Богомолов, И. Д. Об использовании нетрадиционных форм заряда для взрывного дробления и буровом инструменте для его осуществления / И. Д. Богомолов, М. К. Хуснутдинов // Влияние научно-технического прогресса на экономическое развитие Кузбасса : материалы I региональной научно-практической конференции, 15 марта 2007 года, г. Прокопьевск. – Прокопьевск : КузГТУ, 2007. – С. 151-153.
154. Буткин, В. Д. О способах повышения экономичности буровых долот с шарошечным вооружением на карьерах / В. Д. Буткин, А. В. Гилев, Д. Б. Нехорошев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 6. – С. 255-257.
155. Гилёв, А. В. Научно-технические основы создания специализированных буровых инструментов и технологий их применения на карьерах : специальность 05.05.06 «Горные машины» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Гилёв, Анатолий Владимирович ; Иркутский государственный технический университет. – Красноярск, 2005. – 49 с.
156. Грибенников, Н. В. Разборные шарошечные долота и их проектирование / Н. В. Грибенников. – Екатеринбург : Автограф, 2012. – 137 с. – ISBN 978-5-98955-105-7.

157. Патент № 141747 Российская Федерация, МПК Е 21 В 10/28 (2006.01). Разборный шарошечный буровой инструмент : № 2014103421/03 : заявлено 31.01.2014 : опубликовано 10.06.2014 / Богомолов И. Д., Любимов О. В., Хуснутдинов М. К., Малышкин Д. А. ; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет» (КузГТУ). – Бюл. № 16. – 2 с.

158. Патент № 2548274 Российская Федерация, МПК Е 21 В 10/28 (2006.01). Разборный буровой инструмент : № 2014103415/03 : заявлено 31.01.2014 : опубликовано 20.04.2015 / Богомолов И. Д., Любимов О. В., Хуснутдинов М. К., Малышкин Д. А. ; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет» (КузГТУ). – Бюл. № 11. – 5 с.

159. Патент № 2549336 Российская Федерация, МПК Е 21 В 10/28 (2006.01). Разборное буровое долото : № 2014113586/03 : заявлено 07.04.2014 : опубликовано 27.04.2015 / Богомолов И. Д., Любимов О. В., Хуснутдинов М. К., Малышкин Д. А. ; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет» (КузГТУ). – Бюл. № 12. – 10 с.

160. Патент № 2592911 Российская Федерация, МПК Е21В 10/28 (2006.01). Шарошечный буровой инструмент : № 2015120830/03 : заявлено 01.06.2015 : опубликовано 21.07.2016 / Богомолов И. Д., Тациенко В. П., Хуснутдинов М. К., Любимов О. В. ; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет» (КузГТУ). – Бюл. № 21. – 8 с.

161. Патент № 2655505 Российская Федерация, МПК E21B10/22 (2006.01), E21B10/28 (2006.01). Буровой инструмент : № 2017131006 : заявлено 01.09.2017 : опубликовано 28.05.2018/ Хуснутдинов М. К, Любимов О. В., Головин И. П., Малышкин Д. А. ; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет» (КузГТУ). – Бюл. № 16. – 8с.
162. Мокшин, А. С. Шарошечные долота / А. С. Мокшин, Ю. Е. Владиславлев, Э. Л. Комм. – Москва : Недра, 1971. – 215 с.
163. Буялич, Г. Д. Испытания шарошечного инструмента для бурения взрывных скважин некруглого поперечного сечения / Г. Д. Буялич, В. П. Тациенко, М. К. Хуснутдинов // Уголь. – 2019. – № 7. – С. 15-18. – DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2019-7-15-18>.

ПРИЛОЖЕНИЕ А**АКТ****испытаний экспериментального образца шарошечного бурового инструмента для получения скважин с некруглым поперечным сечением**

г. Киселевск

17 ноября 2017 г.

1. УСЛОВИЯ ИСПЫТАНИЙ

Место проведения испытаний: Разрез «Заречный»

Крепость буримой породы: $f=4$

Буровой станок: DML1200

Максимальное осевое усилие: 135 кН

Частота вращения: 134-138 об/мин

2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОБЪЕКТЕ ИСПЫТАНИЙ

Буровой инструмент состоит из шарошечного расширителя и опережающего шарошечного долота (рис. 1).

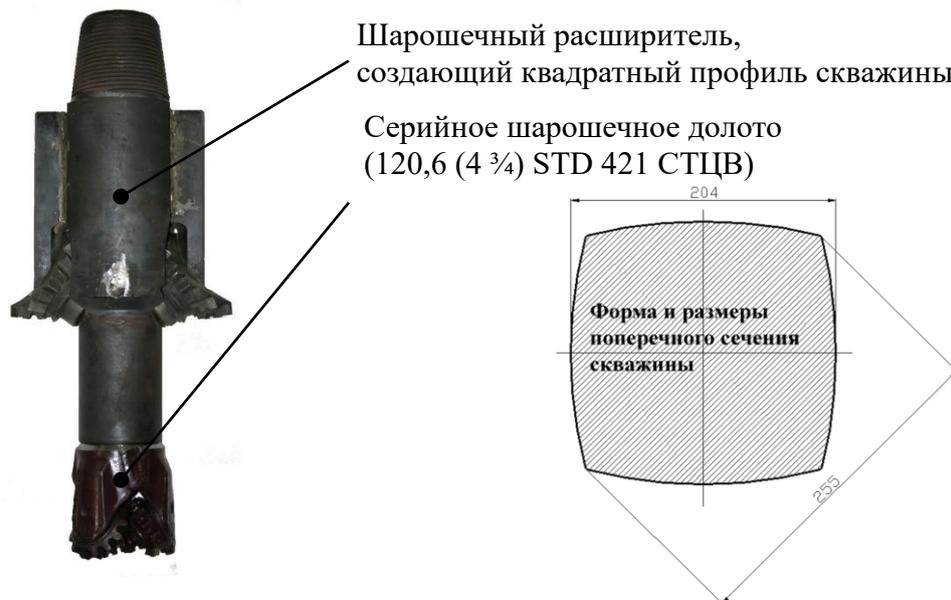


Рис. 1. Буровой инструмент и форма скважины

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Параметры процесса бурения

Параметр	Значение
Глубина скважины, м	15
Угол наклона скважины, град	15
Осевое усилие, кН	112-135
Частота вращения, об/мин	134-138
Показания манометра вращателя, фунтов/дюйм ²	2500-3000
Давление компрессора, кгс/см ²	5
Средняя скорость бурения	96 м/ч

Состояние отработанного бурового инструмента

Состояние подшипниковых опор шарошек расширителя:	
Шарошка 1	невозможность поворота в ручную
Шарошка 2	нормальное состояние
Состояние подшипниковых опор шарошек опережающего долота	Наличие осевого и радиального люфтов
Нагрев шарошек расширителя (на ощупь)	около 40 ⁰ С
Нагрев шарошек опережающего долота (на ощупь)	более 100 ⁰ С
Износ вооружения шарошек расширителя и опережающего долота	отсутствует
Расход содержимого резервуаров смазки расширителем	Шарошка 1 – 100% (резервуар пуст) Шарошка 2 – 95 %

Выводы комиссии:

1. Буровой инструмент способен создавать заданную форму некруглого поперечного сечения скважины.
2. Спиралевидная форма стенок пробуренной скважины вызвана слабой нагруженностью шарошек расширителя вследствие перегрузки опережающего долота, которое не справлялось со своей работой (об этом свидетельствует перегрев шарошек опережающего долота и слабый нагрев шарошек расширителя). В таких условиях шарошки расширителя перекатываются со скольжением зубьев по забою, что приводит к формированию слабо выраженной зубчатой рейки на забое скважины и повороту квадратного профиля скважины по направлению вращения.
3. Наличие преждевременного износа подшипниковых опор опережающего долота вызвано тем, что оно предназначено для бурения с промывкой.
4. Невозможность вращения в ручную одной из шарошек свидетельствует о поломке подшипникового узла.
5. Подклинивание вращения инструмента на глубине более 13 м вызвано поломкой подшипникового узла одной из шарошек.
6. Колебания осевого усилия и крутящего момента на глубине от 0,8 до 13 м вызваны:
 - а) некруглой формой поперечного сечения;
 - б) рассогласованием исходного положения шарошек после повторного опускания бурового инструмента в скважину с винтовой поверхностью ее стенок.
7. Рывки при подъеме бурового инструмента вызваны спиралевидностью формы стенок скважины и наличием вращения, которое не было предусмотрено методикой промышленных испытаний.
8. Конструкция бурового инструмента не позволяет механизировать процесс его монтажа и демонтажа на буровой став.

Решение комиссии

1. Требуется приобретение опережающих долот, предназначенных для бурения с продувкой и с более агрессивным вооружением их шарошек.
2. Выяснение причин повреждения подшипникового узла одной из шарошек расширителя после его разборки.

3. В инструкции по бурению скважин с квадратным поперечным сечением предусмотреть:
 - а) подъем инструмента без вращения;
 - б) опускание инструмента на забой перед бурением без вращения;
 - в) наращивание бурового става без подъема инструмента.
4. Необходимо разработать устройство для монтажа/демонтажа бурового инструмента, предусмотрев возможность согласования положения шарошек между собой перед бурением.
5. Применение более консистентной смазки опор шарошек расширителя для уменьшения ее расхода при бурении.

Представители
заказчика:

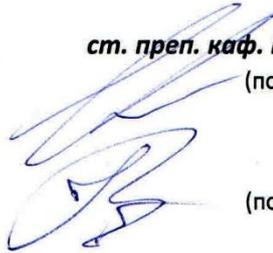


машинист буровой установки Абрамкин Евгений Олегович
(подпись, должность, фамилия имя отчество)



ведущий инженер по БВР Журкин Иван Евгеньевич
(подпись, должность, фамилия имя отчество)

Представители
разработчика:



ст. преп. каф. ГМиК КузГТУ Хуснутдинов Михаил Константинович
(подпись, должность, фамилия имя отчество)



проф. каф. ОГР КузГТУ Катанов Игорь Борисович
(подпись, должность, фамилия имя отчество)