



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ»
(МГРИ)

На правах рукописи

ЧИХОТКИН АЛЕКСЕЙ ВИКТОРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ИНСТРУМЕНТА С РЕЗЦАМИ РДС РАВНОПРОЧНОГО ПРОФИЛЯ С
УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ
ПОРОД И СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕДЫ**

25.00.14 - Технология и техника геологоразведочных работ

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

**Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор Соловьев Н.В.**

Москва, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ РАЗРАБАТЫВАЕМОГО БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА, ОСНАЩЕННОГО РЕЗЦАМИ PDC, МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДОЛОТ С РЕЗЦАМИ PDC И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	11
1.1 Анализ конструкции резцов PDC и бурового инструмента на их основе. Параметры механизма разрушения горных пород.....	11
1.2 Закономерности изнашивания резцов PDC в долотах при бурении различных по твердости и абразивности горных пород	34
1.3 Формирование параметров системы проектирования современных типов буровых долот	43
1.4 Задачи исследований	53
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И СОЗДАНИЮ БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ PDC	55
2.1 Методика исследования работы буровой коронки при взаимодействии с горной породой	55
2.2 Методика обработки результатов исследований	59
2.3 Исследование призабойных процессов разрушения горной породы. Планирование и определение рационального объема экспериментов.....	63
3 ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ-СКАЛЫВАНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ РЕЗЦАМИ PDC	69
3.1 Анализ причин и оценка закономерностей изнашивания резцов PDC.....	69

3.2	Обоснование и разработка теоретических основ механики разрушения горных пород резцами PDC с учетом динамических процессов резания	73
3.3	Стендовые исследования процесса разрушения горных пород коронками с алмазным вооружением.....	99
4	ГЛАВА 4. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДОЛОТ С РЕЗЦАМИ PDC УЧЕТОМ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ-СКАЛЫВАНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ И СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕДЫ.....	113
4.1	Методика проектирования долот с резцами PDC.....	113
4.2	Разработка долот с резцами PDC в рамках программы совершенствования конструкций буровых долот.....	124
	ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.....	135
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	139

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Применение долот с резцами типа *PDC* при бурении скважин различного назначения преимущественно в мягких и средних по твердости горных породах в настоящее время стало не просто значительным, а доминирующим в сравнении с другими типами долот, которые могут быть вооружены резцами из карбид-вольфрам-кобальтого (*WC*) сплава или шарошечными долотами дробящее-скалывающего действия, в том числе долотами с эффектом проскальзывания. Это связано, прежде всего, с высокими эксплуатационными характеристиками долот, оснащенных резцами *PDC*, их высочайшей поверхностной твердостью и износостойкостью, высокими режущими качествами [4, 6, 7, 24, 36, 55, 67, 73].

Ресурс долот, особенно с термостойкими резцами *PDC* типа *TSD*, составляет от нескольких десятков и сотен метров до тысячи и более метров, а механическая скорость бурения может достигать нескольких десятков метров в час, в среднем составляя 20–40 м/ч [39, 72].

В настоящий момент направление, связанное с созданием новых вариантов и видов материалов для создания буровых инструментов, активно развивается [13, 15, 26–28, 34, 51, 84, 75].

Более низкие эксплуатационные показатели долота с резцами *PDC* имеют при бурении средних по твердости горных пород с присутствием пропластков твердых пород или при бурении достаточно мощных слоев твердых горных пород. В этом случае скорость бурения такими долотами будет не выше нескольких метров в час, а ресурс снизится до ста–двухсот метров проходки.

По коллектору и по горным породам средней твердости или мягким горным породам ресурс долот может составлять более тысячи метров, проходимых, как правило, с высокой механической скоростью (40 и более м/ч). Известны случаи проходки по коллектору в интервале двух и ладе трех тысяч метров, что являет уникальность данного типа бурового инструмента.

В условиях бурения глубоких скважин и скважин с протяженными горизонтальными стволами эти качества становятся решающими при достижении оперативной скоростной проходки скважин с целью эффективной последующей эксплуатации месторождения углеводородного сырья. Это

связано в том, что более частая замена вышедших из строя долот, приводящая к длительным спуско-подъемным операциям, во-первых, затягивает процесс строительства скважины, а во-вторых, отрицательно влияет на устойчивость участков ствола скважины и на качества вскрываемого коллектора [38, 63].

В то же время, учитывая сложность и высокую изменчивость геологических условий бурения, например, на площадях Восточной Сибири, где в настоящее время ведутся активное геологоразведочное и эксплуатационное бурение, представляется актуальным создание долот с более высокими эксплуатационными характеристиками, способными преодолеть сложные горно-геологические условия, обеспечивая устойчиво, как высокий темп проходки, так и значительный ресурс.

Наличие пропластков плотных и твердых горных пород, зон трещиноватости и дробления, рассланцеватость горных пород, наклонное залегание пластов и необходимость их пересечения под самыми разнообразными углами встречи, отрицательно влияют на стойкость долот. В то же время повышение эксплуатационных характеристик долот, а также неизменное стремление развивать эксплуатационные характеристики буровых долот, тема диссертационного исследования, посвященная повышению, прежде всего, стойкости долот за счет создания равнопрочного вооружения, является актуальной.

Данное научное исследование обладает безусловной научной значимостью, поскольку посвящено развитию современных и перспективных буровых технологий, совершенствованию самого современного бурового инструмента из сверхтвердых материалов, созданных из искусственных поликристаллических алмазов.

Тема исследования механики разрушения твердых материалов, с учетом линейной скорости работающего резца в упруго-жидкой среде, насыщенной твердой фазой разной фракции и состава, может быть востребована при создании любых новых типов буровых инструментов, например, для высокочастотного алмазного бурения, механической и гидро-механической обработки камня, металлов и других твердых тел и образований.

Практическая значимость работы также крайне важна и составляет значимую часть актуальности диссертационного исследования, определяя высокую роль буровых технологий в системе разведки и добычи полезных

ископаемых, прежде всего углеводородного сырья. Рост основных эксплуатационных характеристик буровых долот определяет сроки и стоимость бурения скважин, что решающим образом отражается на себестоимости буровых работ и, соответственно, стоимости добываемого сырья.

Проблемой повышения эффективности работы инструментов режуще-скалывающего действия при бурении скважин занимались в разное время многие исследователи.

Решением отдельных ее аспектов посвящены работы Барона Л.И., Башкатова Д.Н., Богданова Р.К., Блинова Г.А., Борисова К.И., Будюкова Ю.Е., Владиславлева В.С., Власюка В.И., Горшкова Л.К., Зварыгина В.И., Зиненко В.П., Мавлютова М.Р., Кардыша В.Г., Киселева А.Т., Корнилова Н.И., Куликова И.В., Нескормных В.В., Остроушко И.А., Перетолчина В.А., Страбыкина Н.Н., Попова А.Н., Протодяконова М.М., Рожкова В.П., Спивака А.И., Спирина В.И., Сулакшина С.С., Третьяка А.Я., Третьяка А.А., Чихоткина В.Ф., Федорова А.С., Шрейнера Л.А., Эйгелеса Р.М., Эпштейна Е.Ф., Бессон А., Беллин Ф., и др.

В своих исследованиях перечисленные ученые создали богатую научную базу по проблемам разрушения горных пород при бурении скважин различного назначения.

Вместе с тем, одним из главных аспектов целесообразности дальнейших работ по исследованию разрушения горных пород инструментами *PDC* при бурении скважин является то, что реальная физическая картина динамического, с учетом скорости резания-скалывания, до настоящего времени комплексно не изучена и детально не описана [9, 10, 23, 86]. К этой проблеме примыкает вплотную исследование возможностей повышения ресурсных показателей долот с резцами *PDC* применительно к технологии бурения глубоких скважин как ВЗД, так и верхним приводом (ротором).

Поэтому весьма актуальными являются более глубокие аналитические и экспериментальные исследования проблемы, восполняющие пробелы в данной области, что позволит совершенствовать методики проектирования бурового инструмента, в том числе системы компьютерного моделирования, используемые при проектировании новых типов и серий буровых долот, бурильных головок и коронок для геологоразведочного бурения.

Цель работы: Повышение стойкости долот с резцами *PDC*, определяющей их ресурс и производительность за счет применения усовершенствованной методики проектирования с учетом динамических особенностей механизма разрушения горных пород и сопротивления среды.

Идея работы заключается в том, что для разработки методики создания равнопрочного профиля бурового долота оснащенного резцами *PDC* производится расчет параметров разрушения (глубины резания-скалывания, тангенциального усилия, осевого усилия) с учетом влияния сопротивления, как горной породы, так и среды (бурового раствора насыщенного продуктами разрушения горной породы), проявляющейся в зависимости от линейной скорости перемещения резцов в процессе резания-скалывания горной породы.

Предмет исследования: параметры процесса взаимодействия долота режуще-скалывающего действия с резцами типа *PDC* с учетом сопротивления среды и влияние угла установки пластин на эффективность процесса разрушения забоя».

Объект исследования: Прочностные характеристики и характеристики изнашивания вооружения долот с резцами типа *PDC* с учетом механизма работы резцов и сопротивления среды, исследование закономерностей изнашивания резцов и разработка методики обоснования их прочностных характеристик с учетом механизма взаимодействия с горной породой на забое в процессе бурения.

Научная новизна диссертационного исследования.

1. Установлена аналитическая зависимость усилий сопротивления и углубки резания-скалывания горной породы резцами *PDC* от величины и характера распределения по радиусу долота линейной скорости, что определяет различную сопротивляемость горной породы разрушению, а значит и условия для неравной прочности вооружения долот, соответственно и потенциальной неравномерной стойкости резцов вооружения к скалыванию и изнашиванию, и предложена методика создания равнопрочного вооружения долот за счет изменения параметров установки резцов на торце долота.

2. Создана аналитическая модель механизма разрушения горных пород резцами *PDC* и предложена методика равнопрочного вооружения долота путем изменения параметров установки резцов на торце долота,

которая учитывает зависимость сопротивления горной породы и среды от линейной скорости резания-скалывания горной породы.

Научная значимость диссертационного исследования определяется разработанной теорией влияния скорости резания-скалывания горной породы на процесс разрушения и глубину формируемой борозды разрушения, в установленной зависимости сопротивления горной породы разрушению в зависимости от сопротивления среды, а именно, бурового раствора, насыщенного продуктами разрушения горной породы, а также глубины резания-скалывания горной породы от параметров установки резцов, прежде всего, переднего угла резания, фронтального угла резания, диаметра резца, и его формы.

Практическая значимость работы состоит в совершенствовании конструктивных параметров буровых долот на основе PDC с высокими эксплуатационными характеристиками.

Методика выполнения диссертационного исследования основана на проведении анализа предшествующих научных работ и опыта применения буровых долот на производстве, а также аналитических исследованиях механики разрушения горных пород резцами типа *PDC* в сочетании с результатами экспериментальных исследований, сопоставлении всех полученных данных с целью поиска их сходимости. Исследования экспериментального типа, их результаты обрабатывались методами математической статистики с целью оценки достоверности полученных результатов.

Защищаемые положения диссертационного исследования.

1. Буровой раствор, насыщенный шламом в зоне контакта инструмента и забоя, создает сопротивление как на инструмент, так и на забой, где изнашивание долот с резцами типа *PDC* соответствует точкам, в которых линейная скорость резания-скалывания является наибольшей.

2. Эффективность бурения горных пород резцами типа PDC зависит от величины переднего угла их установки, линейной скорости перемещения инструмента по забою и сопротивления среды бурового раствора, что позволяет прогнозировать показатели процесса разрушения горных пород с учетом этого комплекса параметров.

3. Сопротивление горной породы разрушению и рост сопротивления среды влияют на глубину внедрения режущих элементов в забой, что обуславливает необходимость регулирования величины осевой нагрузки на резец.

4. При проектировании равнопрочного профиля долота *PDC* необходимо учитывать схему расстановки резцов, закономерности изменения сопротивления среды в виде бурового раствора, насыщенного шламом, и значений линейной скорости резания-скалывания породы резцами.

Апробация результатов исследования. Результаты исследований по теме диссертации были представлены на следующих научно-технических конференциях: Международная научно-практическая конференция «Геологоразведочное и нефтегазовое дело в 21 веке. - Алматы. 2016г., IX Международная конференция молодых ученых «Молодые – Научкам о Земле» - Москва. 2020г., III Всероссийская научно-практическая конференция обучающихся и преподавателей «Энергетика и автоматизация в современном обществе» - Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, 1st International Symposium on Deep Earth Drilling and Resource Development (Earth-3D, 2019) «Special characteristics of interaction between the PDC drill bit and borehole bottom» - Ухань, Китай, 2019, International Conference on the Cooperation and Integration of Industry, Education, Research and Application «Theory, Modeling and Designing of PDC drill bits with taking into account dynamic processes destruction rock and resistance of medium» - Гирин, Китай, 2020.

Личный вклад соискателя заключается в проведении аналитических исследований, постановке и проведении экспериментов, анализе экспериментальных результатов и их статической значимости, в непосредственном участии в проведении исследований, обработке данных и формулировке основных выводов, результаты которых приведены в диссертации.

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 8 работ, в том числе 4 работы в рецензируемых изданиях, получено 2 патента на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, основных выводов, и библиографического списка. Работа изложена на 147 страниц машинописного текста, содержит 79 рисунков, 13 таблиц,

библиографический список из 89 наименований.

Авторская благодарность и признательность:

Экспериментальные и аналитические исследования проводились на базе Китайского Геологического университета (КНР Ухань).

Автор выражает благодарность сотрудникам Китайского университета геологических наук (Ухань, КНР), а именно проф. Тан Фунлиню, Жан Гошену, Дуану Лунчэну, Нинг Фулонгу, проф. В. Ф. Чихоткину, проф. В.В. Нескормных, проф. Н.В. Соловьеву, проф. А. Я. Третьяку, сотрудникам Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), сотрудникам кафедры бурения Южно-российского государственного технического университета им. И.М.Платова, сотрудникам Иркутского государственного технического университета.

1. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ РАЗРАБАТЫВАЕМОГО БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА, ОСНАЩЕННОГО РЕЗЦАМИ *PDC*, МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДОЛОТ С РЕЗЦАМИ *PDC* И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Анализ конструкции резцов *PDC* и бурового инструмента на их основе. Параметры механизма разрушения горных пород.

На современном этапе развития геологоразведочных работ в области бурения долотами на основе сверхпрочных материалов особое внимание уделяют качеству инструмента. Полезные ископаемые при бурении скважин и разработки месторождений находятся на больших глубинах, чем ранее, что обуславливает высокое требование к технике и технологии бурения.

На ранних этапах становления геологоразведочной отрасли в части бурения скважин особое внимание уделялось применению инструмента на основе твердого сплава, шарошочных долот, однако их эффективность была настолько низка, что основная часть производства буровых работ сводилась к увеличению спуско-подъемных работ и частой замене инструмента в связи с его быстрым износом.

Современные буровые долота, буровые головки и коронки с резцами для бурения мягких и пород средней твердости с прослоями твердых изготавливают спеканием либо прессованием поликристаллических алмазов, которые отличаются от других композиционных алмазосодержащих материалов, например, *славутич* тем, что имеют жесткий каркас-пластину из сросшихся алмазных зерен. К таким материалам, получившим название *PDC* (*polycrystalline diamonds cutters*) относится созданный в 1976 г. компанией *General Electric* (США) материал *Stratapax*TM. Компания *DeBeers* (ЮАР) выпускает его под названием *Sindet*TM [6, 7, 38, 53, 63, 66, 83].

Институт сверхтвердых материалов, (Киев, Украинская ССР) совместно с ВНИИалмаз (Москва, Россия) в 80-е г. XX в. также разработали несколько марок поликристаллических алмазов на твердосплавной *WC* подложке аналогичных *PDC*. Материал АТП (алмазные твердосплавные пластины – термин, которым названы резцы с использованием поликристаллическими

алмазами в СССР) применялся преимущественно для оснащения бурового инструмента [7, 14, 38, 57] .

PDC резцы с АТП, как показали исследования, не уступают по эксплуатационным качествам крупным природным алмазам и получили широкое распространение. С применением сверхтвердых материалов изготавливаются долота, коронки, расширители, которые успешно заменяют шарошечные долота, твердосплавные коронки, традиционный алмазный инструмент с резцами из природных алмазов, обеспечивая высокий ресурс бурового инструмента [7, 38, 71, 78, 79, 86, 88, 45].

Резцы *PDC* с пластинами *Stratapax*TM способны бурить как мягкие породы с высокой механической скоростью, так и твердые с удовлетворительными механической скоростью и стойкостью бурового инструмента. Именно поэтому буровые инструменты, армированные резцами спластинами *Stratapax*TM, наиболее эффективны при бурении в разрезах, представленных породами перемежающейся твердости и при наличии высокоабразивных горных пород [83, 46].

Таким образом, с появлением резцов с пластинами *Stratapax*TM удалось получить достаточно универсальный буровой инструмент, удовлетворяющий достаточно противоречивым требованиям процесса разрушения мягких пород резанием и твердых пород резанием-скалыванием и раздавливанием.

В бурении используются твердосплавные пластины *Stratapax*TM толщиной 3,5 мм с поликристаллическим покрытием алмазов 0,5 мм. Алмазный слой состоит из спеченных между собой кристаллов размером 60–150 мкм. Твердость пластин, измеренная на приборе ПМТ-3, составляет 50–80 ГПа. Твердосплавная подложка пластины состоит из твердосплавной шихты, содержащей 95% карбида вольфрама и 5% кобальта. Формование пластин осуществляется либо спеканием, либо прессованием.

Пластина *Stratapax*TM получается при совместной обработке отдельных заготовок поликристаллических алмазов и твердого сплава при температуре 1500°, давлении 5 ГПа и выдержке 5–10 мин. В результате алмазный слой синтезируется в виде однородной поликристаллической массы, образующей целое с твердосплавной подложкой и обладающей очень высокой твердостью, износостойкостью и ударной прочностью.

Таблица 1.1

**Сравнительные данные физико-механических и эксплуатационных свойств
сверхтвердых материалов [46]**

Свойства материалов	Поликристаллический алмаз	Природный алмаз среднего размера	Твердый сплав ВК6
Модуль упругости, ГПа	841	964	630
Модуль жесткости, ГПа	345	400	250
Коэффициент Пуассона	0,32	0,2	0,2
Прочность на растяжение, ГПа	1,29	2,6	1,8
Прочность на сжатие, ГПа	7,61	8,68	4,5
Прочность на изгиб, ГПа	1,1	–	4,9
Твердость HRC, ГПа	50	30–80	20
Коэффициент относительной износостойкости	200–300	100–245	2

Фирма *DeBeers* выпускает материал *Sindit*TM в виде двухслойных пластин, состоящих из алмазного слоя толщиной 1–1,5 мм и твердосплавной подложки [45].

Сравнение эксплуатационных свойств *PDC*, природных алмазов и твердого сплава с содержанием кобальта 6% свидетельствует о том, что основные свойства поликристаллических алмазов сопоставимы с природными.

Существенное колебание твердости природных алмазов объясняется анизотропией их структуры, тогда как кристаллы искусственных поликристаллических алмазов изотропны, т.е. физико-механические свойства кристаллов одинаковы во всех направлениях. Это способствует повышению прочности и износостойкости синтетических алмазов. По сравнению с твердым сплавом прочность синтетических поликристаллических алмазов на сжатие выше на 70%, а твердость на 250%. Износостойкость пластин *Stratapax*TM выше, чем природных алмазов, и в 100–150 раз превышает износостойкость твердого сплава. Основные характеристики пластин типа *Stratapax*TM, природных алмазов и твердого сплава ВК6 приведены в табл. 1.1 [38, 83, 46].

В буровом инструменте резцы с поликристаллическими пластинами устанавливают, как правило, с отрицательным передним углом в пределах от (0–5°) до (– 25) в зависимости от твердости горных пород. В инструментах,

предназначенных для бурения более твердых горных пород, передний отрицательный угол задается бóльшим [45].

При расстановке резцов на торце долота производителями чаще всего передний угол установки резцов *PDC* задается одинаковым с учетом прочностных свойств горных пород. В этом случае можно отметить то, что слабо учитываются некоторые особенности динамики работы резца и гидродинамических процессов в процессе работы долота на забое скважины.

Показатели работы инструмента с пластинами *PDC* могут составлять в различных горно-геологических условиях по механической скорости в основном от 2,3 до 40 м/ч, а по стойкости – от 200 до 1000 м. При использовании коронок, оснащенных пластинами *PDC*, при бурении песчаников получена скорость бурения 16 м/ч при стойкости 120–260 м против 3,6 м/ч и 30–60 м у твердосплавных коронок [38].

Таким образом, при бурении осадочных пород, в сравнении с твердосплавным инструментом, использование *PDC* позволяет повысить скорость бурения в 1,5–5 раз и стойкость в 5–15 раз [45].

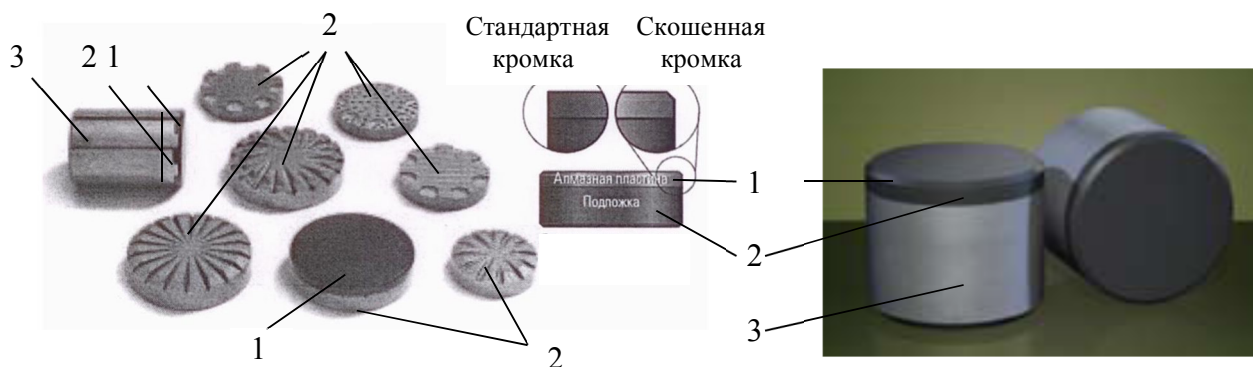


Рис. 1.1. Виды пластинок и резцов *PDC* и возможные формы: 1 – поликристаллические алмазы; 2 – подложка из твердого сплава; 3 – корпус резца

Резцы из поликристаллических алмазов состоят из слоя алмазов 1, твердосплавной подложки 2 и корпуса резца 3 (рис. 1.1).

Для повышения прочности соединения алмазного слоя 1 с твердосплавной основой 2 последняя может выполняться не плоской, а рифленой, с насечками, а для снижения скалывания края пластин, кромки выполняются скошенными.

При изготовлении резцов пластины *PDC* крепятся диффузионной сваркой при высоких температуре и давлении. Перед соединением поверхность пластинок покрывают тонким слоем никеля [38, 46].

При бурении с отбором керна механическая скорость бурения коронками с резцами *PDC* увеличивается по сравнению с однослойными алмазными коронками в 4–5 раз, твердосплавными – до десяти раз.

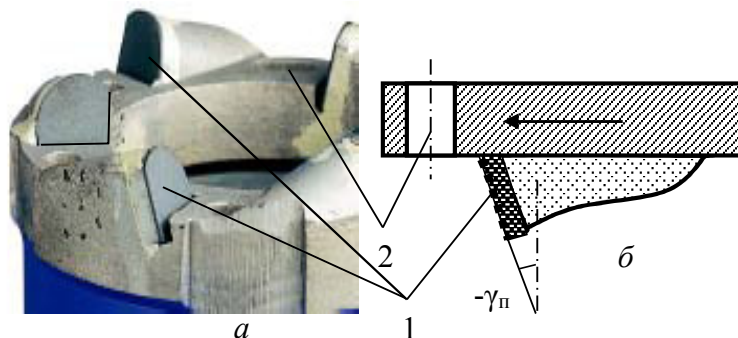


Рис. 1.2. Коронка с поликристаллическими вставками *Diapax* (а) и схема вставки (б – вид сбоку): 1 – вставка; 2 – отверстия для промывочной жидкости

Коронки с резцами *PDC* способствуют повышению выхода керна. При бурении геологоразведочных скважин на твердые полезные ископаемые коронки, армированные пластинами с поликристаллическими алмазами особенно перспективны в сочетании со снарядами со съемным кернаприемником, обеспечивая сокращение объема спуско-подъемных операций в 3–5 раз, а скорость проходки скважин до 1,3–1,5 раза [38].

Компания *Atlas Copco* выпускает резцовые коронки, вооруженные поликристаллическими алмазными вставками *Diapax* и *Tripax* [33, 38].

Элемент *Diapax* выполнен в виде пластины с нанесенным слоем алмазов толщиной 0,5 мм, а *Tripax* в виде треугольных или квадратных блоков-резцов.

Коронки с пластинами *Diapax* (рис. 1.2) предназначены для бурения мягких, вязких глинистых, мерзлых грунтов, горных пород средней твердости. В подобных горных породах коронки с пластинами *Diapax* имеют очень высокий ресурс (до 1000 м) и производительность. Недостатком таких коронок является низкая стойкость к ударным нагрузкам, что делает их непригодными для бурения массива с прослоями твердых горных пород.

При бурении пластины *Diapax* изнашиваются по внешней режущей кромке, контактирующей с породой. Получившие односторонний износ пластины *Diapax* могут извлекаться из коронки и вновь устанавливаться с

поворотом на некоторый угол, что позволяет восстанавливать инструмент 3–4 раза до полного изнашивания режущих кромок пластин. Суммарный объем бурения с этими пластинами с учетом восстановления инструмента может, таким образом, составлять более 1000 м [33, 45, 46].

Режим бурения коронками с пластинами *Diapax* предусматривает

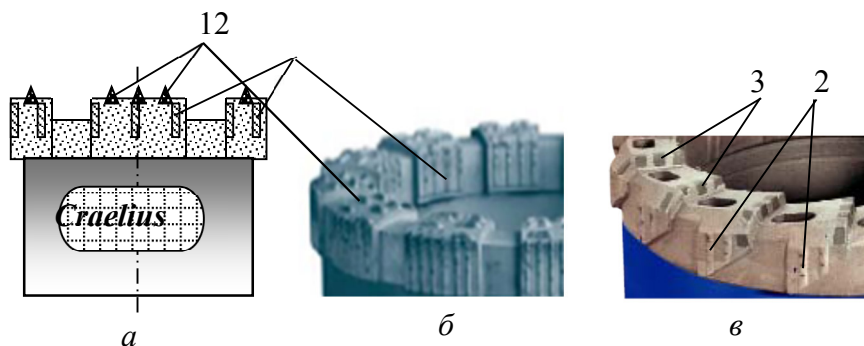


Рис. 1.3. Схема (а) и фото (б, в) коронок с элементами *Tripax*: 1 – пирамидальные вставки *Tripax*; 2 – подрезные вставки; 3 – кубические вставки *Tripax*

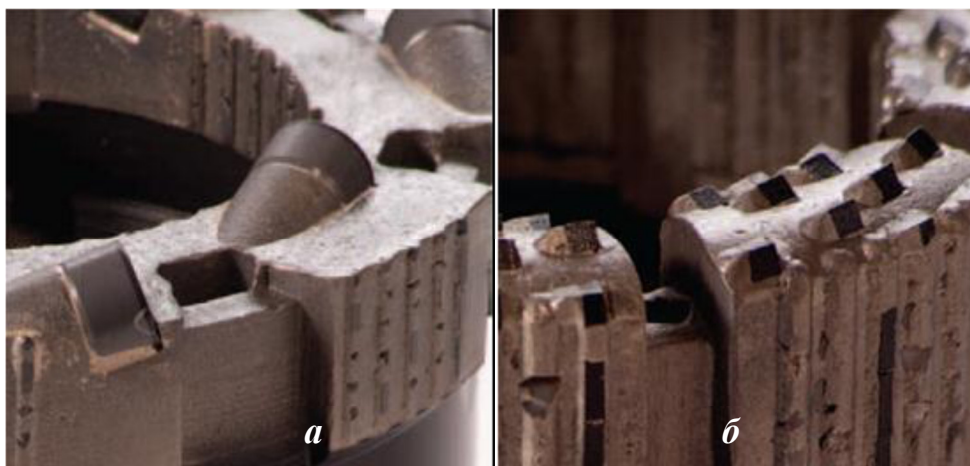


Рис. 1.4. Коронки с торцевой промывкой и с резцами типа *PCD* (а) и *TSD* (б) компании *BoartLongyear*

частоту вращения 50–80 мин⁻¹ и осевую нагрузку 10–20 кН.

Коронки с режущими вставками *Tripax* компании *Atlas Copco* состоят из поликристаллических алмазных компонентов имеющих треугольную или квадратную форму (рис. 1.3). Масса вставки составляет 0,3–1,0 карат (1 карат = 0,2 грамма). Треугольная или квадратная форма создают хорошую режущую кромку и достаточно высокую прочность резца. Коронки со вставками *Tripax* применяются для бурения горных пород средней твердости и твердых. Их ресурс составляет от 50 до 250 м. В породах невысокой прочности ресурс коронок может составить около 1000 м.

Таковыми коронками рекомендуется бурить с частотой вращения 200–300 мин⁻¹ и осевым усилием 10–20 кН.

Механизм работы коронок с пластинами *Diapax* и вставками *Tripax* при бурении мягких и пластичных горных пород аналогичен механизму работы твердосплавных резцов с отрицательными передними углами.



Рис. 1.5. Буровые коронки, армированные резцами *PDC*

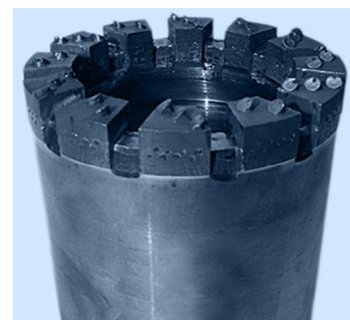


Рис. 1.6. Буровая геологоразведочная коронка «Бирун-техно»

Коронки со вставками *Tripax* в случае бурения твердых горных пород, разрушают породу отдельными алмазами. При этом случае механизм разрушения близок к процессу разрушения горных пород мелкими резцами алмазного бурового инструмента.

Компания *Boart Longyear* производит коронки с резцами из поликристаллических алмазов (рис. 1.4) и термически стабильных алмазов (*TSD*). Они особенно эффективны при бурении мягких пород, таких как уголь и глинистый сланец, в которых эффективно резание породы [24, 25, 45].

Первый значительный шаг в повышении ресурса инструмента с резцами *PDC* сделан за счет технологии изготовления термостойких пластин *TSD*, позволяющие повысить температуру эксплуатации резцов с 750 °С до 1150 °С [21].

На рис. 1.5 и рис. 1.6 представлены коронки с резцами *PDC* различных конструкций [7, 33, 42, 57, 61].

При использовании бурового инструмента с резцами *PDC* особое значение имеет схема размещения резцов, которая существенно влияет на эффективность разрушения породы. Для её повышения разрушения породы расстановка резцов должна максимально соответствовать условиям образования свободных поверхностей забоя скважины [45, 46]. При этом анализ конструкции долот и коронок, созданных различными

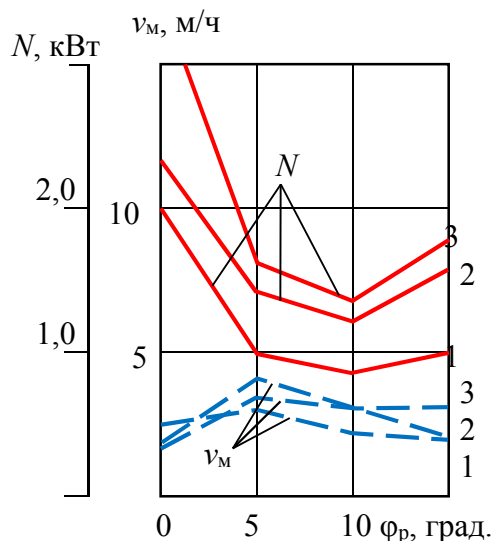


Рис. 1.7. Зависимость механической скорости бурения (v_m) и мощности на бурение (N) от величины угла ϕ_p : 1 – осевая нагрузка 500 даН; 2 – 750 даН; 3 – 1000 даН

производителями, указывает на то, что единого подхода к схемам установки резцов нет. Это говорит об отсутствии общепринятых представлений и аналитической базы о механизме разрушения горной породы резцами типа *PDC*. При этом ряд производителей используют методы компьютерного моделирования при создании бурового инструмента, но поскольку полная аналитическая база работы резцов в настоящий момент не создана, и возможности компьютерного моделирования используются не всегда эффективно.

Установлено [21], что в плоскости перпендикулярной забою, резцы должны иметь некоторый угол поворота относительно фронтальной линии резания-скалывания, что положительно сказывается на условиях отвода разрушенной породы из-под торца коронки или долота, снижении динамической нагрузки на инструмент [7, 38, 45].

Результаты экспериментов из работы [20] представлены на рис.1.7. Как следует из этих данных, оптимальное значение фронтального угла резания-скалывания породы может составлять 5–10°.

В буровом инструменте резцы с поликристаллическими пластинами устанавливают с отрицательным передним углом γ_n в пределах от (0–5°)– (–25°) в зависимости от твердости горных пород [63].

В инструментах, предназначенных для бурения более твердых горных пород, передний отрицательный угол задается большим, что позволяет

снизить динамическую составляющую разрушения горной породы, возрастающую при резании-скалывании твердых горных пород [46]. При этом не всегда учитывается, что повышенный в отрицательную сторону передний угол требует более значительных осевых нагрузок для сохранения глубины резания-скалывания породы, что в целом может приводить к более интенсивному изнашиванию инструмента при бурении.

В настоящее время долота со вставками *PDC* очень широко применяются при бурении скважин на нефтяных и газовых месторождениях всего мира, особенно при проходке вертикально-горизонтальных стволов по продуктивным горизонтам, бурении мягких и средней твердости горных пород с прослоями твердых [46].

Например, в работе [71] приведены данные о бурении в сложных перемежающихся по твердости горных породах на месторождения Оренбуржья. Интервал бурения 1150–2381 м скважины был пройден с применением одного долота *PDC*, против расхода 14 долот шарошечного типа по базовой скважине. Средняя проходка на долото *PDC* составила 1231 м, средняя механическая скорость проходки – 4,4 м/ч против средней проходки на шарошечные долота – 88,5 м и средней механической скорости 1,9 м/ч.

При бурении скважин на месторождениях Удмуртской Республики долотами *PDC* диаметром 295,3 мм достигнуты средние механические скорости проходки в 2 раза превышающие средние механические скорости проходки на долота шарошечного типа (20,3 м/ч против 11,5 м/ч; 26,7 м/ч против 17,8 м/ч, 26,4 м/ч против 8,7 м/ч) [71].

Примером наиболее современных среди созданных в настоящее время инструментов, являются долота компании *Tough-Drill™ Varel PDC* (рис.1.8) [38, 88, 46].



Рис. 1.8. Долото компании Varel со вставками PDC

Диаметр долот данной марки варьирует от 88,9 до 469,9 мм и они изготавливаются как в матричном исполнении, так и со стальным торцом (диаметр от 215,9 до 660,4 мм). Данные долота разработаны для бурения различных по твердости горных пород, в том числе и твердых. Они обеспечивают высокую скорость бурения и высокий ресурс в абразивных и твердых породах из-за высокоэффективных вставок PDC, улучшенной гидравлики очистки и охлаждения резцов долота [46].

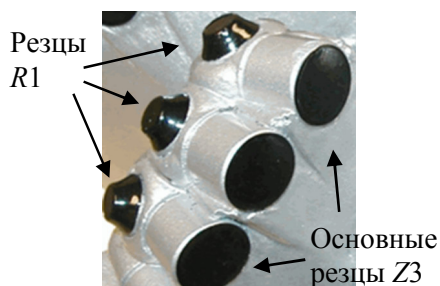


Рис.1.9.
Вооружение долота Security DBS серии FM3000™

Одна из самых больших проблем применения долот PDC – это их недостаточно эффективное использование при бурении твердых пород. При бурении твердых пород возникают повреждения от ударного характера разрушения породы, перегрев и повышенный абразивный износ резцов, поэтому для проходки в твердых породах в основном используются шарошечные и алмазные долота [46].

Долота Security DBS серии FM3000™ компании Varel, включают новый вариант износостойкого PDC. Эти долота успешно расширяют использование PDC-вооружения для бурения кристаллических пород, позволяют получить высокие результаты, как по скорости бурения, так и по ресурсу инструмента (рис. 1.9). Вооружение долота отличается тем, что часть резцов

PDC выполнены эллипсовидными, а часть – круглыми. Эллипсовидные вставки располагаются на лопастях, занимая значительную часть размера лопасти, но на периферии лопасти резцы имеют круглую форму. Вставка в форме эллипса имеют более высокие значения контактных напряжений в породе, по сравнению с круглым резцом и более значительное заглубление в породу. Удлиненная форма резца увеличивает ресурс породоразрушающей вставки. В результате долота с эллипсовидными вставками *PDC* обеспечивают эффективное бурение более твердых горных пород при сравнительно более низких значениях осевого усилия [88, 46].

Долота *PDC* для бурения твердых пород разработаны с учетом динамики долота. Долота *FM3000* оснащены в качестве основного резца резцом типа *Z3™*. Резцы *Z3* опираются на вторичные *PDC* резцы *R1* (рис.1.9), которые оптимизируют глубину резания основными резцами, ограничивая их чрезмерное заглубление в породу при переходе долота из более твердых пород к мягким породам, когда действующие осевые нагрузки оказываются чрезмерными [46]. Опорные элементы *R1* ограничивая чрезмерное заглубление резцов, также играют важную роль в ограничении вибрации долота при бурении. Подобные решения стали очень востребованными при проектировании долот для бурения перемежающихся по твердости горных пород [71, 88].

Компанией Волгабурмаш (ВБМ) разработано и освоено производство долот *PDC* диаметром от 83 до 444,5 мм для бурения мягких, мягких с пропластками средних по твердости; средних и средних по твердости с пропластками твердых горных пород [20, 38, 50, 46].

По области применения долота *PDC* компании ВБМ подразделяются на две линии:

FD – долота для бурения сплошным забоем вертикальных и наклонно-направленных скважин (рис.1.10);

BD – бицентричные долота для бурения с одновременным расширением ствола скважины (рис. 1.11).

Долота *PDC* компании ВБМ оснащены твердосплавными или комбинированными насадками, ориентированными так, чтобы максимально обеспечить баланс потоков бурового раствора для очистки долота и забоя.

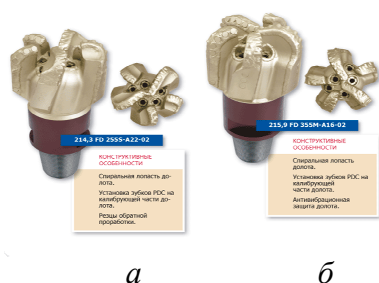


Рис. 1.10. Долота *PDC* (Волгабурмаш) марки *FD* – конструктивные особенности – спиральная форма лопастей и установка зубков *PDC* на калибрующей части долота: *а* – долото диаметром 214,3 мм– оснащены резцами обратной проработки; *б* –долото диаметром 215,9 мм, – оснащены антивибрационной защитой долота



Рис. 1.11. Долото компании ВБМ марки *BD* для бурения с одновременным расширением ствола нефтяных и газовых вертикальных и наклонно-направленных скважин

Конструктивные особенности долот типа *FD* компании «Волгабурмаш» заключаются в следующих решениях (рис. 1.12) [20, 38, 50, 46, 47]:

- спиральная лопасть долота, что обеспечивает более высокую их прочность, большее число вставок на лопасти и позволяет обеспечивать более плавный режим работы долота и высокую управляемость при направленном бурении (рис. 1.12,*а*);
- установка зубков *PDC* на калибрующей части лопастей, что обеспечивает более высокую износостойкость долот, сохранение диаметра скважины (рис. 1.12, *б*) ;
- антивибрационная защита долота обеспечивает плавный режим работы, повышение его ресурса (рис. 1.12,*в*);
- оснащение долот резцами обратной проработки обеспечивает при подъеме долота активную проработку и устранение затяжек при сужении ствола скважины (рис.1.12,*г*);

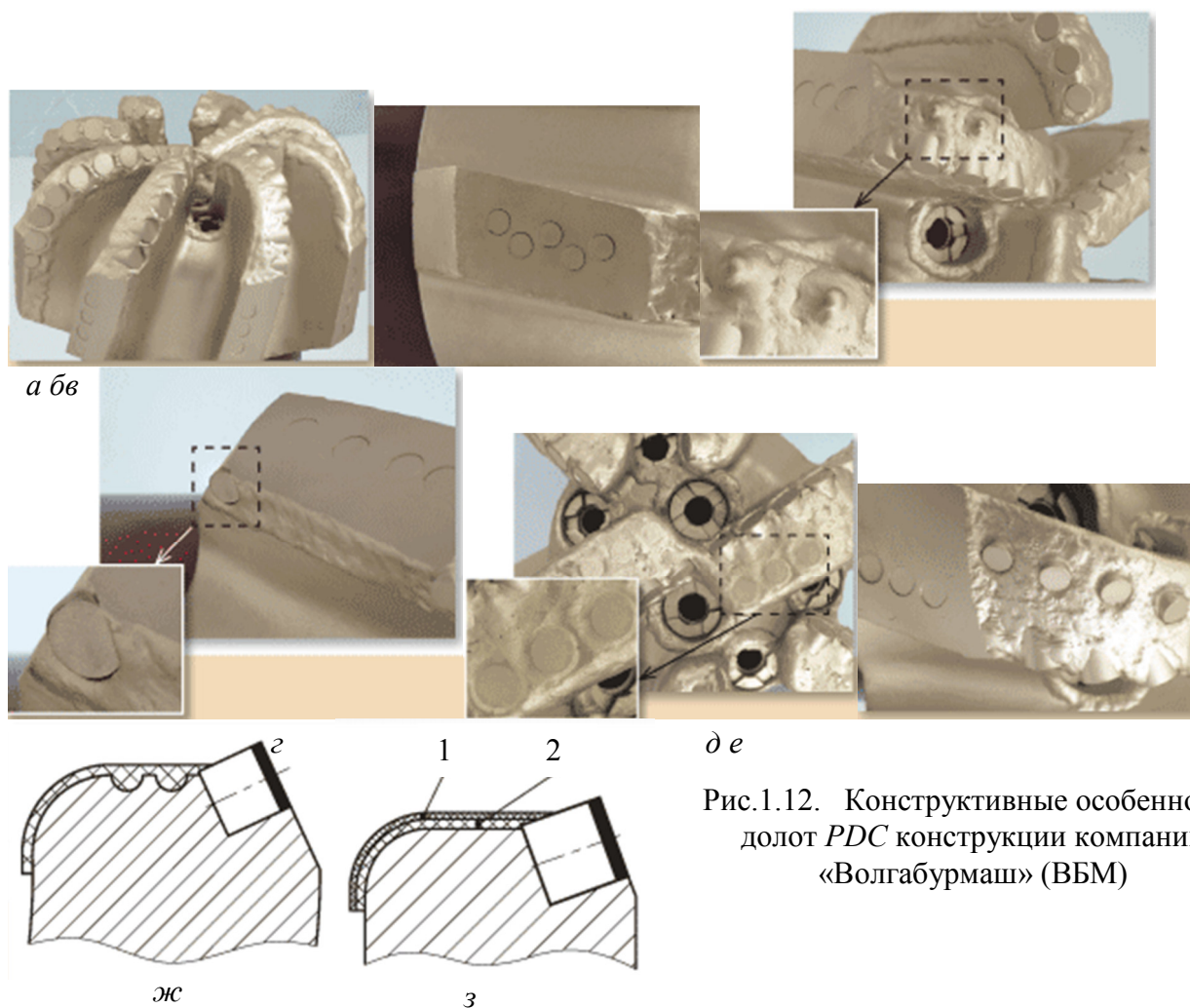


Рис.1.12. Конструктивные особенности долот *PDC* конструкции компании «Волгабурмаш» (ВБМ)

- долото оснащается опорными вставками внутреннего конуса профиля, долота, что снижает эффект «врезания» его в породу, дискретный рост крутящего момента и, как следствие, возникновение крутильных колебаний, повышается плавность хода долота при разрушении породы и управляемость при направленном бурении (рис.1.12, д);

- долото оснащается зубками предварительной деформации породы, которые устанавливаются позади основных резцов и ограничивают врезание этих резцов в породу, одновременно обеспечивают активное деформирование породы, ослабляют ее, что повышает плавность работы долота, его ресурс и управляемость при направленном бурении (рис.1.12, е);

- усиленная наплавка на лопастях долота обеспечивает его высокий ресурс при бурении абразивных пород (рис. 1.12, ж);

- двухслойное покрытие корпуса долота (рис.1.12, з), где 1 – защитное покрытие из плотной массы ультратвердых вольфрамовых карбидов; 2 –

порошковое покрытие, имеющее гетерогенную смесь металлических порошков из пылеобразных матричных компонентов карбидов вольфрама), выполненное методом газопламенного напыления с одновременным проплавлением, выполняет роль antivибрационного покрытия, обеспечивает сопротивление ударным нагрузкам (покрытие 1) и защищает долота от изнашивания и эрозии, в том числе и при высокой температуре (покрытие 2);

- упрочненный корпус долота за счет покрытия сплавом ВК;

- антисальниковое покрытие корпуса долота специальным сплавом снижает налипание породы на корпус и лопасти долота, что положительно сказывается на производительности бурения.

Для бурения мягких пород с целью снижения крутящего момента и улучшения их очистки на торцевой поверхности между основными резцами выполняются концентрические проточки. Такие долота с резцами *PDC* получили название канавчатые [19, 20, 47].

На рис.1.13 представлено долото с резцами *PDC* серебристой поверхностью резания-скалывания породы, созданное специалистами Китая. Подобная форма поверхности может быть полезной при создании напряжений в более плотной породе и отводе шлама из зоны разрушения.

Долота с резцами *PDC* применяют для бурения и с отбором керна (рис.1.14) [17–20, 38, 50, 88].

Показатели работы инструмента с пластинами *PDC* могут составлять в различных горно-геологических условиях по механической скорости от 2,3 до 30 м/ч, а по стойкости от 200 до 1000 м.



Рис. 1.13. Долото с резцами *PDC* с ребристой поверхностью резания



Рис. 1.14. Колонковое долото с резцами *PDC*

Изучение механизма работы коронок с *PDC* показывает, что при бурении упруго-хрупких и хрупких твердых горных пород порода разрушается обнаженными алмазами резцов с *PDC*, главным образом, путем раздавливания и скалывания породы [63, 66, 77, 45].

При бурении пластичных и пластично-хрупких пород разрушение происходит всем объемом алмазосодержащей пластины вдавливанием, пластическим резанием и скалыванием породы аналогично механизму разрушения породы крупным твердосплавным резцом [45].

Совершенствование буровых инструментов с резцами *PDC* заключается в реализации возможности эффективного разбуривания толщ горных пород с пропластками твердых пород и повышение ресурса инструмента.

При использовании бурового инструмента с резцами *PDC* особое значение имеет схема их размещения [5], которая существенно влияет на эффективность разрушения породы. Для повышения эффективности разрушения породы расстановка резцов должна максимально соответствовать условиям образования свободных поверхностей забоя скважины [46].

В работе [66, 46] приведены данные о стендовом бурении опытными долотами с тремя алмазными поликристаллическими пластинами *Stratapax*TM, установленными с передними углами -15° и -25° , импрегнированной коронкой, вооруженной искусственными алмазами зернистостью 200–250 шт./карат и твердосплавной трехрезцовой коронкой, с передним отрицательным углом установки резцов -25° . Все коронки имели наружный диаметр 26 мм, внутренний – 14 мм.

В процессе эксперимента разбуривались три разновидности горных пород: гранит, известняк и доломит. Твердость гранита $-p_{ш}=4,18$ ГПа, коэффициент пластичности $K_{п}=1$; твердость известняка – 1,94 ГПа, $K_{п}=1,8$; твердость доломита – 1 ГПа, $K_{п}=4,3$ [47].

Из полученных данных следует, что при более высоких и равных параметрах режима бурения механическая скорость бурения выше при бурении коронкой с *PDC* в сравнении с импрегнированной алмазной коронкой. Это объясняется тем, что контактные давления со стороны алмазов *PDC* существенно выше, чем со стороны алмазов импрегнированной коронки, так как последние равномерно распределены по всей поверхности матрицы, а у *PDC* расположены в пределах узких кромок боковых поверхностей пластин

PDC. В данном случае алмазы *PDC* работают в режиме эффективного объемного разрушения, при котором происходит скалывание, раздавливание и резание породы, тогда как алмазные резцы импрегнированной коронки могут работать при разрушении твердой породы в режиме поверхностного микроскалывания и истирания[66, 46, 47].

Подтверждением реализуемого механизма разрушения являются размеры борозд разрушения, оставленные на забое *PDC* и импрегнированной коронкой.

В то же время ресурс работы резцов *PDC* в твердых горных породах крайне невысок.

При бурении *PDC* борозды разрушения на забое более широкие (0,4 мм) и глубокие (0,07 мм), имеют признаки скалывания породы по краям, а шлам, образующийся при бурении, более крупный (12 мкм).

При бурении импрегнированной коронкой ширина борозд разрушения 0,08 мм, глубина 0,02 мм, шлам существенно более мелкий 5 мкм в сравнении

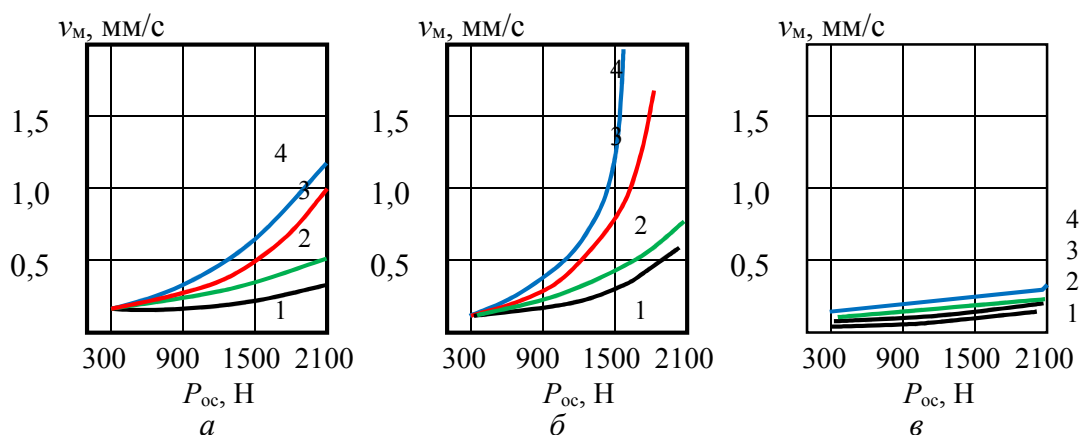


Рис. 1.15. Зависимость механической скорости бурения от параметров режима бурения коронкой с *PDC* доломита (а), известняка (б) и гранита (в): 1 – частота вращения ω – 170 мин⁻¹; 2 – 425 мин⁻¹; 3 – 685 мин⁻¹; 4 – 960 мин⁻¹

со шламом, который образуется при бурении коронкой с пластинами *PDC* [66].

При бурении гранита твердосплавными коронками видимых борозд на забое не образовывалось, шлам получен очень мелкий (не более 2 мкм). Эти признаки указывают на режим усталостно-поверхностного разрушения, при котором активно изнашиваются резцы коронки.



Рис. 1.16. Породоразрушающие резцы конусной формы для долот типа *PDC*

Данные, полученные при бурении гранита, известняка и доломита коронками с *PDC*, приведены в виде графиков на рис. 1.15 [66, 46].

Представленные данные позволяют установить [66], что при бурении известняков и доломитов резцы с *PDC* глубоко внедряются в породу, снимая слой разрушенной породы много больше размера алмазных зерен. Следует отметить, что буримость доломита оказалась ниже, чем у известняков, несмотря на то, что твердость известняка несколько выше. Очевидно, более значительные затраты энергии на разрушение доломита определены их повышенной пластичностью. Так, например, оказалось, что глубина борозд разрушения в доломите (0,04 мм) меньше в 3 раза глубины борозд разрушения в известняке (0,12 мм) при равной их ширине.

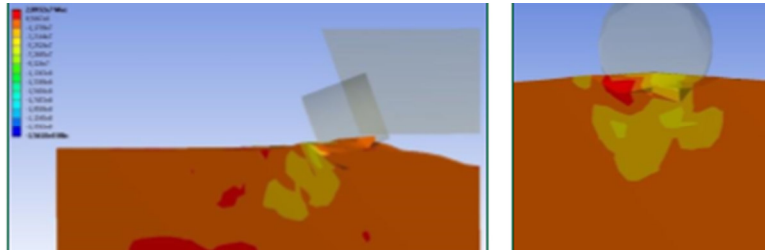
Таким образом, при бурении упруго-хрупких и хрупких твердых горных пород разрушение обнаженными алмазами резцов с *PDC* идет, главным образом, путем раздавливания и скалывания [38, 63, 46, 47].

При бурении пластичных и пластично-хрупких пород разрушение происходит всем объемом алмазосодержащей пластины вдавливанием, пластическим резанием и скалыванием породы [46, 47].

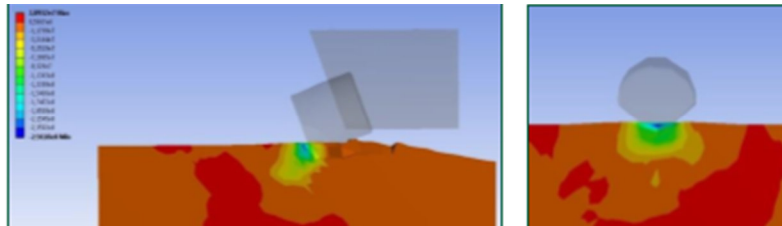
Для бурения переслаивающихся горных пород, когда в разрезе встречаются пропластки твердых пород, должны использоваться долота с комбинированным вооружением, предусматривающем возможность эффективного разрушения твердых пород.

К таким долотам можно отнести долота компании *SmithBits* для бурения пропластков твёрдых горных пород с коническими вставками *Stinger* [78, 79, 86] и долота типа «Булава» [19] компании БУРСЕРВИС (Россия) с комбинированным вооружением, которое включает как резцы круглой стандартной формы, так и резцы конической формы (рис. 1.16).

Резец круглой формы



Резец заостренной формы



Резец конической формы

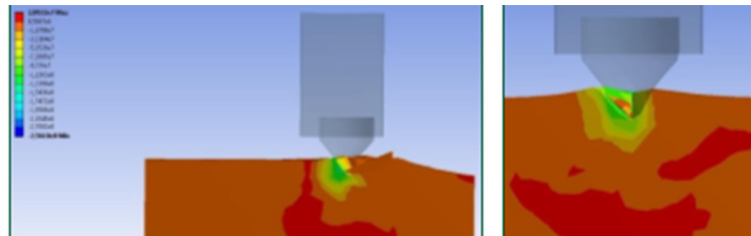


Рис. 1.17. Результаты компьютерного моделирования процесса разрушения горной породы резцами *PDC* различной формы

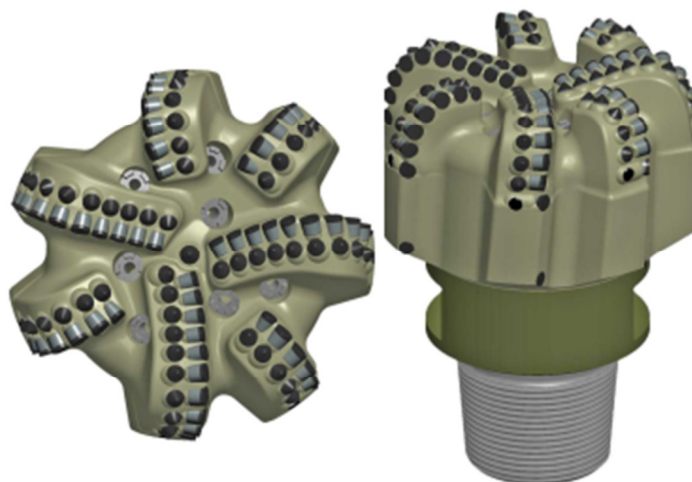


Рис. 1.18. Долото компании *SmithBits* для бурения пропластков твёрдых горных пород с коническими вставками *Stinger*

При этом рекомендуется при конструировании долот, предназначенных для бурения горных пород с пропластками твердых пород увеличивать число рабочих лопастей долота, резцы устанавливать в два ряда и уменьшать размеры резцов. Таким образом, условием сохранения ресурса долот является требование к повышению числа работающих резцов, что неизменно требует применение более высоких осевых нагрузок, что непременно сказывается на снижении ресурса бурового инструмента.

Анализ процесс разрушения горной породы на модели (рис. 1.17) показывает, что при использовании приостренных резцов и конических резцов в горной породе развиваются более значительные напряжения, в сравнении с резцами традиционной круглой формы.

Поэтому, техническое решение, при котором комбинация резцов круглой и конической форм позволяет эффективно разрушать твердые породы за счёт работы конических резцов, эффективно раздавливающих твердую горную породу с последующим подрезанием уже разрушенной и предразрушенной горной породы круглыми резцами, представляется наиболее предпочтительной при создании новых типов долот для их применения для бурения твердых горных пород [42].

Подобные технические решения применены при создании долота компанией *SmithBits* для бурения пропластков твёрдых горных пород с коническими вставками *Stinger* (рис. 1.18). Долото сертифицировано в программе компьютерных симуляций *IDEAS* [79, 86].

Конические элементы *Stinger*, расположенные по второму ряду вооружения долота, имеют повышенную прочность при наложении ударных нагрузок, что позволяет сохранять работоспособность вооружения

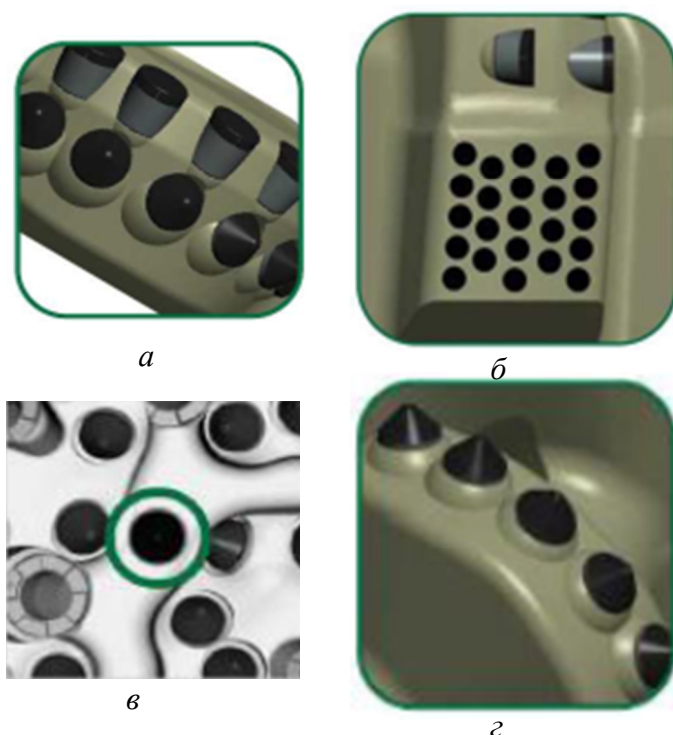


Рис. 1.19. Оции долота со вставками *Stinger*

при бурении особо прочных формаций (рис. 1.19, а).

Опция РХ – это теплостойкие алмазные вставки по калибрующей поверхности долота, которые предотвращают износ долота по диаметру (рис. 1.19, б).

Долото также снабжено специальной опцией, позволяющей ограничить чрезмерное внедрение резцов в породу в процессе бурения, тем самым, сохраняя крутящий момент на долоте постоянным, что положительно влияет на сохранность, как вооружения долота, так и оборудования, из которых состоит КНБК (рис. 1.19, в).

Расположенные на лопастях вставки *Stinger* повышают стойкость долота к ударным нагрузкам во время бурения кремнистых пород, конгломератов и других твердых включений (рис. 1.19, г).

На рис. 1.20 показано долото типа «Булава» компании «БУРСЕРВИС» предназначенное для бурения горных пород средней твердости с пропластками твердых горных пород. Долото характеризуется комбинированным вооружением, что, по мнению производителя способно обеспечить бурение горных пород средней твердости и твердых при сохранении высоких показателей по механической скорости бурения и ресурсу [19, 21, 24].

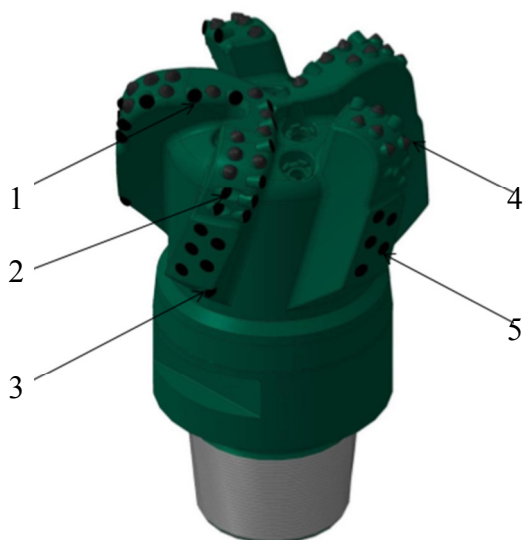


Рис. 1.20. Долото «Булава» компании «БУРСЕРВИС»: 1 – стандартные резцы PDC; 2 – двойной ряд резцов PDC на калибрующей части лопасти долота; 3 – резцы обратной проработки; 4 – резцы конической формы; 5 – резцы PDC на калибрующей поверхности

При испытании долот «Булава» в крепких сланцах, ангидритах, песчаниках и аргиллитах месторождения Даяхатын (Узбекистан) механическая скорость долотами составила 1,5–3,0 м/ч при ресурсе долот до 1240 м. По мнению производителя, ресурс долот с комбинированным вооружением типа «Булава» может быть увеличен до 2500 м. При этом полученная механическая скорость бурения долотами «Булава» над долотами со стандартным вооружением PDC без конических вставок была в 2–3 раза выше. Приведенные данные

испытаний говорят о перспективности комбинированного вооружения для производства долот для бурения твердых горных пород [21].

Таким образом, крупнорезцовые долота с вооружением типа *PDC* позволяют производить эффективное бурение не только мягких горных пород и горных пород средней твердости, но и горных пород с пропластками твердых перспективой успешного бурения и массивов твердых горных пород. Это направление разработки долот с резцами *PDC* является актуальным, учитывая перспективы освоения сланцевых месторождений, которые в основном залегают в достаточно плотных горных породах, а в некоторых случаях и кристаллизованных измененных горных породах. В этом втором случае вооружение долот с применением поликристаллических алмазов должно безусловно иметь комбинированную схему, сочетающую как раздавливание горной породы, так и резание-скалывание.

В этот ряд долот также можно поставить долото компании *Backer Hughes* под названием «*Kymera*TM», представляющего комбинацию

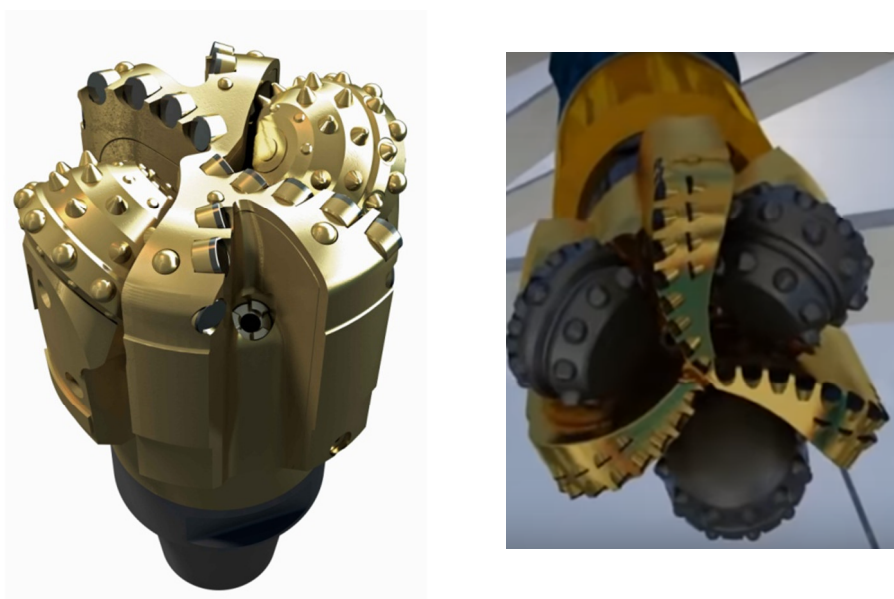


Рис. 1.21. Долота «*Kymera*TM» компании *Backer Hughes* для бурения твердых горных пород

шарошечного долота и долота с резцами *PDC* (рис.1.21) [68, 72, 74].

В данном случае известна более ранняя разработка долота специалистов Иркутского технического университета (Страбыкин Н.Н., 1989 г.) для бурения взрывных скважин в условиях вечной мерзлоты [64].

В конструкции специалистов из Иркутска, создававших эффективные

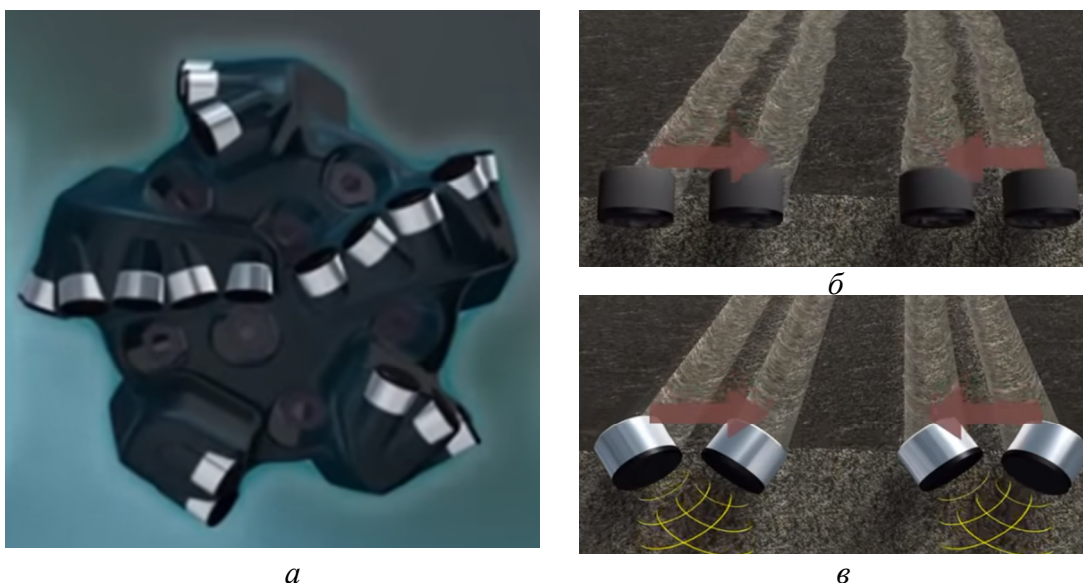


Рис. 1.22. Долото *Ulterro* (а) и траектории резания-скалывания породы резцами *PDC*, установленных плоско к линии резания (б) и навстречу друг другу (схема *Ulterro*) – (в)

долота для условий бурения на карьерах в Якутии, использовано сочетание дробящее-скалывающего действия двух шарошек для разрушения твердых мерзлых пород и подпружиненное сдвоенное лезвие для срезания оттаявшей при бурении породы резцами из твердого сплава. В долоте использована пружина, обеспечивающая прижатие лезвий к забою при перекачивании шарошек, генерирующих продольные колебания и отскоки долота от забоя.

Американская компания *Backer Hughes* также сделала разработку, в которой использован процесс дробления-скалывания шарошками и возможности резцов *PDC* по резанию-скалыванию уже раздробленной шарошками породы.

Результаты испытаний трех шарошечных долот типа «*Kymera*TM» с тремя лопастями с резцами *PDC* (рис. 1. 21) оказались достаточно высокими: ресурс новых долот составил в плотных породах 750 футов (225 м), тогда как шарошечные долота показали 500 (150 м), а долота с резцами *PDC* 400 футов (120 м). При этом удалось существенно снизить вибрацию при работе долота в сравнении с долотами с резцами *PDC* и долотами шарошечного типа. Хорошие результаты получены также при применении долот «*Kymera*TM» с отклонителями типа *RSS* и ВЗД с кривым переводником при проводке скважин по заданным траекториям. В этом случае существенно более выдержанным был процесс формирования направления бурения и более точными значения кривизны скважины [67].

При отработке долот в Боливии, применение долот «*Kymera*TM» позволило добиться увеличения объема проходки на 270 % по сравнению со скважинами, где применялись традиционные долота, и снизить денежные затраты. Существенным плюсом их внедрения стало повышение срока службы долота и снижение количества спуско-подъемных операций [71, 67].

Интересен опыт создания долот компанией *Ulterro,s New Counter Force Technology* с резцами *PDC* установленных по «ломаной» линии резания (рис.1.22, а), таким образом, что два соседних резца повернуты на угол 5–30° навстречу друг другу (рис.1.22, в) [89].

Подобная расстановка резцов в долоте, в сравнении со схемой расстановки, когда резцы ориентированы в равной степени плоскостью в направлении резания-скалывания (рис. 1.22, б), позволила существенно уменьшить вибрацию долота *PDC* при разрушении горных пород. В данном случае решена серьезная задача, так как вибрация при бурении долотами *PDC* является крайне острой проблемой как с точки зрения эксплуатации забойных телеметрических систем, начиненных электроникой, так и как фактор ограничивающий ресурс самих долот.

Огромнейший вклад, в исследования механизма разрушения горных пород долотами на основе *PDC*, внесли проф. Соловьев Н.В., Арсеньев Ю.А. и др.[2], где было теоретически обоснованы параметры механизма разрушения горных пород резцами *PDC* в режиме скалывания при формировании на забое скважины в процессе бурения открытой поверхности, а также даны рекомендации по углам установки и размерам основных резцов, обеспечивающих благоприятные условия для эффективного скалывания горной породы, с целью снижения энергетических затрат на процесс ее разрушения. Следует особо отметить работы [3], где авторами выполнен значительный объем теоретических и экспериментальных исследований механизма разрушения горных пород резцами *PDC*, выполнен анализ схемы долота с отрицательным углом установки резцов *PDC* с позиции интенсивности изнашивания торцевой поверхности резцов. В качестве метода исследований принят метод кинетостатики, позволяющий оценить главные факторы, определяющие эффективность разрушения горной породы в процессе её взаимодействия с резцом *PDC* [35]. Выработаны рекомендации по совершенствованию конструктивных параметров долот *PDC* в зависимости от

свойств горных пород, где по расчетным схемам установки основных резцов: I - под положительным углом γ и II - под отрицательным углом γ к оси рабочей грани лопасти долота и было установлено, что главным параметром, определяющим эффективность разрушения горной породы, является величина угла γ , под которым устанавливается основной резец.

1.2. Закономерности изнашивания резцов PDC в долотах при бурении различных по твердости и абразивности горных пород.

При работе резца *PDC* изнашиванию подвергается в основном только нижняя, обращенная к забою, режущая кромка (рис. 1.23). По данным компании *Smith Bits* более 60% долот типа *PDC* выходят из строя именно из-за износа и сколов нижней кромки резцов [86].

Компания *Smith Bits*, проведя анализ причины выхода долот из строя и износа долот *PDC* и учитывая выше отмеченную особенность износа пластин *PDC*, с целью повышения ресурса бурового инструмента, разработала долота с резцами *ONYX 360* и *ONYX II*, которые установлены в наиболее нагруженных частях торца долота с возможностью вращения в процессе бурения на 360° (рис. 1.24) [4, 78, 86, 54].

Бурение абразивного песчаника долотами *ONYX 360* показало рост ресурса долота на 57 %, а скорости бурения на 26 % [54].

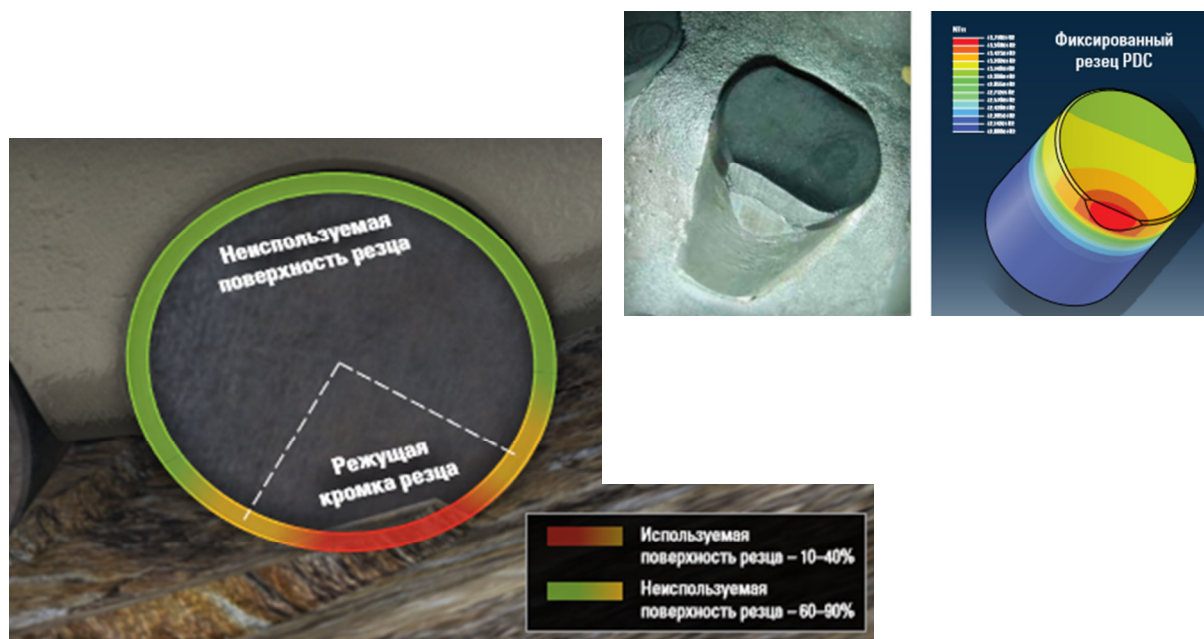


Рис. 1.23. Характер износа фиксированного резца: *а* – линия износа; *б* – вид изношенного резца; *в* – модель интенсивности износа резца

Первые отработки долот с резцами *ONYX* в Иркутской области показали увеличение механической скорости бурения на 60 %, проходки на 30%. Сегодня их используют в Урало-Повоожском регионе (Оренбургская, Самарская области) и в Восточно-Сибирском регионе [71].

Сравнительные испытания резцов *ONYX* (рис. 1.24) на износ показали, что данные резцы в сравнении с фиксированными резцами аналогичной формы и размеров существенно повышают возможности по эффективной работе по разрушению горной породы. Например, установлено, что резцы *ONYX* могут выполнить 600 проходов по породе, тогда как фиксированные резцы только около 100 [48].

Таким образом, установка резцов типа *ONYX* в наиболее нагруженных частях торца долота позволит существенно повысить ресурс долот, если вращающиеся резцы снизят аномальный износ вооружения долота.

На рис. 1.24 показаны результаты изучения износа резцов *ONYX* в сравнении с фиксированными резцами. Согласно представленным компанией *Smith Bits* данным, износ вращающихся резцов в сравнении с фиксированными резцами был незначительным и резцы находились в работоспособном состоянии [86].

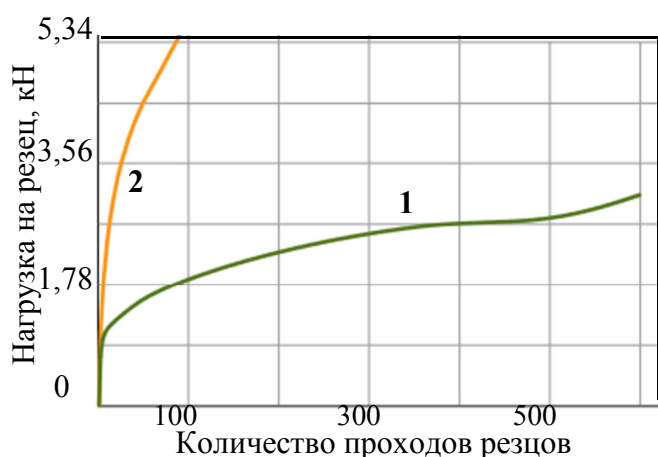


Рис. 1.24. Опытные данные об износостойкости резцов *ONYX* (1) и фиксированных резцов (2) в зависимости от нагрузки на резец

По данным компании *Smith Bits* проходка на долото в плотных сланцах составила 1124 м, механическая скорость 13,1 м/ч, что оказалось выше на 19% для долот аналогичного типа с фиксированными резцами. Стоимость метра бурения соответственно снизилась до 165 долларов, в сравнении с 210 долларами при использовании долот с фиксированными

резцами [48].

Исследование износа резцов долот типа *PDC* компанией *Smith Bits* (рис.1.25) показало, что максимальный износ резцов долота происходит на интервале удаления от геометрического центра долота, который близок к внешнему диаметру долота, а точнее на интервале около 80 % радиуса от центра долота.

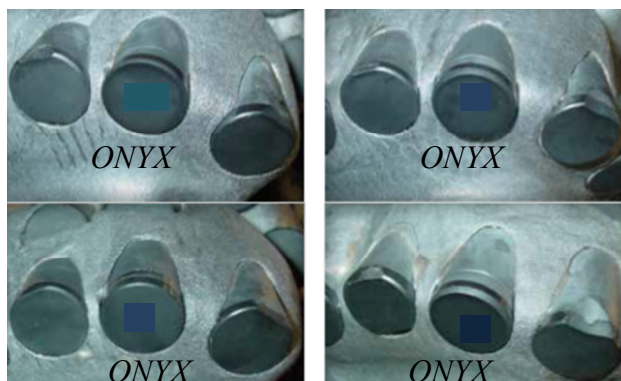


Рис. 1.25. Степень износа фиксированных резцов и резцов *ONYX* после обработки долота

Можно предположить, что аномальный износ резцов *PDC* связан с наиболее высокими сопротивлениями со стороны забоя, вызванные наибольшими и возрастающими от центра вращения долота к периферии линейной скорости резцов долота [48].

Как известно линейная скорость резания-скалывания v_p резцами долота определяется по зависимости

$$v_p = 2\pi \cdot r \cdot \omega, \quad (1.1)$$

где r – радиус долота, м; ω – частота вращения долота, мин^{-1} .

Таким образом, если линейная скорость в центральной точке торца долота равна нулю, то, например, для долота диаметром 190,5 мм (0,1905 м) при частоте вращения долота 300 мин^{-1} , линейная скорость резца,

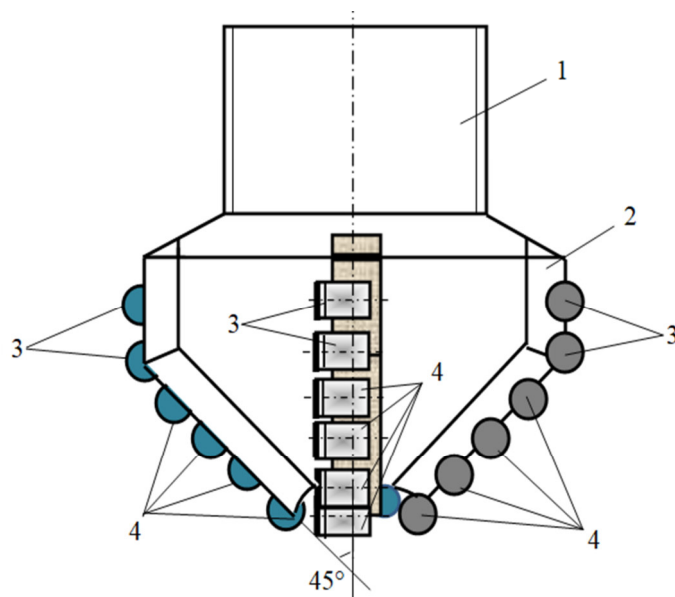


Рис. 1.26. Долото с вращающимися резцами *PDC*: 1 – корпус с резьбой; 2 – матрица; 3 и 4 – вращающиеся резцы

размещенного на внешнем радиусе торца долота, будет равна 3 м/с. Для долот большего диаметра линейная скорость может достигать 5–6 м/с [36].

В результате распределения скоростей резания-скалывания резцы долота, размещенные ближе к наружному диаметру будут иметь меньшее заглубление в породу, чем резцы, размещенные ближе к центру торца долота, так как будут испытывать повышенное сопротивление резанию-скалыванию. В результате горная порода оказывает повышенное сопротивление разрушению и вызывает более интенсивное изнашивание вооружения долота именно в интервале установки резцов более удалённых от центра вращения. Именно в этих местах требуется максимальная защита резцов от преждевременного выхода их из строя.

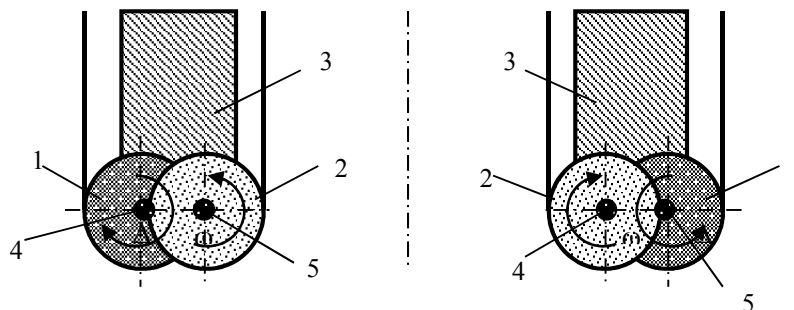


Рис. 1.27. Коронка с вращающимися при бурении резцами: 1 – наружный резец; 2 – внутренний резец; 3 – корпус коронки с матрицей; 4 – ось вращения наружных резцов; 5 – ось вращения внутренних резцов

Из работ проф. В.В. Нескоромных [36, 38], К. И. Борисова [10, 11] известно, что рост линейной скорости определяет не только повышенное сопротивление породы разрушению, но и снижение глубины резания-скалывания породы, а также может быть причиной снижения и механической скорости бурения при высоких значениях частоты вращения долота при недостаточной осевой нагрузке на буровой инструмент [38].

Подобный вывод сделан также в докторской диссертации А.А. Третьяка.

Установлено [42], что наиболее рациональным углом наклона α торцевой части долота при размещении вращающихся резцов типа *ONYX* будет поверхность, наклоненная под углом 45° . Именно при таком угле наклона поверхности долота будет максимальными усилия обеспечивающие вращение резца на своей оси.

В соответствии с предложенной теорией разработаны буровые инструменты, запатентованные в России в Сибирском федеральном университете: на рис. 1.26 показано долото, а на рис. 1.27 коронка, спроектированные с учётом рациональной установки вращающихся при бурении резцов (патенты России № 2702787, № 190545) .

При создании коронки использовано взаимодействие вращающихся резцов со стенкой скважины (наружные резцы) и керном, поступающим при бурении внутрь коронки (внутренние резцы).

Диссертационная работа К. И. Борисова посвящена исследованию динамических процессов резания скалывания горной породы резцами типа *PDC* [10]. Развивая идею, которая сформулирована следующим образом: «реальная физическая картина динамического «резания горных пород» значительно сложнее процесса статического внедрения» К.И.Борисов установил, что формирование новых аналитических зависимостей динамического резания горных пород для описания эффективности реальных процессов работы современных инструментов с резцами *PDC* необходимо проводить с учетом действия на режущие элементы динамической «выталкивающей» силы R_x [10, 11]:

$$h_y = \frac{(G_0 - R_x - C \cdot e^{k \cdot x})}{b \cdot H_{\text{сд}} \cdot \mu}, \quad (1.2)$$

где h_y – переменная величина внедрения резца в горную породу в переходном периоде резания (вдоль оси Y), м; G_0 – осевая нагрузка, Н; $H_{\text{сд}}$ –

динамическая твердость горной породы, Н/м²; b – ширина резца, м; k – коэффициент пропорциональности; R_x – сила реакции породы на торец резца, возникающая за счёт воздействия его передней грани на разрушаемую горную породу при перемещении вдоль оси x , Н; μ – коэффициент трения.

Окончательно математическая модель для установившегося режима динамического резания с учетом использования решения (1.2) сформирована в виде:

$$h = \frac{G_o}{bH_{\partial d}(\mu + 0,1K_1S_k)}, \quad (1.3)$$

где G_o – осевая нагрузка, Н; $H_{\partial d}$ – динамическая твердость горной породы, Н/м²; b – ширина резца, м; K_1 – коэффициент, характеризующий положение точки приложения горизонтальной силы резания, 1/м²; $K_1 = 1/r^2$; S_k – площадь торцевого контакта резца с горной породой.

При условии математически значимого перемещения резца вдоль плоскости резания, т.е. при $x \rightarrow \infty$, процесс работы резца выходит на стационарную стадию динамического резания, а выражение (1.3) преобразуется в следующую формулу:

$$h_y = \frac{(G_o - R_x)}{b \cdot H_{\partial d} \cdot \mu}. \quad (1.4)$$

Количественно величину силу выталкивания R_x в формуле (1.4) автор работы [10, 11] предложил определить на основе известного аналитического решения Фламана-Буссинеска:

$$\sigma_h = \frac{3F \cos \varphi \sin \varphi}{2\pi r^2}, \quad (1.5)$$

где σ_h – напряжения, возникающие от силового воздействия передней грани резца на уступ твердого тела, и действующие на торец этого резца; $F = h \cdot b \cdot \sigma$ – сила, с которой резец воздействует на твердое тело передней гранью; φ – угол, характеризующий положение точки, для которой определяются напряжения σ_h ; r – величина, характеризующая положение точки приложения силы F .

Вывод о стабилизации значения комплексного коэффициента сопротивления резанию K_{pc} при наступлении объемного режима динамического резания горных пород получил экспериментальное подтверждение при динамическом резании образцов горных пород на

лабораторном стенде УМР, спроектированного для проведения исследований [10, 11].

На рис. 1.28 представлены экспериментальные данные взаимосвязи нагрузки внедрения резца и величины K_p , которые свидетельствуют о том, что при определенных нагрузках на резец при резании горной породы взаимосвязь между динамическими силами резания стремится к стабилизации.

В соответствии со своими исследованиями [10, 11] К. И. Борисов предлагает объективную оценку сопротивления горных пород разрушению при работе инструментов класса PCD предлагает производить на основе нового показателя динамической твердости $H_{вд}$:

$$H_{вд} = R_g / S_k, \text{ Н/м}^2, \quad (1.6)$$

Где R_g – выталкивающая резец сила, возникающая в процессе динамического резания образца горной породы при установившемся значении коэффициента сопротивления резанию K_p ; S_k – торцевая площадь контакта резца (режущего элемента) установленной формы и размеров с исследуемой горной породой, м^2 .

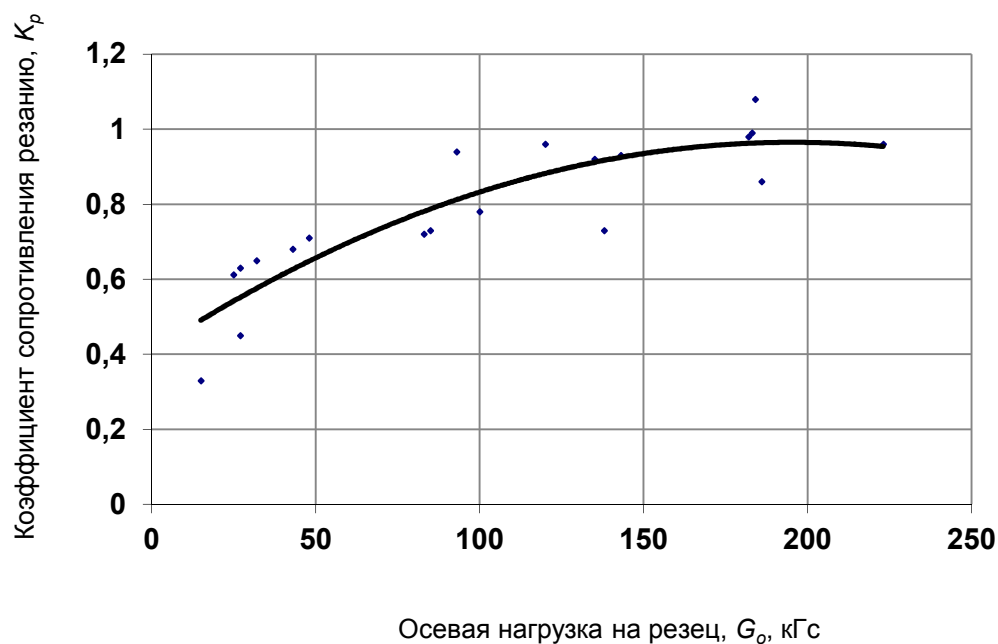


Рис. 1.28. Зависимость коэффициента сопротивления резанию от осевой нагрузки на единичный резец-источник

В своих работах [10, 11, 12] К.И. Борисов доказывает, что при совершенствовании характеристик современных инструментов режущих

скалывающего действия необходимо рассматривать кинематические и динамические закономерности совместной работы различных групп разрушающих элементов в едином корпусе долота с учетом объективных процессов динамического упрочнения горных пород, размерных характеристик и геометрии расположения групп резцов относительно собственных динамических плоскостей резания.

С учетом исследований К. И. Борисова в работах [36, 38] рассмотрен механизм процесса резания-скалывания горной породы резцами типа *PDC*. В частности определена глубина резания-скалывания породы H :

$$H = \sqrt{\left[\frac{P_{oc} \sin \gamma_{ск} (1 - f \operatorname{tg} \gamma_{п})}{\pi \sigma_{ск} \cos \varphi_p \operatorname{tg} \gamma_{п} \sqrt{d} (1 - \operatorname{tg} \varphi_{п})} \right]^3}, \quad (1.7)$$

где P_{oc} – осевая нагрузка на резец, Н; $\gamma_{ск}$ – угол скалывания породы перед передней гранью резца, град; $\gamma_{п}$ – передний угол установки резца, град; f – коэффициент трения резцов о породу; $\sigma_{ск}$ – предел прочности на скалывание породы, Па; φ_p – фронтальный угол поворота резца (фронтальный угол резания-скалывания породы), град; d – диаметр резца, м; $\varphi_{п}$ – угол внутреннего трения горной породы при деформировании, град.

Из формулы (1.7) следует ряд важных выводов о влиянии на глубину резания-скалывания породы резцом *PDC* таких параметров как передний угол резца $\gamma_{п}$, угла поворота резца относительно направления резания-скалывания породы (фронтальный угол резания породы) φ_p , а также от изменчивости предела прочности горной породы на скалывание $\sigma_{ск}$, вследствие повышения скорости перемещения резца, например, при повышении частоты вращения долота. В этом случае предел прочности $\sigma_{ск}$ будет расти, а значит, глубина резания-скалывания H снижаться.

Как следует из формулы (1.7) повышение переднего отрицательного угла $\gamma_{п}$ приводит к снижению глубины резания-скалывания породы.

Повышение угла поворота резца φ_p приводит к повышению глубины резания-скалывания h , так как снижается сопротивление резанию-скалыванию породы из-за уменьшения ширины борозды разрушения.

Увеличение диаметра резца d снижает глубину резания-скалывания породы H .

Полученная в работе [36] зависимость (1.7) может использоваться при проектировании буровых долот с резцами *PDC*. Например, поскольку известно, что скорость перемещения резца при резании-скалывании породы существенно влияет на глубину внедрения резца, с учетом полученной аналитической зависимости можно определить рациональную схему установки резцов на торце бурового инструмента.

Эту задачу можно решить путём выравнивания глубины резания-скалывания породы всеми резцами независимо от места их размещения на торце долота или коронки.

Тем не менее, зависимость (1.7) не раскрывает до конца влияния линейной скорости резания-скалывания на процесс разрушения горной породы резцами *PDC*. В частности не учитывается влияние среды и гидродинамических особенностей разрушения горной породы, отсутствует связь параметра с линейной скоростью перемещения резца.

С учетом скорости резания-скалывания породы К. И. Борисовым [10] экспериментально получена формула определения глубины канавки разрушения в зависимости от основных параметров, в частности, от скорости перемещения резца:

$$h = \frac{P}{fbp_{\text{ш}} e^{Kv_p} (1 + 0,1K_1a)}, \quad (1.8)$$

где P – осевая нагрузка на резец, Н; f – коэффициент трения резца о породу; b – ширина резца, м; $p_{\text{ш}}$ – твердость породы, Па; K – коэффициент, учитывающий свойства горной породы; v_p – скорость резания-скалывания породы, м/с; K_1 – коэффициент, учитывающий геометрию резца; a – ширина площадки притупления резца, м.

Формула (1.8), как и другие результаты экспериментальных работ, подтверждают, что при разрушении горной породы в процессе резания – скалывания повышение скорости перемещения резца приводит к снижению глубины формируемой борозды или канавки разрушения.

На рис. 1.29 приведены графики, полученные экспериментально, отражающие зависимость усилия резания и осевой нагрузки на резец от величины переднего угла при постоянном значении глубины внедрения в породу из работы [65].

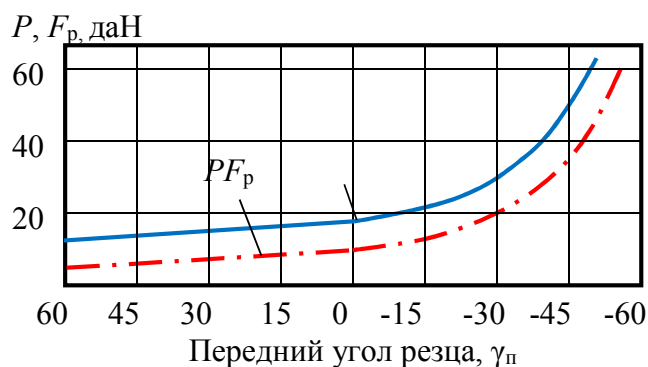


Рис. 1.29. Зависимость осевого усилия P на резец и усилия резания F_p резцом от величины переднего угла при заданной глубине внедрения h

Представленные на рис. 1.29 зависимости не учитывают линейной скорости резания-скалывания породы, но наглядно показывают влияние установки резца на величины, как осевого усилия, так и усилия резания-скалывания горной породы.

1.3. Формирование параметров системы проектирования современных буровых долот.

Современные системы проектирования сложных технических объектов, к которым можно отнести и буровые долота разного типа основываются на накопленных специалистами экспериментальных данных, теоретических представлениях о процессах разрушения горных пород, анализе свойств и параметров прочности горных пород. В настоящее время существенно качество проектирования, его вариативность выросла использованием методов компьютерного проектирования [39, 74, 75, 87, 88].

Компьютерное проектирование долот. Для проектирования резцов и долот разработчиками используются современные компьютерные технологии инженерного проектирования на основе метода конечных элементов типа *Nastran*, *Patran*, *Ansys*.

Метод конечных элементов (МКЭ) – численный метод решения математических задач, описывающих состояние физических систем сложной структуры. МКЭ позволяет любую непрерывную величину (перемещение, температуру, давление и т.д.) аппроксимировать дискретной моделью.

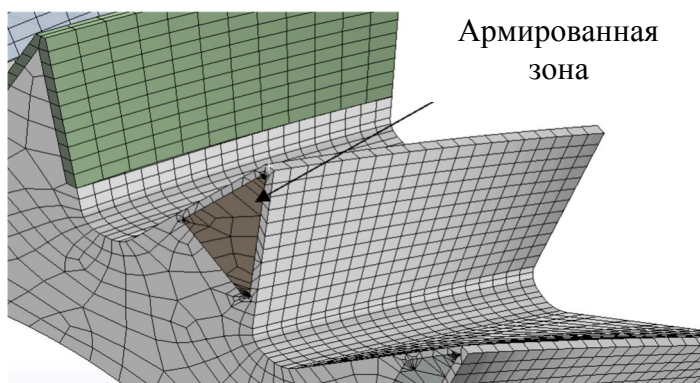


Рис. 1.30. Конечно-элементная модель зубчатого вооружения шарошечного долота

Суть метода заключается в том, что область поиска решения разбивается на конечное количество элементов. Процесс такой разбивки называется дискретизацией. Конечные элементы могут иметь различную форму и связываются между собой в отдельных точках (узлах), в

которых с помощью значений непрерывной величины определяются кусочно-непрерывные функции.

По области каждого элемента задается свой закон распределения искомых функций.

Кусочно-непрерывная аппроксимация выполняется с помощью специально подобранных функций, называемых интерполирующими. С их помощью искомые непрерывные величины в пределах каждого конечного элемента выражаются через значения этих величин в узловых точках, а производная заданная нагрузка заменяется системой эквивалентных узловых сил.

Количество выбранных точек определяет точность инженерного анализа, но при этом напрямую влияет на число решаемых в системе математических уравнений, количество которых определяется как произведение числа точек N на число степеней свободы каждой точки (обычно 3).

Например, в геометрической модели, созданной в препроцессорном блоке, выделяются точки, в которых производят расчеты напряжений и деформаций (рис. 1.30).

При расчете сложной объемной модели число точек увеличивается геометрически и конечное число уравнений для расчета деформаций и напряжений может составлять несколько тысяч.

Напряжения и деформации связываются в виде уравнений с использованием полиномов. В задачах прочности минимальный функционал

полной потенциальной энергии системы строится на разности сопротивлений тела деформациям и работы внешних сил [38, 39].

Подразделение *Smith Bits* компании *SMITH* разработало интегрированную инженерно-аналитическую систему *IDEAS*, в которой рассматривается работа резца в динамической среде бурения с учетом влияния всех компонент буровой компоновки. Основной задачей *IDEAS* является производство оптимальных по эффективности конструкций долот и значительное сокращение времени цикла разработки инструмента [38, 78, 86].

Моделирование в системе *IDEAS* начинается с анализа показателей работы долота, геологических условий, условий бурения и износа долота. На основании этой информации разрабатываются и выполняются лабораторные испытания взаимодействия резцов с различными породами. По сравнению с другими системами проектирования долот, позволяющими оценить лишь взаимодействие резцов с породой, лабораторные данные из системы *IDEAS* представляют количественные параметры по фактическим усилиям на резцах и скоростям бурения. Информация используется для анализа конструкций долота с учетом литологических особенностей, аналогичных тем, для которых проектируется долото.

В результате получается буровое долото, обладающее динамической стабильностью при рабочих параметрах и условиях эксплуатации, для которых оно предназначено, что способствует увеличению срока службы и повышению скорости проходки. Оптимизированные параметры могут поддерживаться для обеспечения более быстрой и продолжительной работы долота при снижении нагрузки на компоновку и оборудование буровой установки.

Программа четырехмерного моделирования *i-Drill* как составная часть системы *IDEAS* при помощи метода конечных элементов и данных, полученных в ходе лабораторных исследований свойств горных пород с использованием сверхмощных вычислительных машин, позволяет прогнозировать поведение долота в скважине с учетом работы буровой компоновки. При анализе вооружения оцениваются все варианты ориентации резцов в долоте.

В системе *IDEAS*, рассматривается работа резца породоразрушающего инструмента в динамической среде бурения с учетом влияния всех компонент

буровой компоновки. Основной задачей *IDEAS* является производство оптимальных по эффективности конструкций долот и значительное сокращение времени цикла разработки инструмента.

Моделирование в системе *IDEAS* начинается с анализа данных о показателях работы долота, геологических условий, информации об условиях бурения и износе долота. На основании этой информации разрабатываются и выполняются лабораторные испытания взаимодействия резцов с различными породами. По сравнению с другими системами проектирования долот, позволяющими оценить лишь взаимодействие резцов с породой, лабораторные данные из системы *IDEAS* представляют количественные параметры по фактическим усилиям на резцах и скоростям бурения. Информация используется для анализа конструкций долота с учетом литологических особенностей, аналогичных тем, для которых проектируется долото. В результате получается буровое долото, обладающее динамической стабильностью при рабочих параметрах и условиях эксплуатации, для которых оно предназначено, что способствует увеличению срока службы и повышению скорости проходки.

Оптимизированные параметры могут поддерживаться для обеспечения более быстрой и продолжительной работы долота при снижении нагрузки на компоновку и оборудование буровой установки.

Программа четырехмерного моделирования *i-Drill*, как составная часть системы *IDEAS*, позволяет прогнозировать поведение долота вместе с компоновкой, с использованием сверхмощных вычислительных машин, при помощи метода конечных элементов и данных, полученных в ходе лабораторных исследований свойств горных пород.

Модель, построенная с помощью синхронизированного по времени моделирования с шестью степенями свободы, достаточно точно прогнозирует силы и вибрации, которые зачастую оказывают решающее воздействие на отклоняющее усилие на долоте, срок службы забойных датчиков, целостность бурильной колонны и эффективность процесса бурения в целом.

Возможность выявления источника крутильных, осевых и поперечных колебаний позволяет специалистам по бурению и по искривлению ствола скважины определить необходимые изменения в компоновке снаряда и оптимизировать режимы бурения. Программа *i-Drill* обеспечивает

поинтервальную оценку прочности бурильной колонны, получаемую измерением момента на изгиб в двух осях. Направление отклоняющих усилий на долоте определяются силами, возникающими на долоте при взаимодействии с породой с учетом динамики всей бурильной колонны.

Модель, построенная с помощью синхронизированного по времени моделирования с шестью степенями свободы, достаточно точно прогнозирует силы и вибрации, которые часто оказывают решающее воздействие на отклоняющее усилие на долоте, срок службы забойных датчиков, целостность бурильной колонны и эффективность процесса бурения в целом.

Возможность выявления источника крутильных, осевых и поперечных

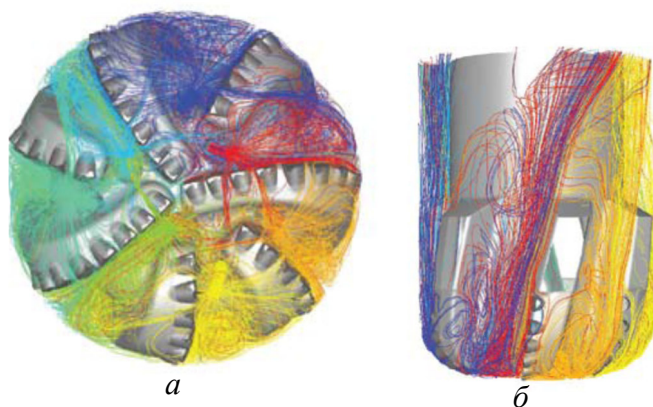


Рис. 1.31. Визуализация образа в системе анализа гидродинамики долот при компьютерном проектировании: *а* – вид с торца долота; *б* – вид сбоку

колебаний позволяет специалистам по бурению и искривлению ствола скважины определить необходимые изменения в компоновке снаряда и оптимизировать режимы бурения. Программа *i-Drill* обеспечивает пометровую оценку прочности бурильной колонны, получаемую измерением момента на изгиб в двух осях. Направление отклоняющих усилий на долоте

определяется силами, возникающими на долоте при взаимодействии с породой с учетом динамики всей бурильной колонны.

Компания *Smith Technologies* разработала программу моделирования гидравлики бурения и очистки ствола *Yield Point* с целью оптимизации выбора типа и свойств бурового раствора в соответствии с условиями бурения. После ввода исходных данных программа *Yield Point* выполняет графическое моделирование свойств бурового раствора, скорости движения промывочной жидкости, механической скорости проходки, а также площади сечения гидромониторных насадок, а затем позволяет оценить влияние соответствующих параметров на гидравлические характеристики долота и очистку ствола скважины(рис.1.30).

База данных *Smith Bits (DRS)* содержит информацию о трех миллионах отработанных буровых долот практически со всех нефтяных и газовых месторождений мира. Помимо того что база данных используется для проектирования, она также позволяет системе оптимизации выбора буровых долот *DBOS* обеспечить правильный выбор долот для эффективного бурения конкретной породы [86].

Процесс сертификации долот для наклонно-направленного бурения через *IDEAS* может учитывать специфические характеристики каждого типа роторной управляемой системы и точно определять производительность долота в любых условиях бурения, позволяя осуществлять проектирование алмазных долот, характеризующихся динамической стабильностью в сложных условиях наклонно-направленного бурения. Конструкции долот от *IDEAS* разрабатываются с помощью программы, обеспечивающей точное моделирование всей буровой системы, от места, в котором каждый резец вступает в контакт с породой, учитывая каждый компонент КНБК, до наземного механизма привода. С помощью *IDEAS* можно произвести индивидуальное и точное моделирование каждого типа роторной управляемой системы, а также прогнозировать то, как различные конструкции долот *IDEAS* будут работать в конкретных типах пород, с конкретной роторной компоновкой, рабочих параметрах и конфигурации КНБК.

В основном долота *IDEAS* для направленного бурения имеют меньшее количество лопастей, алмазные резцы большего диаметра и меньшие углы наклона резцов по сравнению со стандартными долотами для направленного бурения. Резцы большого диаметра обеспечивают оптимальную плотность вооружения, более высокую нагрузку на резец и большую глубину внедрения резца для максимизации скорости проходки. Все эти характеристики подбираются с учетом буримости различных пород и специфических литологических свойств. Кроме того, так как долота *IDEAS* обеспечивают стабильность при направленном бурении и высокую производительность с различными типами управляемых компоновок, риск неоптимальной производительности в случае, если необходимо изменить конфигурацию системы, рабочие параметры или что-либо еще, существенно сокращается. Опыт показывает, что бурение со стабильным долотом не только сокращает

его стоимость, но и обеспечивает более гладкий и качественный ствол скважины.

Программа 4-мерного моделирования *i-Drill* позволяет прогнозировать поведение долота вместе с компоновкой, с использованием сверхмощных вычислительных машин, при помощи метода конечных элементов и данных, полученных в ходе лабораторных исследований свойств горных пород. Модель, построенная с помощью синхронизированного по времени моделирования с шестью степенями свободы, достаточно точно прогнозирует силы и вибрации, которые оказывают решающее воздействие на отклоняющее усилие на долоте, срок службы забойных датчиков, целостность бурильной колонны и эффективность процесса бурения в целом. Возможность выявления источника крутильных, осевых и поперечных колебаний позволяет инженерам по бурению и специалистам по искривлению ствола скважины определить необходимые изменения в КНБК и оптимизировать режимы бурения.

Широкий спектр возможностей программы *i-Drill* включает моделирование работы роторных управляемых систем наклонно направленного бурения фрезерующего типа (*push-the-bit*) и систем с изменением направления перекоса долота (*point-the-bit*), концентрических и эксцентричных расширителей, ВЗД, раздвижных и шарошечных расширителей.

Компанией *Varel* разработан собственный программный продукт под названием *SPOT*[™] для проектирования инструмента. Компьютерное моделирование позволяет оценивать качества долот, их ресурс и производительность в процессе компьютерного тестирования. Улучшенная система очистки забоя обеспечивается установкой направляющих насадок долота, ориентирующих поток жидкости в радиальном направлении горизонтально забоя вдоль линии расположения резцов. Горизонтальную струю жидкости создают насадки, установленные у центра долота, остальные насадки размещены ближе к периферии торца, направляя поток в направлении забоя. Такая комбинированная система размещения насадок на торце долота обеспечивает качественную очистку забоя и охлаждение резцов [38, 88].

Система трехмерного моделирования КОМПАС – система проектирования, особенностью которой является использование собственного математического ядра и параметрических технологий.

При моделировании методом конечных элементов программный комплекс САПР КОМПАС-3D является незаменимым помощником в разработке параметрической модели бурового инструмента. САПР КОМПАС-3D автоматически генерируют ассоциативные виды трехмерных моделей. Он позволяет создавать модели, состоящие как из оригинальных, так и из стандартизованных конструктивных элементов.

Например, при построении модели алмазной коронки при его использовании можно задавать следующие конструктивные параметры коронки: наружный и внутренний диаметр, количество секторов, количество алмазов в секторе, высоту сектора, параметры раскладки алмазов и др. Пример получаемой геометрии модели приведен на рисунке 1.32.

Программный пакет *ANSYS* обладает многими возможностями конечно-элементного анализа – от простого линейного статического до сложного нелинейного динамического (нестационарного). Программный комплекс *ANSYS* интегрировал более 20 программ с многоцелевыми функциональными возможностями. Например, *CFX*, *Fluent*, *Design Modeler*, *Engineering Data*, *Meshing Application*, *Finite Element Modeler* включены в комплекс *ANSYS*.

Составной частью программы *ANSYS* является полностью интерактивная графика. Комплекс *ANSYS* позволяет без дополнительного программного обеспечения быстро подготовить трехмерную модель, легко рассчитать несколько вариантов ее геометрии, сетки, физики процесса и автоматически получить новые результаты моделирования для этой серии расчетов [42]. При этом обеспечивает уникальную интеграцию с *CAD* системами и позволяет упрощать решение пространственной задачи за счет использования симметрии, что актуально при моделировании процессов бурения.

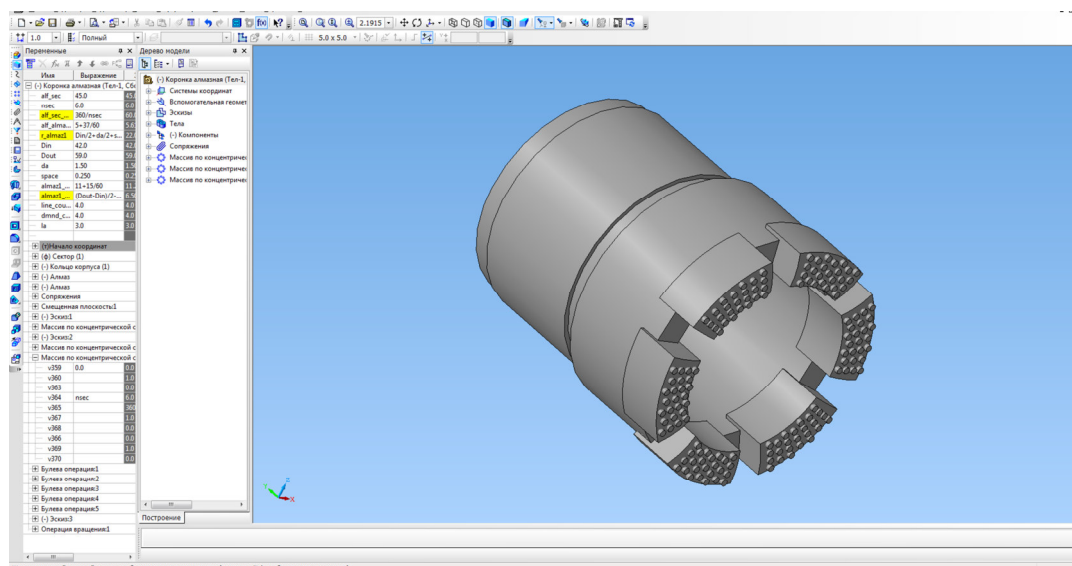


Рис. 1.32. Пример моделирования конструкции коронки

ANSYS обладает мощным инструментом для построения сетки, который позволяет осуществлять разбиение на элементы как автоматически так и регулируя генерацию сетки. Например, при исследовании температурных процессов протекающих на забое в процессе бурения основной областью исследования является зона взаимодействия резцов с породой. Поэтому для доменов бурового снаряда достаточно крупной сетки, в то время как домен очистного агента и алмазов должен быть разбит на большее количества элементов для получения точного и достоверного решения.

Для определения оптимального количества элементов актуально провести серии расчетов работы коронки на забое в одинаковых условиях, но с различным количеством элементов и осуществить анализ полученных результатов.

Комплекс *ANSYS* позволяет осуществлять одновременное исследование всех основных процессов, протекающих при бурении скважины, таких, например, как скорость течения и давление жидкости в скважине, температура и характер нагрева инструмента на забое при этом, распределение механических напряжений в инструменте.

Изучения распределения механических нагрузок методом конечных элементов в комплексе *ANSYS* осуществляется на основании системы уравнений для определения компонент напряжения в некоторой точке изотропного упругого тела, полученных путем преобразования условий совместности для компонент деформаций в зависимость между компонентами напряжения с использованием закона Гука [39, 42].

Графические возможности *ANSYS* позволяют поэтапно рассмотреть, например, напряжения, возникающие в зубьях центробежно-объемно-армированного косозубого вооружения шарошечного долота вследствие воздействия на них многофакторной нагрузки.

Исходными данными для составления модели являются геометрические данные коронки, физико-механические свойства и форма алмаза, способ их закрепления в матрице и режимы бурения. К полученной геометрии соответствующим образом приложены осевые и крутящие усилия. Результаты моделирования наглядно показывают распределение нагрузки в системе. Максимальная нагрузка, скопившаяся на вершине октаэдра алмаза, обозначена цветом согласно шкале напряжений.

Для детального исследования температурных процессов, протекающих при бурении скважин, для адекватности получаемых результатов необходимо одновременное моделирование тепловых и гидравлических процессов, протекающих при бурении скважины.

Из представленного в разделе обзора основных компьютерных программ, используемых в бурении, следуют выводы.

Компьютерное моделирование является основным и эффективным средством создания буровых инструментов с превосходными параметрами. В то же время, очевидно, что без создания современной, усовершенствованной аналитической базы, без учёта всех аспектов работы бурового инструмента при компьютерном моделировании, процесс совершенствования параметра буровых долот и коронок не может быть до конца оптимальным. В частности, как показывают исследования, особенности работы буровых долот с резцами *PDC*, влияние линейных скоростей резания-скалывания резцами, влияние среды на силы сопротивления при работе долот в представленных программах учитываются недостаточно или не учитываются вовсе, поскольку не создано соответствующих и уточняющих разделов теории разрушения горных пород долотами данного типа с учетом динамических процессов.

1.4. Задачи исследований

1. Необходимо, используя результаты ранее полученных теоретических и экспериментальных исследований, выполненных по оценке динамических процессов резания-скалывания, получить аналитические зависимости характеризующие резание-скалывание горной породы резцами типа *PDC* с учетом параметров и места установки резцов на торце долота.
2. Аналитическая модель резания-скалывания горной породы резцами типа *PDC* должна учитывать как процесс разрушения горной породы, так и влияние среды (бурового раствора, насыщенного шламом и разрушенной, но еще не удаленной из зоны разрушения горной породы) на работу резцов.
3. Основным параметром, который должен учитываться при аналитическом исследовании, должен быть параметр линейной скорости резания-скалывания, так как именно этот параметр связан с процессами деформирования и разрушения (развития трещин) горной породы и силами сопротивления, которые возникают при работе бурового инструмента в достаточно плотной среде.
4. Необходимо проанализировать причины изнашивания долот, которое связано с динамическими процессами разрушения горных пород, а именно, влиянием линейной скорости резания-скалывания горной породы резцами *PDC* и возникающих в связи с этим сил сопротивления горной породы и среды, через которую движутся резцы.
5. Для подтверждения полученных аналитических зависимостей следует провести серию экспериментов по бурению с целью оценки таких явлений, как влияние частоты вращения на углубление за один оборот. Данный параметр, являясь параметром управления, может подтвердить связь линейной скорости перемещения резца по забою с глубиной резания-скалывания горной породы и степень влияния частоты вращения на этот процесс таких параметров, как физико-механические свойства горной породы, и параметры внешней среды (очистного агента и зоны разрушения в горной породе под резцами).
6. Предложить методику расчета равнопрочной установки резцов типа *PDC*, в которой учитывались бы полученные результаты аналитических и экспериментальных исследований.
7. Использовать новые положения теории и разработанную методику при

компьютерном моделировании бурового инструмента. В частности использовать выводы и результаты исследований о влиянии линейных скоростей резания-скалывания резцами на сопротивление горной породы при бурении, влиянии среды на силы сопротивления при работе долот в компьютерных программах.

8. Произвести расчеты параметров расстановки резцов в долоте по разработанной методике, с учетом проведенных исследований.

9. Предложить конструкции долот для промышленной реализации, созданных с использованием результатов исследований. Выявить их патентоспособность и произвести патентование в патентном ведомстве.

В данном разделе сформулированы задачи, которые определяют как постановку текущих, основных задач исследования, необходимых для достижения поставленной цели, так и задачи, которые определяют перспективу данного направления теоретических исследований и практической реализации полученных результатов.

На основании сделанного анализа конструкций долот и буровых коронок с резцами PDC ведущих компаний, анализа изнашивания резцов PDC, теоретических исследований по механике и гидромеханике работы долот с резцами режуще-скалывающего действия сформулированы задачи исследования, решение которых позволит продвинуться в направлении совершенствования методики проектирования буровых долот.

Таким образом, следует, учитывая полученные результаты экспериментальных и теоретических исследований рассмотреть процесс механизма работы резцов PDC с учетом влияние среды, насыщенной продуктами разрушения горной породы, а также распределения линейной скорости резания-скалывания резцами. Это позволит выровнять сопротивление со стороны горной породы и среды, в которой работают, резцы. С учетом полученных результатов возникает возможность усовершенствовать методику проектирования долот, с целью создания более равнопрочного торца долота.

2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И СОЗДАНИЮ БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ PDC.

Для решения поставленных задач используется методика, сочетающая аналитические и экспериментальные исследования, выполненные с применением планирования эксперимента. При проведении аналитических исследований были использованы методы математического анализа, сопротивления материалов, теории разрушения горных пород при бурении.

Достоверность результатов работ осуществлялась сопоставлением данных аналитических и экспериментальных исследований при достаточной их сходимости. Большая часть экспериментов была проведена в полевых условиях. Работоспособность и эффективность технических средств, проверялась на производственных испытаниях.

2.1. Методика исследования работы буровой коронки при взаимодействии с горной породой

В исследование работы буровой коронки входило следующее оборудование: УКБ 4-П с буровым станком СКБ-4 (рис. 2.1), при наличии бурового насоса для подачи промывочной жидкости НБ-3 – 120/40 (120 – максимальное кол-во литров в минуту, а 40 – это максимальное давление). Насос имеет три плунжера. Для циркуляции очистного агента и движения промывочной жидкости была установлена переносная емкость – зумпф.

Экспериментальное бурение проводилось как на базе лаборатории Китайского геологического университета (г. Ухань) и Иркутского государственного технологического университета.



Рис. 2.1. Экспериментальный стенд на базе станка СКБ-4

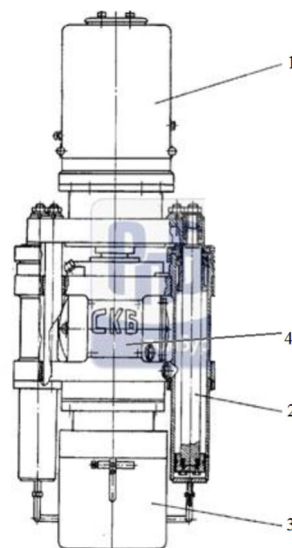


Рис. 2.2. Вид вращателя станка СКБ-4, где
– 1 – верхний гидропатрон, 2 – гидроцилиндр, 3 – нижний гидропатрон, 4 – вращатель.

Буровая установка – буровой стенд оснащен высокоточными приборами такими как: дреллометр -для измерения значения осевых усилий, киловаттметр – для измерения мощности при бурении в нагрузке.

Наличие на вращателе (Рис. 2.2) двух гидропатронов и автоматического перехвата позволило более качественно проводить задачи по исследованию работы буровой коронки. При автоматическом перехвате снаряда снаряд не отрывается от забоя, что создает непрерывность процесса бурения, исключая обрыв керна и его заклинивание в рабочем торце коронки.

Буровая установка – буровой стенд оснащен высокоточными приборами такими как: дреллометр -для измерения значения осевых усилий, киловаттметр – для измерения мощности при бурении в нагрузке.

Наличие на вращателе (Рис. 2.2) двух гидропатронов и автоматического перехвата позволило более качественно проводить задачи по исследованию работы буровой коронки. При автоматическом перехвате снаряда снаряд не отрывается от забоя, что создает непрерывность процесса бурения, исключая обрыв керна и его заклинивание в рабочем торце коронки.

Для исследования работы буровой коронки использовались блоки мрамора и доломитизированного известняка. Бурения осуществлялось с применением промывочной жидкости в виде технической воды и эмульсола (полиакриламид).

В процессе эксперимента при разрушении горной породы велся замер времени и интервалов бурения при помощи секундомера и вычислялась механическая скорость проходки. В процессе эксперимента очистной агент подаваемый к породоразрушающему инструменту оставался постоянным – 40 литров в минуту. В ходе исследований были получены данные о механической скорости бурения, углубки за один оборот коронки и энергоемкости процесса разрушения горной породы.

Исследования включали в себя применение импрегнированной коронки типоразмера 76,2 (Рис. 2.4) и буровой коронки того же размера, оснащенной шестью резцами пластинами PDC (Рис. 2.5).

При бурении алмазной буровой коронки применялась промывочная жидкость в виде технической воды с применением ПАВ при различных режимах, а при бурении коронкой на основе резцов PDC – техническая вода без применения ПАВ.

При проведении исследования было пробурено шесть скважин по 0,5 метров в блоках мрамора и доломатизированного известняка с одинаковыми физико-механическими свойствами.

Параметры свойств горных работ определены при проведении работ в табл.2.1. результаты которых представлены в публикациях проф. В. В. Нескоромных [38–42].

Таблица 2.1

Экспериментальные зависимости свойств горных пород от воздействия среды, заданной условиями эксперимента

Среда	воздух	вода	эмульсия	воздух	вода	эмульсия
Горная порода	Долерит			Мрамор		
$\rho_{ш}$	3156	2831	2438	981	1042	893
$K_{пл}$	1,5	1,4	1,2	3,1	2,3	2
C	6527,7	5373,8	4030,1	3398,7	2601,7	1857,5
E	36265	29855	22389	18881	14454	10319
ρ_0	2117	2374	2078	536	708	707
A_s	91,5	83,5	70,7	35,1	38,3	34,3

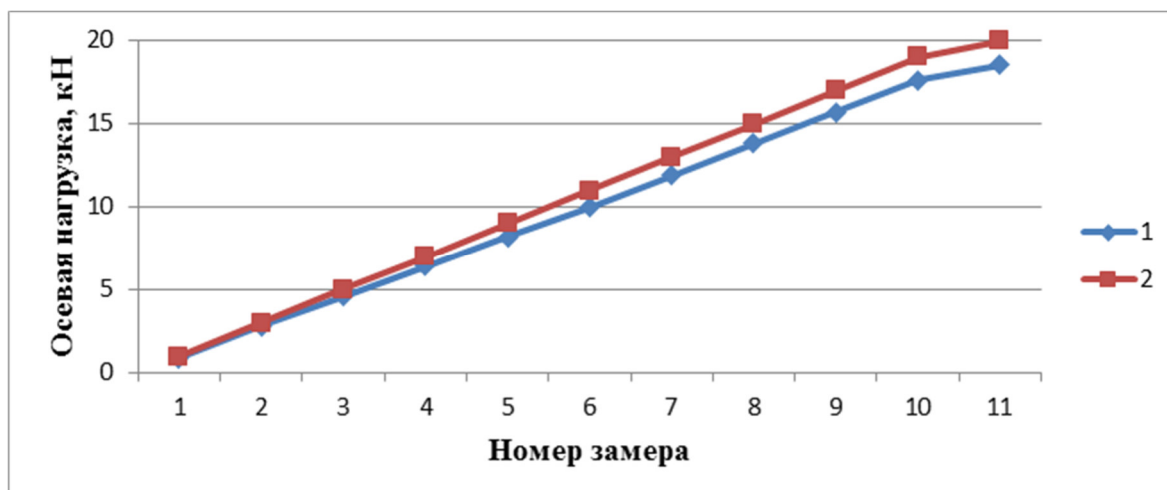


Рис. 2.3. Графическая интерпретация результатов тарировки гидравлической системы создания осевого усилия: 1 – линия значений осевого усилия по динамометру; 2 – линия значений осевого усилия по дрелометру

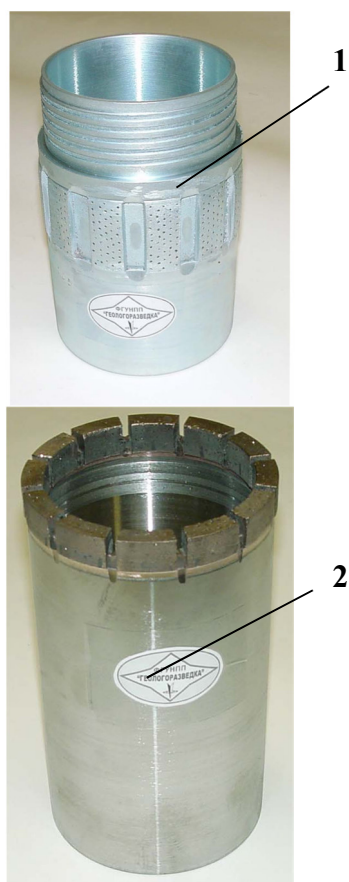


Рис. 2.4. Компоновка для опытного бурения: 2 – коронка 76,2; 1 – расширитель



Рис. 2.5. Коронка с резцами PDC, диаметром 76,2 мм

При проведении эксперимента на твердость от влияния внешней среды использовали прибор УМПГ-3 в соответствии со стандартной методикой (ГОСТ 12288-66). Исследование включало в себя вдавливание индентеров в образцы в виде кубов со стороной 50 мм в трех различных средах: воздух, вода, эмульсия.

Во время эксперимента определялись деформации твердость $p_{ш}$, МПа, коэффициент пластичности K_n , жесткость C , даН/мм, модуль упругости E , МПа, предел текучести p_o , МПа и удельная контактная работа разрушения A_S , даН мм/ мм² [38, 41].

На основании проведенных экспериментов определилось наибольшее влияние эмульсии на изменение твердости. Под ее влиянием существенно понижаются твердость, коэффициент пластичности, жесткость, модуль упругости, а также энергоёмкость разрушения, но повышается условный предел текучести.

2.2. Методика обработки результатов исследований

Обработка результатов исследования планировалась и выполнялась в соответствии с методикой полного факторного эксперимента (ПФЭ), который является мощным средством оптимизации результатов экспериментальных работ, способного при минимальном объеме исследований и опытов дать достоверный и прекрасно представленный для изучения материал [1, 38, 52].

Наряду с ПФЭ в диссертационном исследовании использовался метод математической статистики – метод наименьших квадратов, а также стандартные методики оценки точности измерений и адекватности полученных моделей [1, 38].

Экспериментальное исследование буримости долерита стандартной коронкой и с измененным торцом выполнено в соответствии с планом полного факторного эксперимента, отработанного в процессе многократных лабораторных и экспериментальных работ на полигоне Иркутского государственного технического университета [36–42] типа $N=2^k$, где N – число достаточных для получения достоверных результатов опытов; k – число влияющих на отклик учитываемых факторов [1, 49].

В качестве откликов были измерены:

- механическая скорость бурения v_m , м/ч;
- углубление за один оборот $h_{об}$, мм/об;
- энергоёмкость бурения N/v_m , кВт ч/м;
- мощность на бурение N , кВт.

При проведении экспериментальных исследований было принято решение ориентироваться на величину механической скорости бурения V_M (формула 2.1) и величину углубления за один оборот породоразрушающего инструмента $h_{об}$ (формула 2.2).

$$V_M = \frac{36 \cdot l_B}{t}, \text{ м/ч}, \quad (2.1)$$

где l_B – интервал бурения горной породы, м;
 t – время бурения интервала l_B горной породы, ч.

$$h_{об} = \frac{v_m}{\omega}, \text{ м}, \quad (2.2)$$

где ω – частота вращения инструмента, мин⁻¹.

В качестве влияющих на процесс бурения факторов приняты осевая нагрузка – $P_{ос}$, даН, которая устанавливалась равной 1000 и 1400 даН и частота вращения ω , мин⁻¹, – 435 и 710 мин⁻¹ при бурении импрегнированной коронкой и 500 и 1000 даН и 50 и 200 мин⁻¹ для бурения коронкой с резцами PDC.

Таким образом, в соответствии с методикой полного факторного эксперимента число достаточных опытов N в пределах каждого отдельного эксперимента соответствовало четырем.

Таблица 2.2

План экспериментальных работ

Номер опыта	Значения факторов в кодовых обозначениях				Отклики			
	B_o	$P_{ос}$	ω	$P_{ос} \cdot \omega$	v_m , м/ч	$h_{об}$, мм/оборот	N , кВт	N/v_m , кВт·ч/м
1	+	+	+	+	-	-	-	-
2	+	-	+	-	-	-	-	-
3	+	+	-	-	-	-	-	-
4	+	-	-	+	-	-	-	-

Сочетания выбранных параметров позволили установить четыре режима бурения алмазной импрегнированной коронкой (табл. 2.3) и коронкой с резцами *PDC* (табл. 2.4)

Таблица 2.3

Сочетания выбранных параметров при различных режимах бурения импрегнированной коронкой долерита

Параметры	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4
Осевая нагрузка, даН	1000	1400	1000	1400
Частота вращения, мин ⁻¹	435	435	710	710

Таблица 2.4

Сочетания выбранных параметров при различных режимах бурения коронкой с резцами *PDC* мрамора

Параметры	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4
Осевая нагрузка, даН	400	800	400	800
Частота вращения, мин ⁻¹	50	50	200	200

При каждом режиме было проведено опытное бурение импрегнированной коронкой при использовании в качестве бурового очистного агента в одном случае техническую воду, а в другом ПАВ горной породы долерита и коронкой с резцами *PDC* мрамора.

Таким образом, в соответствии с методикой полного факторного эксперимента использованы четыре варианта сочетания параметров, для которых получены соответствующие значения откликов.

Математическая обработка и статистическая оценка результатов экспериментальных исследований проведены в соответствии с требованиями Международной системы единиц (СИ).

С целью более точного сопоставления результатов все этапы экспериментальных работ выполнялись с использованием единых блоков горных пород и одного породоразрушающего инструмента разного типа.

Интервалы и уровни варьирования параметров режима бурения импрегнированной коронкой приведены в табл. 2.5.

Интервалы и уровни варьирования параметров режима бурения коронкой с резцами *PDC* приведены в табл. 2.6.

Таблица 2.5

Интервалы и уровни варьирования параметров режима бурения

Интервал варьирования и уровень факторов	Частота вращения, мин ⁻¹	Осевое усилие, даН
Основной уровень	572,5	1200
Интервал варьирования	137,5	200
Нижний уровень	435	1000
Верхний уровень	710	1400

Таблица 2.6

Интервалы и уровни варьирования параметров режима бурения

Интервал варьирования и уровень факторов	Частота вращения, мин ⁻¹	Осевое усилие, даН
Основной уровень	125	600
Интервал варьирования	75	200
Нижний уровень	50	400
Верхний уровень	200	800

Ошибку определения каждого отклика рассчитывали по результатам нескольких последовательных опытов, проводимых при равных значениях факторов. Всего проведено 16 опытов. Ошибку рассчитывали по формуле [1]:

$$a = \sqrt{\frac{Su^2}{mN-1}}, \quad (2.3)$$

где Su^2 – оценка дисперсии;

m – число повторных опытов;

N – число опытов.

Определение механической скорости бурения производилось следующим образом: в качестве отклика фиксировалось время бурения интервала горной породы 1, 2 или 3 см в зависимости от величины механической скорости.

Например, если скорость бурения была невысокой – 1–5 м/ч, интервал был минимальным – 1 см; при более высокой скорости интервал бурения

увеличивался до 2 см, а при скорости бурения 10–15 м/ч интервал бурения составлял 5 см.

Для получения достоверной информации, было пробурено на постоянных режимах 3 интервала, а время бурения определялось как среднее значение. Время, затраченное на бурение интервала было замерено вручную механическим секундомером «Агат» с классом точности 2, и ценой деления 0,2 с.

Допустимая погрешность составляет $\pm 0,6$ секунд на 10 минут, при этом каждый замер дублировался не менее трех раз.

Относительная ошибка определения механической скорости бурения составила [1]:

$$V_m = \Delta_{\text{пр}} \frac{x_T}{x} = 10\% ,$$

от среднего значения откликов $\Delta_{\text{пр}}$, что позволило построить математические модели с достоверностью не менее 90%, где x_T – верхний предел измерительного прибора; x – показания прибора при измерении.

2.3. Исследование призабойных процессов разрушения горной породы. Планирование и определение рационального объема экспериментов.

Применение полного факторного эксперимента, применяемое при экспериментальном бурении дает возможность для анализа процесса бурения горных пород при проведении экспериментальных работ, в соответствии с методикой, изложенной в работе [39].

На первом этапе составляется план экспериментальных работ, в котором указываются факторы, уровни варьирования факторами и очередность проведения опытов. Этот этап работ описан в разделе 2.2.

На втором этапе производится обработка экспериментальных данных и строятся графики интерпретации полученных экспериментальных моделей, а именно модели механической скорости бурения (рис. 2.6), энергоемкости разрушения горной породы при бурении и углубления за один оборот инструмента на забое.

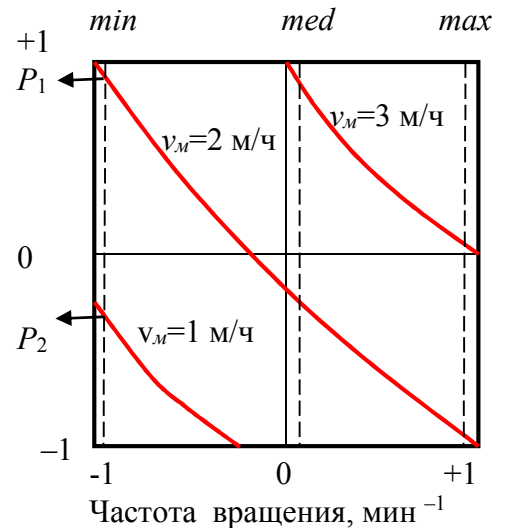


Рис.2.6. Графическая интерпретация математических моделей на отклик v_m

Для более детального анализа процесса разрушения породы при бурении строятся графики зависимости углубления за один оборот инструмента на забое от осевой нагрузки при трех значения частоты вращения. Для этого на графике рис. 2.6 выбираются 3 значения частоты вращения min , med , max , и для точек пересечений с кривыми v_m определяются значения P_{oc} .

Углубление за один оборот инструмента на забое рассчитывается по формуле:

$$h_o = \frac{v_m}{60\omega}, \quad (2.4)$$

где ω – частота вращения инструмента, мин^{-1} ; v_m – механическая скорость бурения, м/ч .

По результатам расчета h_o , при соответствующем на графике (рис. 2.6) значении P_{oc} , строится график $h_o = f(P_{oc})$ (рис. 2.7). Каждый график строится на основании двух точек, полученных с графиков на рис. 2.6 на вертикалях *min*, *med*, *max*, соответствующих различным значениям частоты вращения, использованных при проведении экспериментальных работ. Последнее

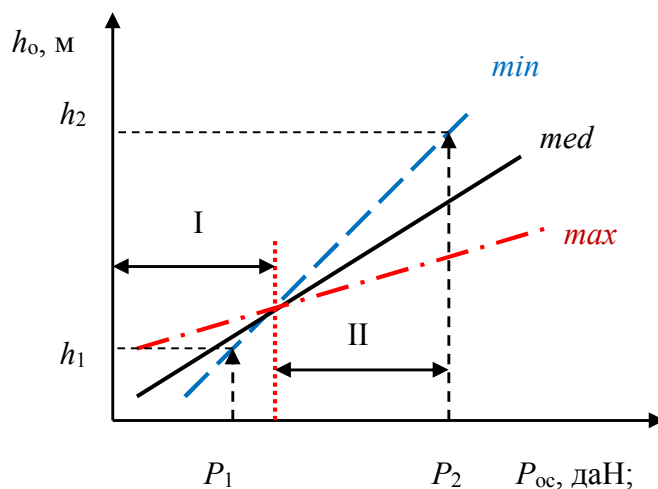


Рис. 2.7. Зависимость углубления за один оборот от осевой нагрузки и частоты вращения инструмента

необходимо с целью установления точной аналитической зависимости углубления за один оборот от осевой нагрузки и частоты вращения.

Далее, согласно методики обработки и анализа данных, построим график вида $h_o = f(P_{oc})$.

Для построения графика выбираем минимальную (*min*), среднюю (*med*) и

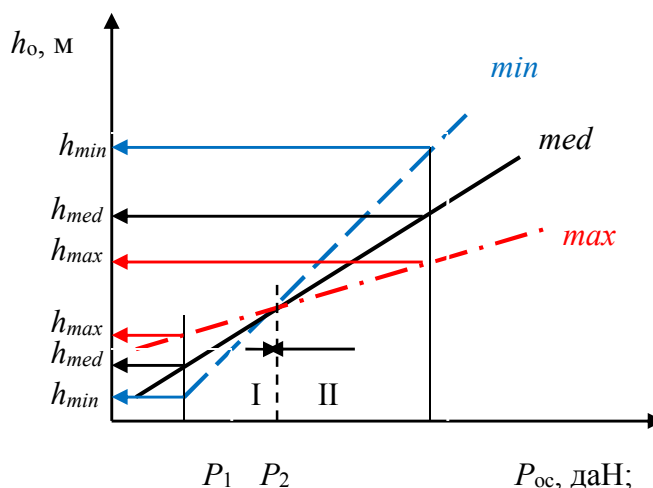


Рис. 2.8. Зависимость углубления за один оборот от осевой нагрузки и частоты вращения инструмента

максимальную (*max*) частоту вращения. Проводим вертикальные линии с целью определения пересечений с кривыми v_m (таких пересечений должно быть не менее 2–3) и находим значения осевой нагрузки P_{oc} в натуральных величинах (используя уровни данного фактора) для каждого случая пересечения с графиком v_m , при одном значении ω (значения P_1, P_2 на рис. 2.6). Далее рассчитывается значение углубления за один оборот по формуле (2.7) и строим графики $h_o = f(P_{oc})$ по соответствующим v_m значениям осевой нагрузки (рис. 2.7).

Анализ графиков, полученных при проведении работ по методике полного факторного эксперимента, позволяет выделить основные характеристики процесса разрушения пород при бурении.

Например, на рис. 2.7 выделяются две зоны, поскольку линии углубления в пределах зоны I и зоны II располагаются совершенно по-разному. Это значит, что и механизм разрушения горной породы происходит в пределах этих зон различно.

Как показано в работах [37, 38, 43] при подобном расположении графиков на рис. 2.7 зона I соответствует механизму усталостно-поверхностного разрушения, а зона II – объемному механизму разрушения.

Зависимость углубления за один оборот от частоты вращения на всем интервале бурения при заданных параметрах режима можно получить из графиков, представленных на рис. 2.7 и рис. 2.8. С этой целью в каждой из зон,

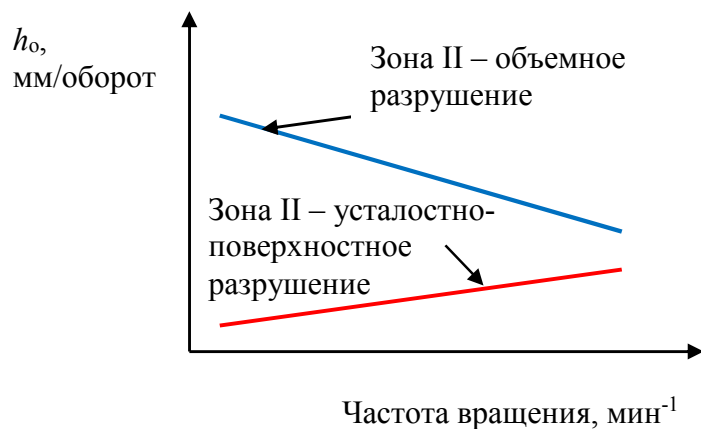


Рис. 2.9. Графические зависимости углубления за один оборот бурового инструмента на забое от частоты вращения

выделенных на рис. 2.7 на рис. 2.8 проведены вертикальные линии, соответствующие значениям осевой нагрузки, при которых были получены усталостно-поверхностный и объемный режимы разрушения горной породы. Пересечения этих вертикальных линий позволяют получить значения углублений при минимальном, среднем и максимальном значениях частоты вращения.

Графически данная обработка данных может выглядеть так, как показано на рис. 2.9.

Из графиков на рис. 2.9 следует, что различный механизм разрушения горной породы на забое скважины при бурении характеризуется совершенно различными зависимостями углубления за один оборот от частоты вращения бурового инструмента:

- при объемном разрушении повышение частоты вращения ведет к снижению углубления за один оборот, что показывает рост сил сопротивления при повышении линейных скоростей резания-скалывания горной породы; При этом угол наклона линий углубления может характеризовать уровень сил сопротивления горной породы и среды, в том или ином случае, что дает возможность и их сопоставить при выполнении соответствующего анализа.

- при усталостно-поверхностном разрушении горной породы, когда осевой нагрузки не достаточно для реализации объемного разрушения, рост

частоты вращения приводит и к росту углубления за один оборот. Подобный режим разрушения будет наблюдаться и для условий зашламования забоя скважины при достаточной осевой нагрузке, но недостаточном объеме промывочной жидкости, а также при чрезмерной подаче бурового раствора, что приводит к явлению гидравлического подпора и падению скорости проходки.

Выводы :

1. Достоверность результатов экспериментальных исследований, и, следовательно, выводов и рекомендаций, обеспечивалась применением методов математической статистики с использованием специальных компьютерных программ, применением такого метода планирования эксперимента и обработки экспериментальных данных, как полный факторный эксперимент.

2. Точность измерений при проведении экспериментальных исследований обеспечивалась тарированием измерительных приборов и устройств, поверкой их точности, которые соответствовали паспортным показателям.

3. Выводы о реализуемом механизме разрушения горных пород при проведении экспериментов основывался на объективных данных стендового бурения алмазным мелкорезцовым (импрегнированная коронка) и крупнорезцовым (коронка с резцами *PDC*) инструментами с использованием оригинальной методики, обоснованной многочисленными экспериментальными данными, которая заключается в оценке забойных процессов и механизма разрушения горной породы по зависимости углубления за один оборот бурового инструмента на забое скважины от частоты вращения, а именно от линейной скорости перемещения породоразрушающих элементов [38].

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ-СКАЛЫВАНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ РЕЗЦАМИ PDC.

3.1. Анализ причин и оценка закономерностей изнашивания резцов PDC

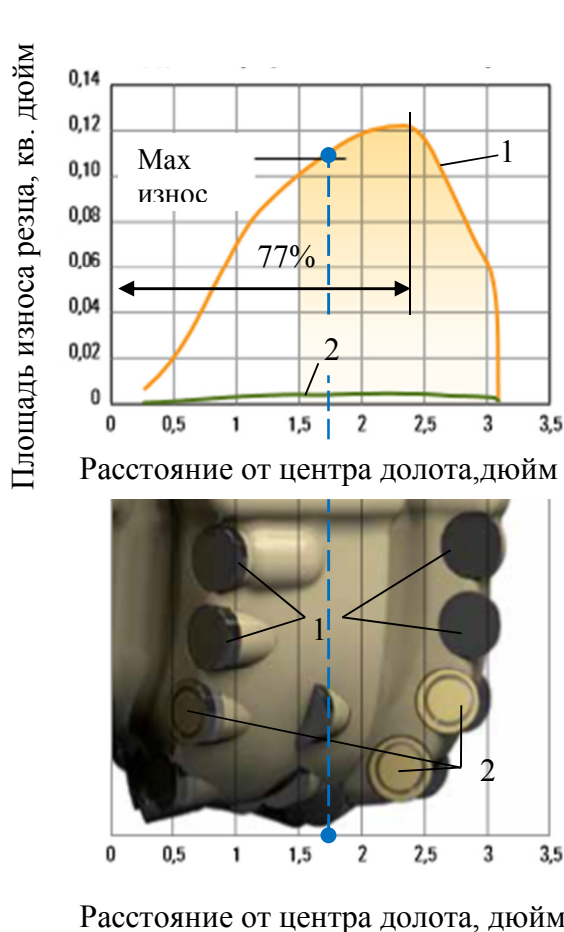


Рис. 3.1. Результаты опытного определения износа резцов после 150 часов работы: 1 – фиксированные резцы; 2 – резцы типа ONYX

Исходя из этого, в компании *Smith Bits* исследуются возможности защиты, наиболее изнашиваемой резцовой части вооружения долота, например, применением резцов типа ONYX [4, 38, 42, 85].

Анализ условий изнашивания долот в этом случае показывает, что аномальный износ резцов PDC связан с одной из системных причин, а именно, фактора, который проявляется при бурении всеми типами долот. Именно такая

Исследование износа резцов долот типа PDC, выполненное на значительном числе долот, отработанных в различных регионах с самыми разнообразными физико-механическими свойствами горных пород и моделировании в системе *IDEAS* с учетом анализа данных о показателях работы долота, геологических условий, информации об условиях бурения компанией *Smith Bits* показало, что максимальный износ резцов долота происходит на периферийной части торца долота [85, 46].

Экспериментальное бурение, выполненное специалистами этой компании показало, что изнашивание резцов происходит на интервале удаления от геометрического центра долота, который чаще всего близок к

системная причина способна проявиться при анализе износа большого количества долот. При этом следует учитывать, что определенные причины изнашивания и поломок резцов могут иметь не системный характер, а связываться с особенностями, как технологии бурения и решаемой при использовании долота задачей, так и со свойствами буримых горных пород.

С наиболее высокой вероятностью, по нашему мнению, к такому фактору следует отнести более высокие сопротивления со стороны забоя, вызванные наибольшими и возрастающими от центра вращения долота к периферии линейной скорости резцов долота.

Линейная скорость резания-скалывания v_p резцами долота определяется по ранее приведенной зависимости (1.1)

$$v_p = 2\pi \cdot r \cdot \omega,$$

где r – радиус долота, м; ω – частота вращения долота, мин^{-1} .

На рис. 3.2 приведена схема, показывающая связь линейной скорости и интервала максимального изнашивания долота вследствие роста сил сопротивления резанию-скалыванию горной породы по мере роста линейной скорости перемещения резца. Как показывает расчет по формуле (1.1) линейная скорость перемещения резца, расположенного в крайнем внешнем ряду на торце долота может составлять 3–5 м/с. При этом, как справедливо отмечает в своей работе [10, 11] К. И. Борисов «в процессе работы долота РСД класса PDC периферийные и внутренние породоразрушающие элементы фактически разрушают различные по прочностным механическим характеристикам «разновидности» одной буримой горной породы. Динамическая твердость периферийных участков горной породы линейно возрастает по сравнению с

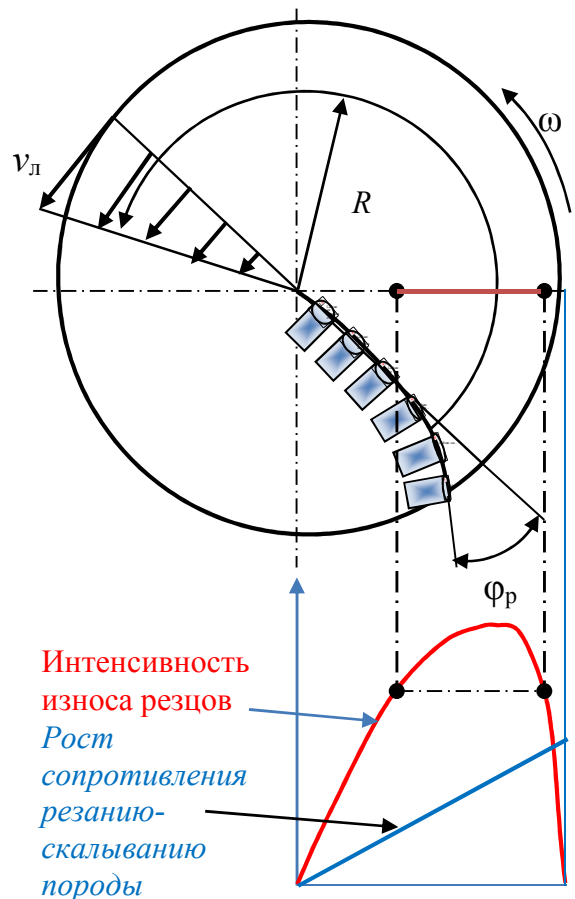


Рис.3.2. Схема установки резцов на торце долота с учетом скоростей резания-скалывания породы и интенсивности изнашивания резцов

той же характеристикой внутренних участков забоя. Этот факт является прямым следствием более значимого «скоростного упрочнения» горной породы для резцов долота, размещенных на его периферии».

Самая крайняя линия резания, не смотря на максимальную удалённость от центра долота, а значит и испытывающая наибольшее сопротивление



резанию-скалыванию не показывает аномального износа только по тому, что периферийная зона торца долота максимально защищена по внешнему диаметру еще и боковым вооружением, что создает условия для высокой степени защиты от изнашивания и поломок резцов и торцевой части.

На рис. 3.3 представлены различные долота с резцами *PDC*, получившие значительный износ.

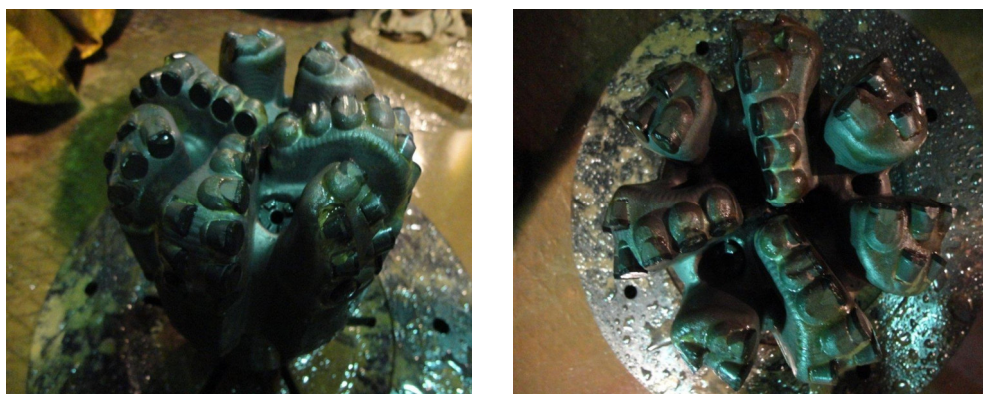


Рис. 3.4. Долота, изношенные в процессе бурения в Восточной Сибири (Юрубчено-Тохомкое нефтегазовое месторождение)

Как следует из анализа, максимальные линии точки изнашивания резцов вполне соответствуют тем местам, в которых резцы испытывают наибольшие

сопротивления резанию-скалыванию из-за высоких линейных скоростей-резания скалывания.

На рис. 3.4 и рис.3.5 представлены долота, отработанные в пределах Юрубчено-Тахомского нефтегазового месторождения. Данные долота показали высокие результаты проходки в горных породах средней твердости и были сняты с работы после полной отработки. Анализ изношенной торцевой части долота показывает, что максимально изношены резцы *PDC* на расстоянии от центра долота равное 0,7–0,8 радиуса долота, что совпадает с результатами исследований специалистов компании *Smith Bits*.



Рис. 3.5. Долото PDC после проходки 751 м (время бурения 178 ч), интервал проходки 2683–3434 м, скважина №179, куст №24, Юрубчено-Тахомского месторождения (Россия, Восточная Сибирь)



Рис. 3.6. Долото *PDC Tornado* после проходки 1150 м

На рис. 3.6 представлено долото, отработанное на севере Восточной Сибири в Эвенкии в июле 2012 г. В данном случае это долото диаметром 215,9 мм матричного типа с резцами *PDC* серии *Tornado* производства компании *DDI* (США), успешно отработано на одном из нефтегазовых месторождений. Бурение осуществлялось ротором и винтовым гидродвигателем с набором кривизны. Проходка на долото составила 1150 м при средней механической скорости бурения 20 м/ч. Максимальная механическая скорость достигала 40 м/ч [38].

Как следует из анализа поверхности долота, наиболее изношенными выглядят резцы *PDC*, расположенные ближе к периферийной зоне торца.

Таким образом, анализ изнашивания резцов *PDC* позволяет сделать вывод о том, что наиболее подвержены изнашиванию резцы, расположенные на удалении от центра торца на расстояние более половины радиуса и чаще

всего в точках приближенных к внешнему радиусу. Это обстоятельство указывает на существенное влияние на ресурс резцов возрастающего, по мере роста линейной скорости перемещения резцов по забою сопротивления горной породы резанию-скалыванию.

Очевидно, что исключение аномального изнашивания резцов в наиболее нагруженной части торца долота позволит повысить общий ресурс долота, что приведет к повышению не только собственно ресурса, но и механической скорости бурения.

3.2. Обоснование и разработка теоретических основ механизма разрушения горных пород резцами *PDC* с учетом динамических процессов резания.

Ранее рядом авторов рассмотрено влияние на процесс резания-скалывания горной породы линейной скорости резца и других параметров [4, 5, 6, 16, 24, 26, 27, 28, 34, 36, 42, 55, 64, 69].

Исследования К.И.Борисова посвящены вопросу влияния скорости перемещения резца в процессе резания-скалывания породы [10, 11].

Приведем некоторые положения из работы К. И. Борисова, которые касаются предложений по совершенствованию схемы установки резцов вследствие роста сопротивлений резанию-скалыванию при изменении линейной скорости перемещения резца.

В работе [10] отмечалось, «что в связи с тем, что время одного оборота для всех резцов при неизменной частоте вращения долота одинаково, линейная скорость перемещения резцов в процессе бурения долотами *PDC* вдоль динамической плоскости резания горной породы, располагающихся на внешнем сегменте корпуса долота, существенно (в несколько раз) превышает скорость движения «внутренних» резцов, т.е. резцов располагаемых ближе к центру долота».

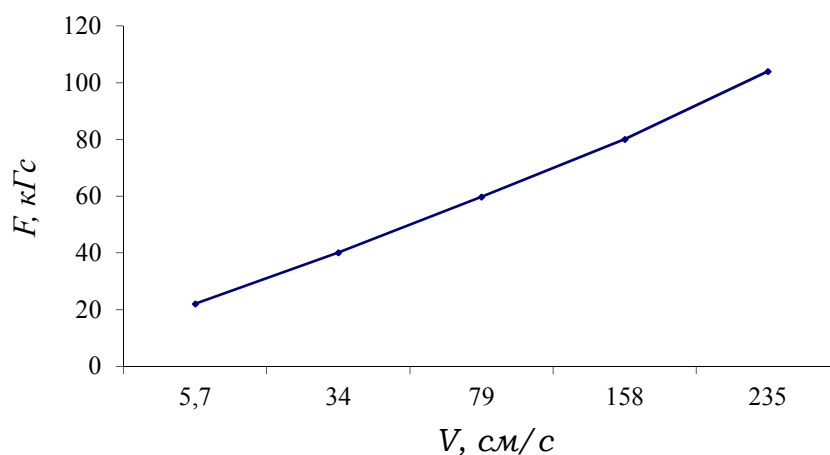


Рис. 3.7. Влияние линейной скорости перемещения резца V на сопротивление породы разрушению при резании F

Таким образом, в процессе работы долота периферийные и внутренние породоразрушающие резцы фактически разрушают горную породу, проявляющую различные механические характеристики в зависимости от радиуса их размещения в корпусе долота. Динамическая твердость горной породы линейно возрастает от внутренних участков забоя к периферийным участкам буримой горной породы. Этот факт является прямым следствием скоростного упрочнения горной породы для резцов долота, размещенных на его периферии.

На рис. 3.7 представлена экспериментальная зависимость из работы [10], отражающая рост сопротивления горной породы по мере роста линейной скорости перемещения резца.

На основе вышеуказанного контактные давления периферийных и внутренних резцов, жестко закрепленных в едином корпусе долота, значительно отличаются друг от друга. Вследствие этого, а также на основании факта существенного различия в суммарном пути трения этих групп резцов, работа и интенсивность абразивного износа для них также различны.

Для приведения текущих контактных давлений для резцов различных сегментов корпуса долота к одинаковым значениям предлагается:

1. *Использовать резцы размерного ряда обратно пропорционального величине действующих нагрузок;*

2. Для поддержания одинаковых условий работы различных групп резцов по отношению к динамической плоскости резания горной породы *«необходимо системно изменять геометрию их размещения в корпусе долота по мере уменьшения радиуса вращения каждого резца»*;

3. Критерием оптимальности углов установки резцов в корпусе долота PDC на периферийных и внутренних венцах предложено считать характеристику *«неизменности проектных значений угла резания α_i для всех групп резцов долота относительно собственной динамической плоскости резания каждой группы»*.

Диссертационная работа К. И. Борисова посвящена исследованию динамических процессов резания скалывания горной породы резцами типа PDC [10]. Развивая идею, которая сформулирована следующим образом: *«реальная физическая картина динамического «резания горных пород» значительно сложнее процесса статического внедрения»* К.И.Борисов установил, что формирование новых аналитических зависимостей динамического резания горных пород для описания эффективности реальных процессов работы современных инструментов с резцами PCD необходимо проводить с учетом действия на режущие элементы динамической «выталкивающей» силы R_x [10, 11]:

$$h_y = \frac{(G_o - R_x - C \cdot e^{k \cdot x})}{b \cdot H_{\text{ед}} \cdot \mu}, \quad (3.1)$$

где h_y – переменная величина внедрения резца в горную породу в переходном периоде резания (вдоль оси Y), м; G_o – осевая нагрузка, Н; $H_{\text{ед}}$ – динамическая твердость горной породы, Н/м²; b – ширина резца, м; k – коэффициент пропорциональности; R_x – сила реакции породы на торец резца, возникающая за счёт воздействия его передней грани на разрушаемую горную породу при перемещении вдоль оси x , Н; μ – коэффициент трения.

Окончательно математическая модель для установившегося режима динамического резания с учетом использования решения (3.1) сформирована в виде:

$$h = \frac{G_o}{b H_{\text{ед}} (\mu + 0,1 K_1 S_k)}, \quad (3.2)$$

где G_o – осевая нагрузка, Н; $H_{\text{ед}}$ – динамическая твердость горной породы, Н/м²; b – ширина резца, м; K_1 – коэффициент, характеризующий

положение точки приложения горизонтальной силы резания, $1/\text{м}^2$; $K_1 = 1/r^2$; S_k – площадь торцевого контакта резца с горной породой.

При условии математически значимого перемещения резца вдоль плоскости резания, т.е. при $x \rightarrow \infty$, процесс работы резца выходит на стационарную стадию динамического резания, а выражение (3.2) преобразуется в следующую формулу:

$$h_y = \frac{(G_0 - R_x)}{b \cdot H_{\text{до}} \cdot \mu} \quad (3.3)$$

где G_0 – осевая нагрузка; R_x – сила, выталкивающая резец, при резании-скалывании породы; b – ширина резца; $H_{\text{до}}$ – динамическая твердость горной породы; μ – коэффициент трения.

Динамическая твердость $H_{\text{вд}}$ определяется по зависимости [10, 11]:

$$H_{\text{до}} = R_x / S_k, \text{ Н/м}^2, \quad (3.4)$$

где R_x – выталкивающая резец сила, возникающая в процессе динамического резания образца горной породы при установившемся значении коэффициента сопротивления резанию K_p ; S_k – торцевая площадь контакта резца (режущего элемента) установленной формы и размеров с исследуемой горной породой, м^2 .

Количественно величину силу выталкивания R_x в формуле (1.4) автор работы [10, 11] предложил определить на основе известного аналитического решения Фламана-Буссинеска:

$$\sigma_h = \frac{3F \cos \varphi \sin \varphi}{2\pi r^2}, \quad (3.5)$$

где σ_h – напряжения, возникающие от силового воздействия передней грани резца на уступ твердого тела, и действующие на торец этого резца; $F = h \cdot b \cdot \sigma$ – сила, с которой резец воздействует на твердое тело передней гранью; σ – напряжения в породе; φ – угол, характеризующий положение точки, для которой определяются напряжения σ_h ; r – величина, характеризующая положение точки приложения силы F .

Зависимости, представленные выше не достаточно информативно отражают существо явления и практически не учитывают линейную скорость резания и преодолеваемую резцом бурового инструмента среду – горную породу, характеризующуюся параметрами прочности, буровой раствор насыщенный шламом. Следует заметить, что поскольку размер резцов PDC

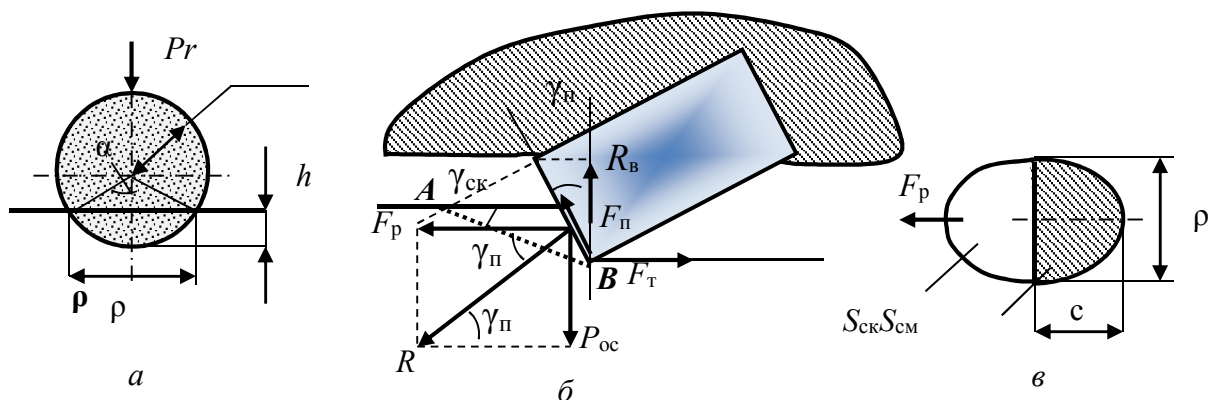


Рис. 3.8. Схема процесса-резания скалывания породы резцом *PDC*: *а* – вид на резец спереди; *б* – вид на резец сбоку; *в* – форма и размеры площадок смятия и скалывания породы резцом *PDC* цилиндрической формы

достаточно значителен (диаметр резцов может быть 15–20 мм), при вращении возникают значительные силы сопротивления как со стороны разрушаемой горной породы, так и бурового раствора насыщенного в призабойной зоне шламом.

Под термином «среда» в данном разделе понимается наличие в скважине бурового раствора насыщенного продуктами разрушения и разрушенной горной породы перед передней гранью резца. С учетом того, что в растворе находится значительный объем разрушенной породы, плотность, а значит и сопротивляемость среды становится более значительной. Применительно к разрушенной горной породе, располагаемой на интервале глубины резания-скалывания, то в этом случае плотность среды приближается к плотности разрушаемой горной породы.

В то же время, отмечая определенное влияние на глубину формируемых борозд разрушения, на механическую скорость бурения и стойкость различных параметров ранее достаточно ограниченно рассматривалось влияние геометрии вооружения бурового инструмента и бурового раствора на процесс разрушения горной породы с учетом динамики процесса резания-скалывания горной породы [10,64].

При перемещении резца *PDC* под действием крутящего момента с установившимися режимом и глубиной резания-скалывания породы справедливы схемы, представленные на рис. 3.8, *а*, *б*, *в*.

Для получения результирующей зависимости влияния параметров режима бурения на глубину резания важным является обоснование направления действия результирующей силы *R* при установившемся режиме

резания-скалывания, при котором при неизменных внешних параметрах – осевом усилии и частоте вращения глубина резания-скалывания породы не меняется [36,37,38].

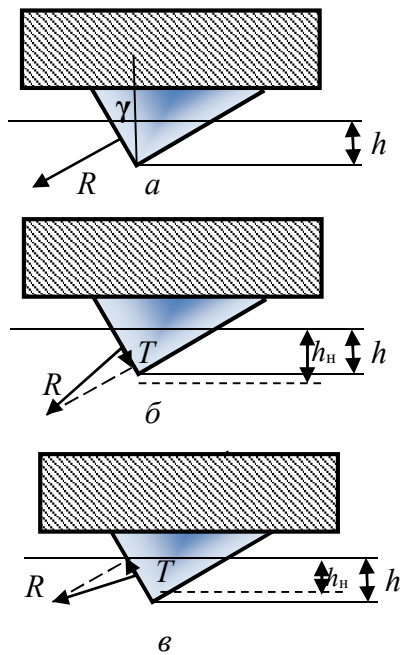


Рис. 3.9. Схемы для анализа механики резания-скалывания резцом PDC

Усилие R – результирующая осевой силы $P_{ос}$ и тангенциальной силы резания-скалывания породы F_p (рис. 3.8, а). Если эта сила ориентирована под прямым углом к плоскости резца, то её проекция на плоскость резца равна нулю. Это режим установившегося процесса без изменения глубины резания скалывания h (см. рис. 3.9, а).

В том случае если результирующая R направлена вниз и не образует прямого угла с плоскостью резца, то проекция усилия R силы T будет направлена вниз, нарушит равновесие и вызовет заглубление резца от h к h_n (рис. 3.9, б). Такая ситуация возможна при повышении осевого усилия или мгновенном снижении

усилия резания-скалывания, вызванного, например, ослаблением породы вследствие появления в ней трещины, каверны, снижения её плотности и твердости (упругости).

А если результирующая R ориентирована вверх, что может быть связано со снижением осевого усилия на инструмент или повышением сопротивления породы резанию-скалыванию (рост тангенциального усилия F_p), например, вследствие повышения частоты вращения инструмента, то усилие T будет ориентировано также вверх, что неизбежно вызовет снижение глубины резания-скалывания от h к h_n .

Таким образом, векторная направленность результирующей R , обусловленная изменением осевой силы и (или) тангенциальной силы резания-скалывания, меняет баланс сил при разрушении горной породы и определяет глубину резания-скалывания. Колебания величины и направления силы R при резании-скалывании происходят постоянно, но установившийся режим резания-скалывания при неизменном h возможен только в том случае, если эта сила направлена под прямым углом к плоскости резца [36, 38].

Размеры и форма ядра сжатия породы, которое формируется перед резцом, влияет на распределение сил при резании-скалывании. Механизм

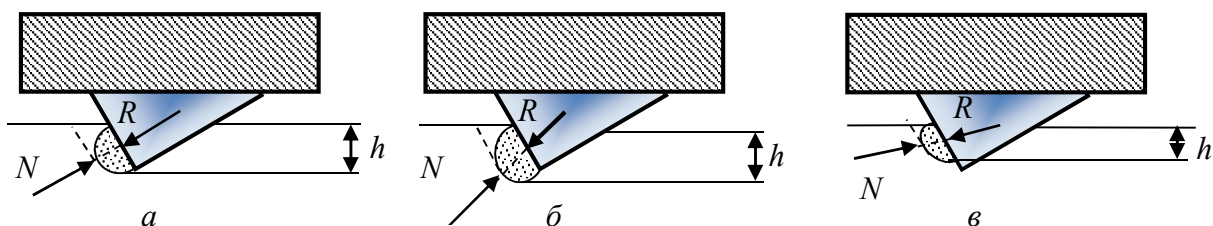


Рис. 3.10. Схемы трансформации ядра сжатия породы при установившемся режиме резания-скалывания (а), заглублении резца (б) и повышении сопротивления резанию-скалыванию (в)

разрушения породы, в котором учитывается влияние и роль ядра сжатия на процесс разрушения породы, дает понимание важности коэффициента внутреннего трения на величину упругих реакций и затрат усилий на процесс резания-скалывания породы.

Рассмотрим схемы на рис. 3.10.

Реакция породы N на усилие R воздействует не на сам резец, а на ядро сжатия породы. Таким образом, усилие R затрачивается, прежде всего на деформирование породы в ядре сжатия, создавая напряжения, достаточные для скалывания породы на передней грани резца. Линия скалывания породы перед ядром сжатия ориентируется с учетом размеров и геометрии ядра сжатия и переднего угла наклона резца. Размеры ядра сжатия существенно зависят от упругости и твердости пород. В мягких породах ядро очень большое и слабо уплотненное, поскольку порода из него выходит на поверхность при малом усилии резания. В твердых породах ядро меньшего размера и более оформлено в виде полусферы. Если усилие R направлено под прямым углом к плоскости резца, то форма ядра сжатия более симметричная (рис. 3.10, а). Если усилие R ориентировано вниз (рис. 3.10, б), то и ядро сжатия будет деформировано в глубину, увеличивая глубину резания-скалывания, которая зависит от глубины проникновения ядра сжатия породы. Если же усилие R ориентировано вверх (рис. 3.10, в), то ядро сжатия будет иметь форму, ориентированную к поверхности забоя, при этом глубина борозды резания-скалывания снизится.

При этом важно подчеркнуть, что процесс разрушения горной породы постоянно сопровождается деформированием породы в ядре сжатия и вокруг ядра. Поэтому при выводе аналитических зависимостей важно учитывать

затраты энергии и сил разрушения на процессы деформирования, которые заключаются в смещении слоев, частиц горной породы относительно друг друга. Смещение частиц деформируемой породы способно вызывать очень значительные потери энергии разрушения. Это, например, очень просто проверить, если измерить температуру упругого тела нагретого в результате

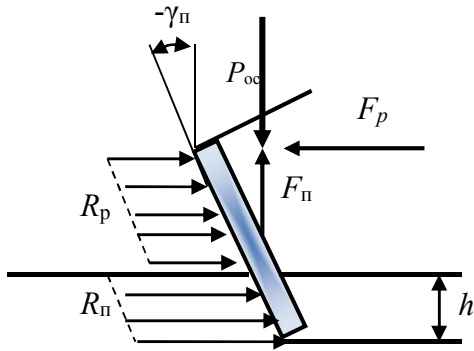


Рис. 3.11. Схема для анализа влияния среды на процесс резания скалывания породы резцом PDC

повторяющихся циклически деформаций сгибания-разгибания (перегибание металлической пластины или проволоки).

Для рассмотрения влияния на работу резца внешней среды, рассмотрим схему на рис. 3.11.

Из схемы следует, что на плоскость резца, установленного с отрицательным передним углом $-\gamma_{\text{п}}$, заглубленного в породу на глубину h и движущегося со скоростью v_p воздействует сопротивление среды – бурового раствора над забоем R_p и со стороны уже разрушенной, но не до полного состояния разрушения, горной породы $R_{\text{п}}$.

Исходя из условия, что при установившемся режиме резания-скалывания породы резцом PDC усилие R будет направлено под прямым углом к плоскости резца (рис. 3.8, б), равнодействующее усилие R сил резания-скалывания F_p и осевого усилия воздействия на резец P определим из соотношения [50]

$$R = \frac{F_{\text{в}}}{\cos \gamma_{\text{п}}} = \frac{P - F_{\text{п}}}{\sin \gamma_{\text{п}}}. \quad (3.6)$$

Из данной формулы следует, что

$$F_p = \frac{P - F_{\text{п}}}{\text{tg} \gamma_{\text{п}}}, \quad (3.7)$$

Где $P_{\text{ос}}$ – осевая нагрузка на резец, Н; $F_{\text{п}}$ – усилие, которое направлено вверх из-за сопротивления среды, действующей на переднюю поверхность резца, Н; $\gamma_{\text{п}}$ – передний гол установки резца, град.

Усилие резания-скалывания породы F_p определим в соответствии со схемой (рис.3.8):

$$F_p = S_{\text{ск}} \sigma_{\text{ск}} (1 + \text{tg} \varphi) + f(P - F_{\text{п}}) + (R_p + R_{\text{п}}), \quad (3.8)$$

где $S_{\text{ск}}$ – площадь площадки скалывания породы на передней грани резца, м^2 ; $\sigma_{\text{ск}}$ – предел прочности породы на скалывание, Па ; φ – угол внутреннего трения в деформируемом объеме породы на передней грани резца, град ; f – коэффициент внешнего трения на контакте поверхность резца горная порода; R_p , $R_{\text{п}}$ – сопротивление со стороны среды, через которую движется со скоростью v_p резец бурового инструмента, соответственно через буровой раствор, насыщенный шламом и разрушенную горную породу.

Как следует из формулы (3.8) значительная часть усилия F_p увеличивается за счет влияния процессов деформирования породы и затрат на внутреннее трение в деформируемых объемах горной породы, а также на преодоление сил внешнего трения и сопротивление среды. Следует подчеркнуть, что в данном случае сопротивление среды с учетом отрицательного угла наклона резца создает не только сопротивление перемещению резца, но и появление усилия $F_{\text{п}}$, направленного вверх и компенсирующего часть осевой нагрузки $P_{\text{ос}}$. Таким образом, рост сопротивления среды при бурении будет требовать более значительного осевого усилия на резец для сохранения глубины резания-скалывания горной породы.

Размер площадки скалывания породы $S_{\text{ск}}$ (3.8, в) рассчитываем как площадь половины эллипса с полуосями $0,5\rho$ и AB :

$$S_{\text{ск}} = 0,5\pi\rho AB = 0,5\pi\sqrt{dh} \frac{h}{\sin\gamma_{\text{ск}}}, \quad (3.9)$$

где d – диаметр резца, м ; h – глубина внедрения резца в породу, м ; $\gamma_{\text{ск}}$ – угол скалывания породы на передней грани резца, град .

После подстановки полученной формулы в формулу (3.8) определим усилие резание-скалывания породы резцом с учетом возможности установки резца 1 с поворотом в направлении резания-скалывания породы φ_p (фронтальный угол резания):

$$F_p = \frac{\pi \sigma_{\text{ск}} h \sqrt{dh}}{\sin\gamma_{\text{п}}} \cos\varphi_p (1 + \text{tg}\varphi) + f(P - F_{\text{п}}) + (R_p + R_{\text{п}}), \quad (3.10)$$

Усилия R_p и $R_{\text{п}}$ определим исходя из фундаментальных зависимостей Бернулли и уравнения Навье-Стокса [32]. Для нашего случая эти выражения будут выглядеть следующим образом:

$$R_p = 0,5v_p^2\rho_p S_1 C_c; \quad (3.11)$$

$$R_{\pi} = 0,5v_p^2\rho_{\pi} S_2 C_c, \quad (3.12)$$

где S_1 и S_2 – площади частей торца резца, взаимодействующие с буровым раствором (выше линии заглабления резца) и разрушаемой горной породой (ниже линии заглабления резца), соответственно, m^2 ;

C_c – коэффициент сопротивления со стороны резца, определяемый формой плоскости резца (ориентировочно для плоского 1, для круглого выпуклого 0,5, для вогнутого по дуге окружности 1,5);

ρ_p, ρ_{π} – весовая плотность бурового раствора, насыщенного шламом и разрушаемой горной породы, H/m^3 .

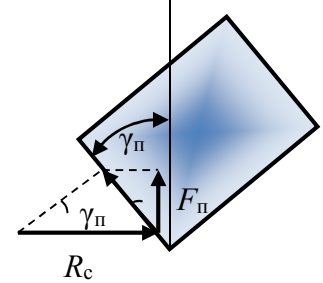


Рис.3.12.Схема к анализу процесса работы резца PDC

В формулах (3.11) и (3.12) значения S_1 и S_2 , а также ρ можно определить по ниже приведенным формулам.

Площадь поверхности резца, находящаяся над разрушаемой горной породой можно рассчитать по формуле:

$$S_2 = \frac{360}{\alpha}\pi r^2 - \rho(r - h) = \frac{360}{\alpha}\pi r^2 - \sqrt{2rh}(r - h). \quad (3.13)$$

Площадь заглабленной в породу части резца рассчитывается по зависимости:

$$S_1 = \pi r^2 - \left[\frac{360}{\alpha}\pi r^2 - \sqrt{2rh}(r - h) \right]. \quad (3.14)$$

В приведенных формулах значения угла α и расстояния ρ (см. рис. 3.8, а) можно определить по формулам:

$$\alpha = 2\arccos\frac{r-h}{r};$$

$$\rho = \sqrt{2rh}.$$

Для упрощения формулы (3.10) и дальнейших выводов из нее, а также инженерных расчетов, целесообразно реакции R_p и R_{π} сопротивлений представить как единую силу, определяющую сопротивление среды со стороны передней грани резца $R_c = R_p + R_{\pi}$. С этой целью в расчетах можно использовать следующую зависимость:

$$R_c = 0,5v_p^2\rho_c S C_c, \quad (3.15)$$

где ρ_c – весовая плотность среды с учетом плотности бурового раствора, насыщенного шламом из зоны разрушения и разрушаемой горной породы, Н/м³;

S – площадь резца или его проекции на линию резания, если угол резания φ_p не равен нулю, а составляет угол более 0 градусов (обычно не более 5 – 10°).

Весовая плотность среды ρ_c определяется как средняя из таких значений как плотность бурового раствора насыщенного шламом – 11–12 кН/м³ и плотности разрушаемой горной породы – 20–25 кН/м³. Таким образом, ориентировочно ρ_c может составлять величину 14–18 кН/м³.

Усилие F_n в формулах (3.8) и (3.10) найдем как проекцию на вертикальную линию усилия R_c с учетом того, что усилие R_c проецируется сначала на плоскость резца, установленную под углом – ($-\gamma_n$), а затем уже на вертикальную линию [11, 38, 65] (рис. 3.12).

В этом случае усилие F_n будет равно

$$F_n = 0,5v_p^2\rho_cSC_c\sin\gamma_n\cos\gamma_n. \quad (3.16)$$

С учетом полученных формул (3.15) и (3.16), выражение (3.10) получит следующий вид:

$$F_p = \frac{\pi\sigma_{ск}h\sqrt{dh}}{\sin\gamma_n}\cos\varphi_p(1 + \operatorname{tg}\varphi) + f(P - 0,125v_p^2\rho_c\pi d^2C_c\sin\gamma_n\cos\gamma_n) + 0,125v_p^2\rho_c\pi d^2C_c\cos\gamma_n \quad (3.17)$$

Анализ этого выражения показывает, что усилие резания-скалывания зависит пропорционально от предела прочности на скалывание $\sigma_{ск}$ и диаметра резцов $d^{\frac{1}{2}}$, глубины резания-скалывания породы $h^{\frac{3}{2}}$, переднего угла резания-скалывания φ_p , внутреннего трения в деформируемых объемах разрушаемой горной породы, коэффициента внешнего трения, плотности среды, в которой работает резец, переднего угла установки резца и от линейной скорости перемещения резца по забою v_p^2 . В данном случае именно скорость перемещения резца, скорость резания-скалывания горной породы оказывается очень значимым параметром определяющим и величину усилия-резания скалывания, и значение усилия, компенсирующего действие осевого усилия.

Для упрощения восприятия формулу (3.17) представим несколько иначе:

$$F_p = \frac{\pi\sigma_{ск}h\sqrt{dh}}{\sin\gamma_n}\cos\varphi_p(1 + \operatorname{tg}\varphi) + f(P_{oc} - A\sin\gamma_n) + A, \quad (3.18)$$

Где $A = 0,125v_p^2\rho_c\pi d^2C_c\cos\gamma_n$.

Используя ранее полученное выражение (2) для расчета F_p можно определить глубину резания-скалывания породы h из равенства полученных формул (2) и (11).

Глубина резания-скалывания будет равна:

$$h = \sqrt[2]{\left\{ \frac{[(P - A \sin \gamma_{\pi})(1 - f \operatorname{tg} \gamma_{\pi}) - A \operatorname{tg} \gamma_{\pi}] \sin \gamma_{\text{СК}}}{\pi \sigma_{\text{СК}} \sqrt{d} \operatorname{tg} \gamma_{\pi} \cos \varphi_p (1 + \operatorname{tg} \varphi)} \right\}^3}, \quad (3.19)$$

где $A = 0,125 v_p^2 \rho_c \pi d^2 C_c \cos \gamma_{\pi}$.

В формуле (3.19) P определяется как нагрузка на один резец, которую можно определить из соотношения

$$P = P_{\text{ос}} / N, \quad (3.20)$$

где $P_{\text{ос}}$ – осевая нагрузка на долото; N – резцов на торце долота.

Из полученной формулы следует ряд важных выводов о влиянии на глубину резания-скалывания породы резцом PDC таких параметров, как:

- передний угол резца γ_{π} ;
- диаметр резца;
- угол поворота резца относительно направления резания-скалывания породы (фронтальный угол резания-скалывания) φ_p ;
- коэффициенты внешнего трения резца о породу и внутреннего трения во внутренних деформируемых слоях горной породы;
- прочности горной породы на скалывание передней гранью;
- скорости резания-скалывания породы, определяемой как квадрат линейной скорости резца на забое скважины – v_p^2 .

Как следует из формулы (3.19) повышение переднего отрицательного угла γ_{π} приводит к снижению глубины резания-скалывания породы за счет компенсации части осевого усилия реакцией среды (разрушаемой горной породы и бурового раствора насыщенного образующимся шламом). Повышение угла поворота резца φ_p – к увеличению глубины резания-скалывания h , так как снижается сопротивление резанию-скалыванию породы из-за уменьшения ширины борозды разрушения.

Увеличение диаметра резца d снижает глубину резания-скалывания породы h .

Сила, выталкивающая резец с отрицательным передним углом в процессе-резания скалывания R_B (в изложении формулы (3.6) $-R_x$) может определяться по формуле [51]

$$R_B = \sigma_{\text{СК}} S_{\text{СК}} K, \quad (3.21)$$

где K – коэффициент, учитывающий превышение усилие сопротивления горной породы резанию-скалыванию при повышении линейной скорости резца.

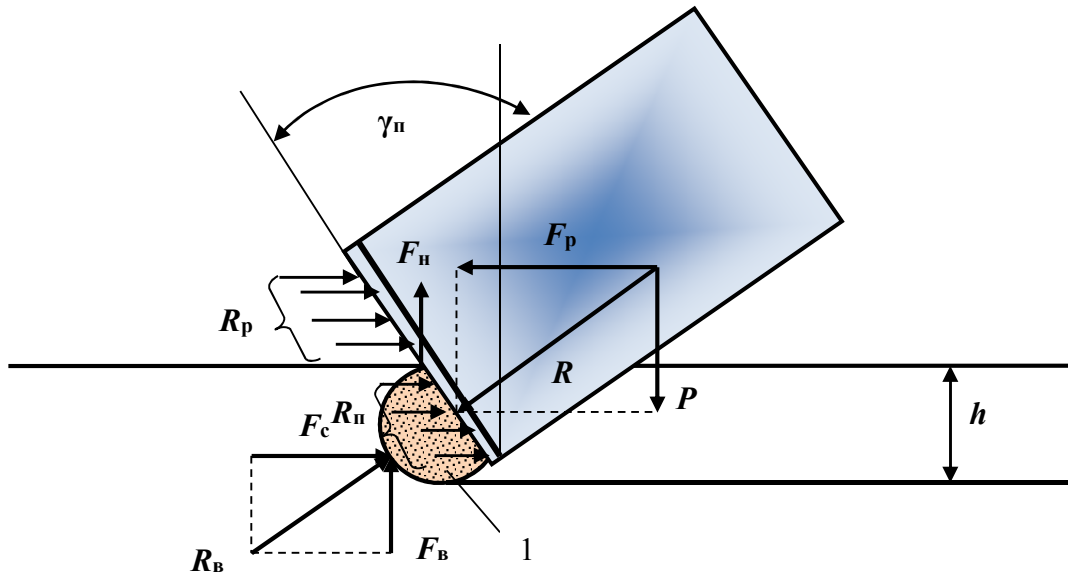


Рис. 3.13. Схема для анализа процесса резания-скалывания горной породы резцом PDC:1 –ядро сжатия горной породы

В завершенном виде формула (3.21) будет выглядеть следующим образом:

$$R_B = \frac{\sigma_{\text{СК}} K \pi h^2 \sqrt{d}}{2 \sin \gamma_{\text{СК}}}. \quad (3.22)$$

Для уточнения действующих сил и реакций рассмотрим схему на рис. 3.13.

Из представленной схемы на рис. 3.13 следует, что реакция еще не разрушенной горной породы R_B воздействует на ядро сжатия (уплотнения) горной породы 1, так как в ядре сжатия горная порода разрушена до состояния мелкого дробления, или как следует из определения Протасова Ю.И. [58], до состояния «псевдожидкости». И хотя это определение более подходит для разрушения твердых горных пород, тем не менее, отличия, связанные с работой резца в горных породах средней твердости или мягких в данном

случае не столь существенны, поскольку в любом случае на передней грани резца возникает область уплотнения горной породы [25, 38,56,65].

Реакция R_b в случае установившегося режима резания-скалывания породы направлена навстречу результирующей осевого усилия и усилия-резания скалывания R_i под прямым углом к поверхности резца.

Сила F_b , которая направлена навстречу осевому усилию, компенсируя эту силу будет равна

$$F_b = R_b \sin \gamma_{\pi}. \quad (3.23)$$

Сопротивление среды, реакции R_p и R_{π} генерируют, как ранее уже пояснялось, появление реакции F_n , направленной также навстречу осевому усилию и также производящими эффект выталкивания резца из горной породы. Эта реакция будет равна выражению, представленному в виде формулы (3.16).

Для определения коэффициента K_b формуле (3.22) следует использовать результаты экспериментальных исследований по определению возрастающей силы сопротивления резанию-скалыванию породы при росте линейной скорости резца. С этой целью можно воспользоваться данными К.

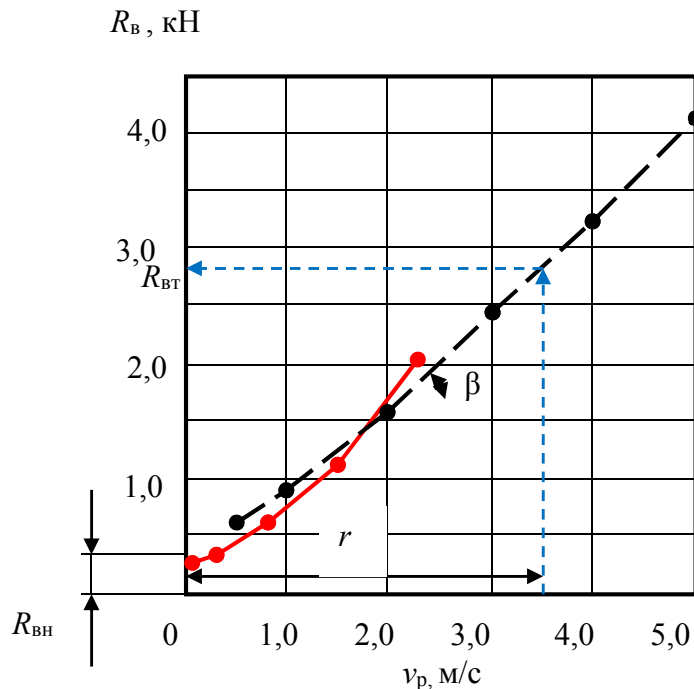


Рис. 3.14. Зависимость усилия R_b от скорости резания-скалывания породы v_p резцом типа *PDC*: сплошная линия — экспериментальные данные; пунктирная линия — аппроксимирующая кривая

И. Борисова, определившего подобную зависимость на специальной стендовой установке [10].

На рис. 3.14 приведены зависимости отражающие влияние скорости резания-скалывания породы v_p на величину усилия R_b для песчаника [10].

Экспериментальная кривая, охватывает ограниченный диапазон значений скоростей резания-скалывания, поэтому она дополнена зависимостью, которая рассчитана по экспериментальным данным методом наименьших квадратов. Уравнение для расчета величины R_b выглядит следующим образом [36,38]:

$$R_b = 0,258 + 0,664 v_p + 0,021 v_p^2, \quad (3.24)$$

где v_p – скорости резания-скалывания породы резцом, м/с.

Полученное уравнение (3.24) позволяет проследить рост усилия R_b при повышении скорости перемещения резца до более высоких значений.

Из формулы (3.19) следует, что усилие R_b при установившемся режиме резания-скалывания породы, когда все основные параметры, входящие в формулу остаются неизменными, изменение скорости перемещения резца будет зависеть от значения напряжения породы на скалывание $\sigma_{ск}$. Параметр прочности горной породы $\sigma_{ск}$ при повышении скорости резания-скалывания v_p будет также возрастать. В этом случае коэффициент K , представленный в формуле (3.19) в этом случае будет равен:

$$K = \frac{R_{BT}}{R_{BH}}, \quad (3.25)$$

где R_{BT} – усилие сопротивления, соответствующее значению линейной скорости резца (расстояние x на рис. 3.12); R_{BH} – усилие сопротивления, соответствующее линейной скорости, близкой к нулевому значению (рис. 3.14).

Усилие R_{BT} можно определять по зависимости вида

$$R_{BT} = \operatorname{tg} \beta \times r, \quad (3.26)$$

где β – угол наклона опытной кривой, которую можно получить при испытании предела прочности на скалывание определенной горной породы (угол наклона графика на рис. 3.14); x – текущее относительное значение расстояния от центра торца долота до точки в которой происходит определение R_b (рис. 3.14); r – радиус долота.

Таким образом, для успешной оценки параметра K достаточно иметь экспериментально определенную зависимость сопротивления резания-скалывания, а именно угол β , полученный с линии роста параметра R_b (рис.3.14).

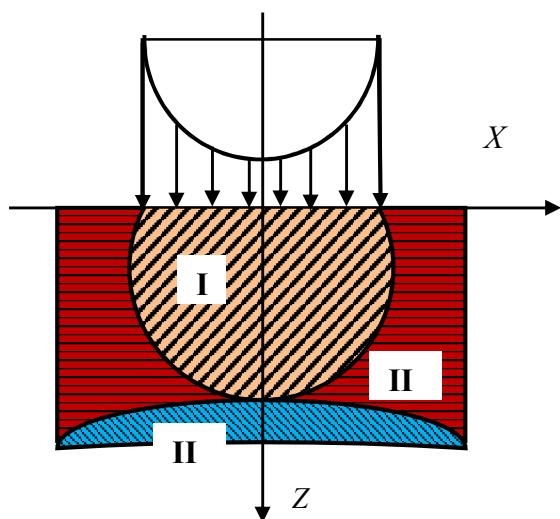


Рис. 3.15. Области напряжений под торцом плоского индентора: I – сжатия (ядро сжатия); II – растяжения; III – сложно-напряженного состояния

Для практических расчетов в качестве предела прочности на скалывание $\sigma_{ск}$ горной породы можно использовать значение предела прочности на растяжение σ_r .

Напряженное состояние горной породы под внедряемым плоским цилиндрическим индентором характеризуется наличием области I – всестороннего сжатия, области II – растягивающих напряжений и областью III, в которой порода находится в сложном, но слабо напряженном состоянии (рис. 3.15) [22, 38].

Под штампом в породе (на передней грани резца, для случая резания-скалывания горной породы) формируется область сжатия (уплотнения) породы. Форма этой области для идеально упругих изотропных горных пород соответствует форме части шара.

Внутренний деформируемый объем, воспринимающий давление индентора или резца, передает это давление породе, создавая напряжения растяжения. Развитие предельной деформации вглубь деформируемого объема увеличивает напряжения растяжения. В упруго-хрупких и хрупко-пластичных породах под действием растягивающих напряжений возникают трещины скалывания горной породы [38].

Для высокопластичных и пористых пород формируемый объем сжатия не приводит к скалыванию породы. В этом случае при вдавливании в породу наблюдаются лишь радиальные трещины, вызванные уплотнением породы [22,38,67].

Таким образом, для расчетов при проектировании долота, с целью определения параметров упрочнения могут использоваться известные из справочников значения предела прочности на растяжения горной породы σ_r . При их отсутствии будет достаточно иметь значение предела прочности на

сжатие $\sigma_{сж}$ (ГОСТ 21153.2-84), по которому можно судить и о σ_p , поскольку известно, что соотношение $\sigma_{сж}/\sigma_p = 10-15$ для основной группы пород осадочного комплекса, что следует из фундаментальных работ академика АН СССР В. В. Ржевского [60].

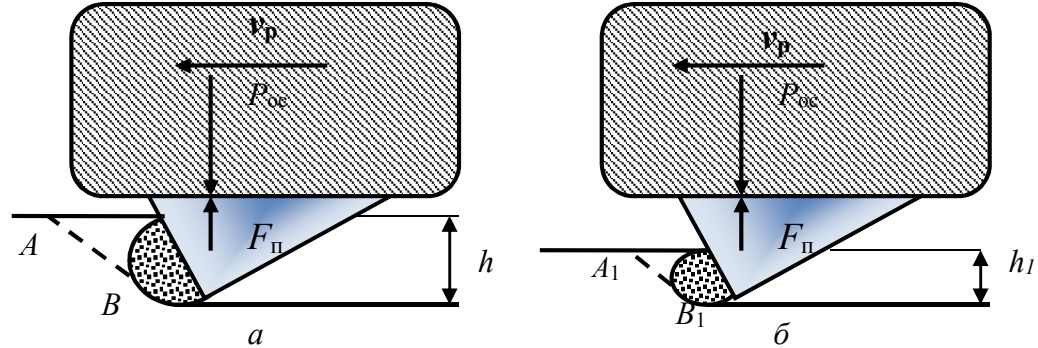


Рис. 3.16. Схема для анализа процесса резания-скалывания породы резцом PDC: а – при более низкой частоте вращения; б – при более высокой частоте вращения

При этом, безусловно, более точно можно определить предел прочности на растяжение в соответствии с ГОСТ 21153.3-85.

С учетом, нами определенного, значения К формула расчета глубины резания-скалывания горной породы резцом PDC, будет выглядеть следующим образом

$$h = \sqrt[2]{\left\{ \frac{[(P - A \sin \gamma_{п})(1 - f \operatorname{tg} \gamma_{п}) - A \operatorname{tg} \gamma_{п}] \sin \gamma_{ск}}{\pi K \sigma_{ск} \sqrt{d} \operatorname{tg} \gamma_{п} \cos \varphi_p (1 + \operatorname{tg} \varphi)} \right\}^3}, \quad (3.27)$$

Где $A = 0,125 v_p^2 \rho_c \pi d^2 C_c \cos \gamma_{п}$; $K = \frac{R_{вт}}{R_{вн}}$; $R_{вт} = \operatorname{tg} \beta \times r$.

Причины роста параметра сопротивления горной породы скалыванию при повышении линейной скорости резания-скалывания горной породы состоят в том, что при повышении скорости перемещения резца перед ядром сжатия породы, т. е. на передней грани резца не успевает образовываться («прорасти») синхронно с перемещением резца трещина отрыва AB (рис. 3.16, а) [38].

В результате резец испытывает увеличивающееся сопротивление породы и стремится снизить глубину резания-скалывания породы до той величины, при которой трещина отрыва породы успеет сформироваться и произойдет синхронное с движением резца отделение породы на его передней грани. Это возможно за счет того, что с увеличением параметра R_v повышается и вертикальная реакция породы F_v (рис. 3.13), которая противодействует

осевому усилию P и снижает его. В результате при более высоком значении скорости перемещения резца v_p устанавливается иная, уже меньшая глубина резания-скалывания породы h_1 , снижается длина трещины отрыва породы A_1B_1 и устанавливается иной режим разрушения с меньшей глубиной проникновения резца в породу (рис. 3.16, б).

Подтверждением связи линейной скорости резания-скалывания породы с глубиной формируемой борозды разрушения могут быть результаты опытного бурения различными типами бурового инструмента [8,9,11,38,29,41,44].

Например, результаты бурения долотом PDC песчаника показали следующую модель, полученную обработкой данных по методике полного факторного эксперимента:

$$h_{об} = 0,82 + 0,63P - 0,072\omega - 0,05 P\omega, \quad (3.28)$$

где P – осевая нагрузка на долото, кН; ω – частота вращения долота, мин⁻¹.

Из формулы следует (1.26) следует, что рост частоты вращения ω снижает углубление за один оборот инструмента на забое скважины.

Подобные модели получены и для бурения твердых горных пород однослойными и импрегнированными коронками и шарошечными долотами [38,39,41,43,44].

Из данных моделей следует, что общей закономерностью механического объемного разрушения горных пород является снижение глубины борозды, формируемой резцом по мере повышения частоты вращения. Причина этого состоит в повышении сопротивляемости горной породы разрушению, поскольку в породе не успевают сформироваться соответствующие деформации и трещины для отделения кусочков породы от забоя при повышении скорости приложения разрушающих усилий [38].

При этом для инструментов оснащенных породоразрушающими элементами, геометрия которых предполагает наличие переднего отрицательного угла. Эта тенденция подкрепляется и сопротивлением среды (бурового раствора насыщенного шламом), воздействующей на переднюю грань резца.

Для устранения данного дисбаланса сил при разрушении следует по мере повышения частоты вращения производить и некоторое увеличение

осевой нагрузки для повышения напряжений в породе и соответственно для ускорения процессов деформирования и трещинообразования [38].

Полученная зависимость (1.25) может использоваться при проектировании буровых долот с резцами *PDC*, для которых важным условием равномерного изнашивания резцов является равномерность резания-скалывания всеми резцами, расположенными в разных точках торцевой поверхности долота. Например, поскольку известно, что скорость перемещения резца при резании-скалывании породы существенно влияет на глубину его внедрения, можно с учетом полученной аналитической зависимости (1.25) определить рациональную схему установки резцов на торце долота.

Важным и новым в формуле (1.25) является рассмотрение влияния линейной скорости резания-скалывания на глубину борозды разрушения.

На рис. 3.17 показаны схемы распределения скоростей резания-скалывания резцами долота и установки резцов на торце долота.

Из приведенных зависимости и схем следует, что если линейная скорость в центральной точке торца долота равна нулю, то, например, для долота диаметром 190,5 мм (0,1905 м) при частоте вращения долота 300 мин^{-1} (5 с^{-1}) линейная скорость резца, размещенного на внешнем радиусе торца долота, будет равна 3 м/с.

Если диаметр долота 250,8 мм (0,2508 м), то при том же значении частоты вращения линейная скорость будет равна около 4 м/с.

В результате такого распределения скоростей резания-скалывания резцы долота, размещенные ближе к наружному диаметру, будут иметь меньшее заглубление в породе, что следует из формулы (1.25), чем резцы, размещенные ближе к центру торца долота, так как испытывают повышенное

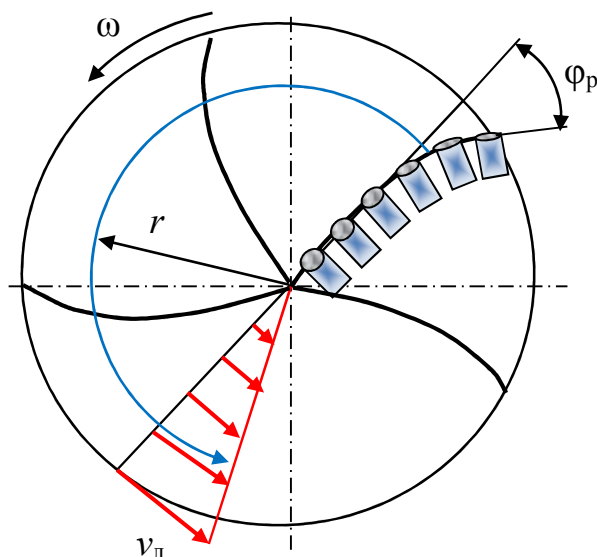


Рис. 3.17. Схема установки резцов на торце долота с учетом скоростей резания-скалывания породы [34]

сопротивление резанию-скалыванию породы, которое, как известно, растет с увеличением линейной скорости перемещения резца.

Таким образом, можно отметить на первый взгляд парадоксальный факт: резцы долота, размещенные на различных линиях резания-скалывания, осуществляя разрушение одной и той же горной породы, испытывают различное сопротивление резанию-скалыванию.

Для решения задачи выравнивания условий и глубины резания-скалывания породы, когда все резцы на торце долота будут работать в условиях равного сопротивления резанию-скалыванию, при их расстановке на торце долота целесообразно использовать следующие общие технические предложения, которые следуют из формулы (1.25):

- диаметр резцов может уменьшаться (при равной величине выпуска резцов) в направлении от центра торца к его периферии;
- возможно активное варьирование величиной переднего угла для выравнивания глубиной равновесного резания-скалывания горной породы;
- угол поворота резца φ_p может изменяться в пределах $0-10^\circ$ и увеличиваться в направлении от центра к периферии торца.

При этом важны следующие рекомендации при выборе схемы установки резцов.

Передний отрицательный угол γ_n может снижаться только до нулевого значения и не переходить в область положительных значений, так как это негативно скажется на стойкости резцов, особенно при бурении твердых, трещиноватых горных пород, горных пород с включением более твердых обломков, конгломератов и брекчий вследствие повышения динамического характера разрушения породы, поскольку величина ударного импульса, воспринимаемого резцом, пропорциональна косинусу переднего угла установки резца ($\cos \gamma_n$), а значит, по мере повышения переднего угла вероятность скола резца при ударе о борт трещины или твердое включение в породе снижается.

При проектировании долота следует учитывать такие важные обстоятельства, как тип горной породы и планируемый режим частоты вращения, для которого проектируется долото. В качестве параметра, характеризующего буримость горных пород, следует определить сопротивление горной породы на резание-скалывание при различных

значениях скорости приложения разрушающего усилия или усилия резания-скалывания породы. Для мягких горных пород и пород средней твердости увеличение данного параметра может быть очень значительным (до двух и более раз при изменении скорости приложения разрушающего усилия от 0 до 3–4 м/с).

Для сохранения прежней глубины резания-скалывания породы при повышении частоты вращения инструмента следует несколько увеличить осевую нагрузку на инструмент.

Произведем расчет усилий сопротивления среды R_c и горной породы R_b при работе резца долота с учетом скорости перемещения резца, а также составляющих этих сил F_{π} и F_b , направленных в направлении действующей осевой нагрузки и снижающих, таким образом, этот параметр режима бурения и по ранее полученным формулам:

$$R_c = 0,5v_p^2 \rho_c S C_c ; R_b = \frac{\sigma_{ск} K \pi h^{\frac{3}{2}} \sqrt{d}}{2 \sin \gamma_{ск}}. \quad (3.29)$$

$$F_{\pi} = 0,125v_p^2 \rho_c \pi d^2 C_c \sin \gamma_{\pi} \cos \gamma_{\pi}; F_b = R_b \sin \gamma_{\pi} = \frac{\sigma_{ск} K \pi h^{\frac{3}{2}} \sqrt{d}}{2 \sin \gamma_{ск}} \sin \gamma_{\pi}. \quad (3.30)$$

Результаты расчетов представлены в таблицах 3.1 и 3.2, а также в виде графиков на рис. 3.18.

Таблица 3.1

Расчетные данные усилия сопротивления и вертикальной реакции горной породы на изменение линейной скорости перемещения резца

Предел прочнос-ти на скалыва-ние $\sigma_{ск}$, кг/см ²	Коэффи-циент K	Реакци-я R_b , даН	Выталкивающая сила, F_b , даН			
			Передний угол установки резца, град			
			-5	-10	-15	-20
10 плотные глины	1	5,5	0,47	0,94	1,27	1,88
	2	11	0,94	1,88	2,54	3,76
	3	16,5	1,41	2,8	3,81	5,6
	4	22	1,88	3,8	5,08	7,6
20 извест- няк, алевролит	1	11	0,94	1,6	2,54	3,6
	2	22	1,41	3,2	5,08	6,4
	3	33	2,4	4,8	7,62	9,6
	4	44	3,2	6,4	10,16	12,8
50 песчаник, аргиллит	1	27,5	2,1	4,8	6,3	9,6
	2	55	4,8	9,6	12,6	19,2
	3	82,5	7,2	14,4	18,9	28,8
	4	110	9,6	19,2	25,2	38,4

Таблица 3.2

Расчетные данные усилия сопротивления и вертикальной реакции среды на изменение линейной скорости перемещения резца и плотности среды (диаметр резца *PDC* 15 мм, коэффициент формы плоского резца $C_c=1$)

Плотность среды, ρ_c , гр/см ³	Линейная скорость резца, v_p , м/с	Реакция R_c , даН	Выталкивающая сила, F_n , даН			
			Передний угол установки резца, град			
			-5	-10	-15	-20
1	1	2,2	0,19	0,38	0,57	0,76
	2	8,8	0,76	1,6	2,4	3,2
	3	19,8	1,8	3,6	5,4	7,2
	4	35,2	3,06	6,0	9,0	12,0
	5	55	5,0	10,0	15,0	20
1,5	1	3,3	0,29	0,57	0,86	1,14
	2	13,2	1,14	2,28	3,37	4,46
	3	29,7	2,6	5,2	7,8	10,4
	4	52,8	4,5	9,0	13,5	18,0
	5	82,5	7,1	14,2	21,3	28,4
2,0	1	4,4	0,4	0,8	1,2	1,6
	2	17,6	1,6	3,2	4,8	6,4
	3	39,6	3,6	7,2	10,8	14,4
	4	70,4	6,0	12,0	18,0	24,0
	5	110	10,0	20,0	30,0	40,0

Как следует из полученных результатов расчетов, сопротивление перемещению резца как за счет резания-скалывания горной породы R_v и сопротивление за счет влияния среды R_c достигают достаточно высоких значений, особенно при высокой плотности среды и линейной скорости перемещения резца по забою. При этом значительное влияние оказывают прочностные свойства горной породы – предел прочности на скалывание горной породы $\sigma_{ск}$ и упрочнение горной породы при повышении линейной скорости перемещения резца. В то же время, поскольку сопротивление среды определяется не только плотностью среды, но и находится в квадратичной зависимости от линейной скорости перемещения резца, наиболее существенное и даже решающее влияние скорость перемещения резца на сопротивление перемещению резцов оказывает при бурении более слабых горных пород – мягких и средних по твердости.

Рост сопротивлений за счет влияния среды требует более значительных величин линейных скоростей перемещения резца, что связано прежде всего с высокой частотой вращения и значительным диаметром долота. Именно

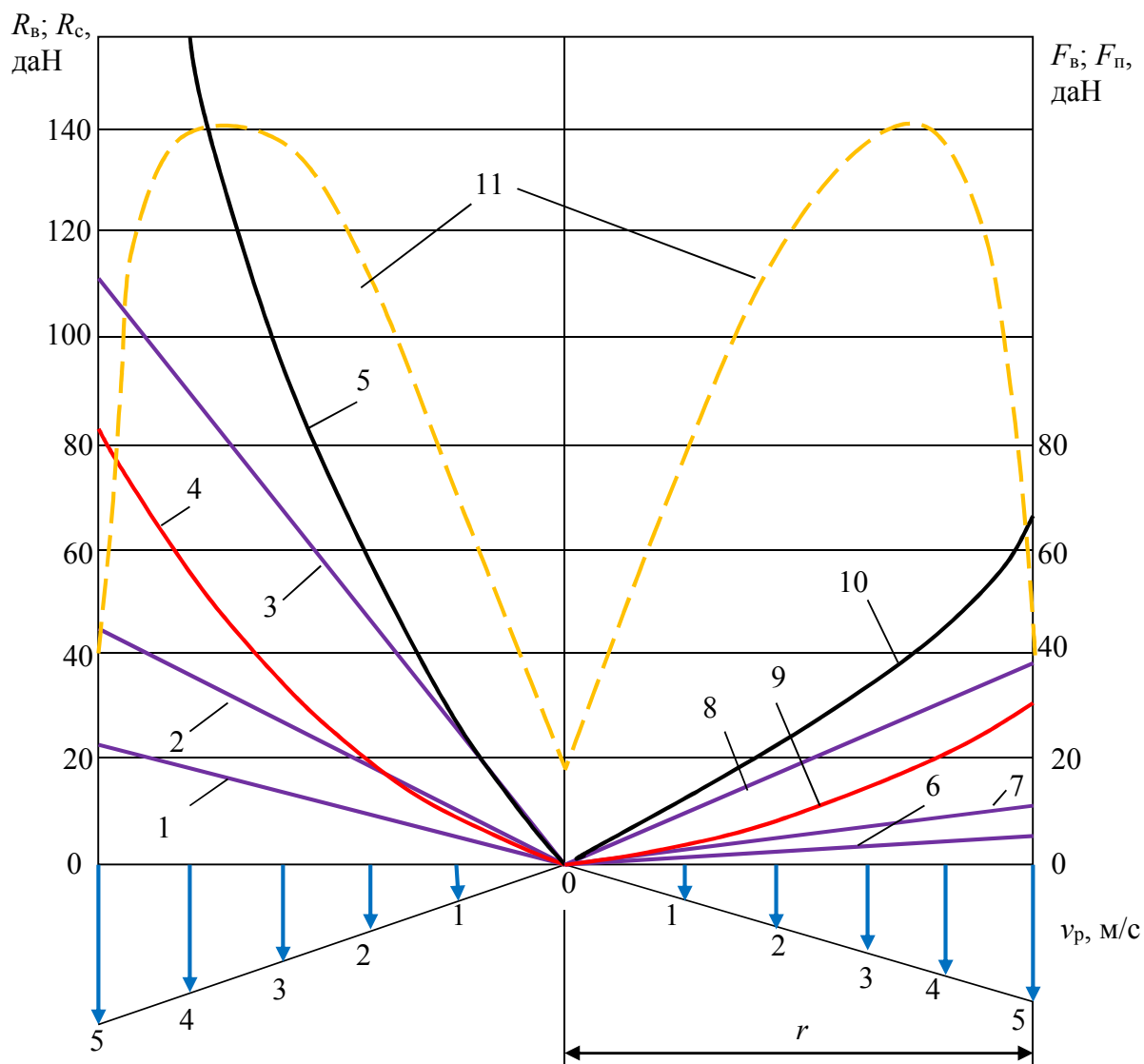


Рис. 3.18. Графики полученные расчетом по формулам, определяющим сопротивление резанию-скалыванию за счет разрушения породы и преодоления сопротивления среды резцом PDC (данные табл. 3.1 и 3.2): 1 –усилие R_B – мягкая горная порода ($\sigma_{ск}= 10 \text{ кг/см}^3$), передний угол -20° ; 2 –усилие R_B – горная порода ниже средней твердости ($\sigma_{ск}= 30 \text{ кг/см}^3$), передний угол -20° ; 3 –усилие R_B – горная порода средней твердости ($\sigma_{ск}= 50 \text{ кг/см}^3$), передний угол -20° ; 4 –усилие R_C – плотность среды $1,5 \text{ г/см}^3$; 5 – сумма ($R_B + R_C$) при $\sigma_{ск}= 50 \text{ кг/см}^3$ и плотности среды $1,5 \text{ г/см}^3$; 6 –усилие F_B – мягкая горная порода ($\sigma_{ск}= 10 \text{ кг/см}^3$), передний угол -20° ; 7 –усилие F_B – горная порода ниже средней твердости ($\sigma_{ск}= 30 \text{ кг/см}^3$), передний угол -20° ; 8 –усилие F_B – горная порода средней твердости ($\sigma_{ск}= 50 \text{ кг/см}^3$), передний угол -20° ; 9 –усилие $F_П$ – плотность среды $1,5 \text{ г/см}^3$; 10 –сумма ($F_B + F_П$) при $\sigma_{ск}= 50 \text{ кг/см}^3$ и плотности среды $1,5 \text{ г/см}^3$; 11 – предполагаемая линия интенсивности износа резцов на торце долота, вызванная неравномерным сопротивлением резанию-скалыванию горной породы

поэтому рост сопротивлений среды может быть очень высоким и даже превышать сопротивление при разрушении горной породы.

Сопротивление перемещению резцов при бурении долотами с резцами *PDC* в следствие отрицательного переднего угла обеспечивает появление выталкивающей силы, которая определяется величиной силы сопротивления и переднего угла. В процессе резания-скалывания эта сила приводит к снижению глубины резания-скалывания горной породы, регулируя толщину снимаемого инструментом слоя горной породы.

На рис.3.18 представлены графики, полученные расчетом на основе данных представленных в табл. 3.1 и 3.2.

Представленные графики наглядно показывают связь величин линейных скоростей резцов на торце долота, усилий сопротивления резанию-скалыванию и наиболее вероятной линии интенсивности изнашивания резцов долота.

При этом полученные значения сил сопротивления R_c , R_b и сил выталкивания резца из породы F_b , F_n по формулам (3.29) и (3.30) имеют отношения только к одному работающему на забое резцу. Если учитывать, что работающих резцов N может быть от 10 и до (50 – 60), то величина и сил сопротивления и значения выталкивающей силы будет очень значительны.

В то же время для расчета суммарных сил сопротивления по формуле:

$$R_{\Sigma} = (R_c + R_b)N$$

и суммарного усилия выталкивания резца из породы

$$F_{\Sigma} = (F_n + F_b) N,$$

необходимо определить средние значения таких параметров как величина отрицательного переднего угла установки резцов $-\gamma_n$, линейная скорость резцов v_p и коэффициент K .

При расчете перечисленных параметров будем придерживаться следующей схемы: расчет среднего линейной скорости резца v_p можно производить с учетом графика распределения линейных скоростей. В данном случае средней точкой для расчета может служить центр тяжести прямоугольника (рис.

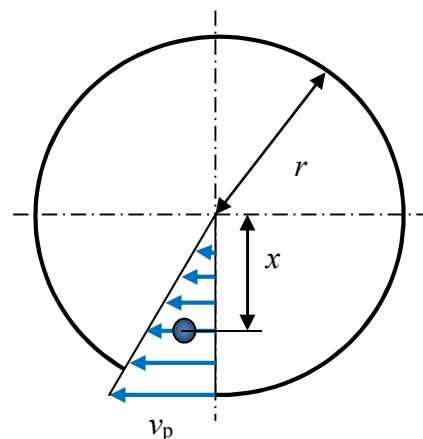


Рис. 3.19. Схема к расчету средней величины переднего угла, линейной скорости

3.17), у которого одна из сторон равна радиусу долота r , а другая максимальному значению вектора линейной скорости v_p (рис. 3.19).

Величина x равна $\frac{2}{3} r$, где r – радиус долота, поэтому усредненная линейная скорость будет равна:

$$v_p^c = \frac{4\pi r \omega}{3}. \quad (3.31)$$

При расчете среднего значения коэффициента K следует придерживаться именно рассчитанной скорости v_p^c и формул (3.25) и (3.26).

При расчете переднего угла средняя величина переднего угла может определяться как среднее арифметическое для долота, т.е. с учетом значений переднего угла для всех резцов размещенных на торце.

В данном случае важно также определить величину крутящего момента на долоте с учетом расстояния от центра торца долота до центра тяжести треугольника скоростей (рис. 3.19), поскольку, определяющим для расчета крутящего момента будет суммарное сопротивление вращению долота в режиме резания-скалывания горной породы. Этому соответствует выражение для реза в формуле (3.18):

$$F_p = \frac{\pi \sigma_{ск} h \sqrt{dh}}{\sin \gamma_n} \cos \varphi_p (1 + \operatorname{tg} \varphi) + f(P_{oc} - A \sin \gamma_n) + A,$$

$$\text{Где } A = 0,125 v_p^2 \rho_c \pi d^2 C_c \cos \gamma_n.$$

Крутящий момент на долоте в этом случае можно рассчитать по формуле:

$$M_{кр} = \frac{2}{3} r F_p N. \quad (3.32)$$

Важным для управления параметрами режима бурения является также величина углубления долота за один оборот на забое скважины. Эта величина может рассчитываться с использованием формулы для расчета глубины резания скалывания горной породы резцом h (3.27). В этом случае можно записать:

$$h_o = h n_p, \quad (3.33)$$

где n_p – число резцов в линии резания на торце долота.

Число резцов в линии резания определяется на долоте и может составлять один – если предусмотрено однократное перекрытие забоя, два – при двукратном перекрытии и три, если в одной линии резания три резца.

Формула (3.33) может иметь определенное значение при определении оптимальных условий отработки долота с учетом рациональной величины глубины резания-скалывания горной породы h . В данном случае рекомендуется производить отработку долота по рациональной величине углубления за один оборот.

Таблица 3.3

Данные расчета сил сопротивления при работе долота, оснащенного 20 резцами диаметром 15 мм при среднем переднем угле -15 градусов

Тип горной породы	Линейная скорость, м/с; плотность среды, г/см ³	R_v , даН;	F_v , даН	R_c , даН;	F_n , даН	R_v+R_c , даН;	F_v+F_n , даН
Глина	3,0; 1,5	$16,5 \cdot 20 = 330$	$3,81 \cdot 20 = 76,2$	$29,7 \cdot 20 = 594$	$7,8 \cdot 20 = 156$	924	232,2
Песчаник, аргил-лит	3,0; 1,5	$82,5 \cdot 20 = 1650$	$18,9 \cdot 20 = 378$	$29,7 \cdot 20 = 594$	$7,8 \cdot 20 = 156$	2244	534
Глина	4,0 1,5	$16,5 \cdot 20 = 330$	$3,81 \cdot 20 = 76,2$	$52,8 \cdot 20 = 1056$	$13,5 \cdot 20 = 270$	1386	346,2
Песчаник, аргил-лит	4,0 1,5	$82,5 \cdot 20 = 1650$	$18,9 \cdot 20 = 378$	$52,8 \cdot 20 = 1056$	$13,5 \cdot 20 = 270$	2706	648
Глина	4,0 2,0	$16,5 \cdot 20 = 330$	$3,81 \cdot 20 = 76,2$	$70,4 \cdot 20 = 1408$	$18 \cdot 20 = 360$	1738	446,2
Песчаник, аргил-лит	4,0 2,0	$82,5 \cdot 20 = 1650$	$18,9 \cdot 20 = 378$	$70,4 \cdot 20 = 1408$	$18 \cdot 20 = 360$	3058	738

Подобная методика подробно описана в работе [39].

В табл. 3.3 приведены расчеты для определенных условий бурения долотом, оснащенного 20 резцами диаметром 15 мм, средний передний угол равен -15° в соответствии с результатами расчетов, представленных в табл. 3.1 и 3.2.

Результаты расчетов, представленные в табл. 3.3, показывают, что и силы сопротивления и силы, выталкивающие резец из породы при значительных линейных скоростях перемещения резцов могут достигать очень существенных значений и их следует учитывать при проектировании вооружения долота как важную составляющую при расчете сил определяющих стойкость долота и энергозатраты на бурение.

3.3. Стендовые исследования процесса разрушения горных пород коронками с алмазным вооружением.

Экспериментальное исследование буримости долерита импрегнированной коронкой выполнено в соответствии с планом полного факторного эксперимента [1,39] типа $N = 2^k$, где N – число достаточных для получения достоверных результатов опытов; k – число учитываемых при эксперименте факторов. В качестве откликов были приняты:

- механическая скорость бурения v_m , м/ч;
- углубление за один оборот $h_{об}$, мм/об;
- энергоемкость бурения N/v_m , кВт·ч/м;
- мощность на бурение N , кВт.

В качестве влияющих на процесс бурения факторов приняты осевая нагрузка $P_{ос}$, даН, которая устанавливалась равной 1000 и 1400 даН и частота вращения ω , мин⁻¹ – 435 и 710 мин⁻¹. Таким образом, число достаточных опытов N в пределах каждого эксперимента равнялось четырем. Сочетания выбранных параметров позволили устанавливать четыре режима бурения: режим 1 ($\omega = 435$, мин⁻¹; $P_{ос} = 1000$ даН); режим 2 ($\omega = 435$, мин⁻¹; $P_{ос} = 1400$ даН); режим 3 ($\omega = 710$, мин⁻¹; $P_{ос} = 1000$ даН); режим 4 ($\omega = 710$, мин⁻¹; $P_{ос} = 1400$ даН).

Таким образом, в соответствии с методикой ПФЭ использованы четыре варианта сочетания параметров режима бурения, для которых получены соответствующие значения вышеуказанных откликов [1, 39].

В результате обработки данных получены следующие эмпирические модели, отражающие основные аспекты процесса бурения долерита стандартной импрегнированной коронкой с применением в качестве очистного агента воды.

Модель формирования механической скорости бурения:

$$v_m = 11,08 + 1,36 P_{ос} + 2,54 \omega + 0,32 P_{ос} \omega, \quad (3.34)$$

где $P_{ос}$, ω – значения параметров режима бурения (факторов) в закодированном выражении (-1 – для минимальных, +1 – для максимальных значений параметров факторов – $P_{ос}$ и ω , в установленных планом эксперимента значениях).

Модель формирования углубления за один оборот коронки на забое:

$$h_o = 0,32 + 0,04 P_{oc} - 0,004 \omega - 0,0002 P_{oc} \omega. \quad (3.35)$$

Модель затрат мощности на бурение долерита коронкой для условий бурения с водой выглядит следующим образом:

$$N = 10,9 + 0,025 P_{oc} + 1,125 \omega - 0,025 P_{oc} \omega, \quad (3.36)$$

Модель формирования энергоемкости разрушения горной породы при бурении:

$$N/v_m = 1,02 - 0,025 P_{oc} - 0,13 \omega - 0,01 P_{oc} \omega. \quad (3.37)$$

При бурении импрегнированной коронкой с применением эмульсии получены несколько иные модели:

$$v_m = 11,6 + 1,99 P_{oc} + 2,5 \omega + 0,57 P_{oc} \omega, \quad (3.38)$$

$$h_o = 0,34 + 0,057 P_{oc} - 0,009 \omega - 0,0003 P_{oc} \omega, \quad (3.39)$$

$$N = 11,15 + 1,18 P_{oc} + 1,58 \omega + 0,125 P_{oc} \omega. \quad (3.40)$$

$$N/v_m = 1,0 - 0,0635 P_{oc} - 0,0735 \omega - 0,012 P_{oc} \omega. \quad (3.41)$$

Анализ полученных данных показал, что достигается высокая механическая скорость бурения (модели (3.34) и (3.38)) импрегнированной коронкой (более 15 м/ч), которая возрастает при применении технической воды с добавлением ПАВ. На формирование скорости бурения оказывает более высокое влияние частота вращения бурового инструмента, что вполне характерно для бурения алмазным буровым инструментом. [74]

Соответственно, согласно моделей (3.35) и (3.39), достигается высокое углубление бурового инструмента за один оборот, которое выше при бурении с применением эмульсии.

Повышение осевой нагрузки приводит к росту углубления за один оборот, а рост частоты вращения без повышения осевой нагрузки – к снижению углубления за оборот коронки на забое, что характеризует процесс разрушения как объемное разрушение породы на всем интервале применяемых параметров режима бурения и указывает на рост сопротивления, как горной породы, так и среды на работу породоразрушающих элементов бурового инструмента.

Модели (3.36) и (3.40) показывают рост мощности на разрушение по мере повышения параметров режима бурения, что вполне объективно и правильно отражает процесс бурения.

Модели (3.37) и (3.41) энергоемкости разрушения показывает, – с повышением параметров режима бурения достигается столь высокая

механическая скорость, что энергоёмкость бурения снижается, достигая минимальных значений при максимальных параметрах режима бурения, что указывает на существенный резерв для повышения параметров режима бурения.

Следует отметить, что параметр энергоёмкости крайне важен для оценки работоспособности инструмента.

Согласно исследованиям, представленным в работах [23,38], данный параметр имеет высокий уровень корреляции с ресурсом бурового инструмента, обеспечивая его максимум при стремлении критерия N/v_m к минимальному значению. Таким образом, ориентируясь на данный критерий можно подобрать режимы бурения, которые соответствуют наиболее производительному бурению с высоким ресурсом бурового инструмента.

Из данных уравнений в соответствие со значениями коэффициентов при факторах P_{oc} и ω следует, что при бурении импрегнированной коронкой с применением воды основное влияние на затраты мощности оказывает частота вращения, но при бурении с применением эмульсии различие между влиянием осевого усилия и частоты вращения сглаживается, хотя по-прежнему преобладает влияние частоты вращения.[73] Последнее связано с тем, что применение эмульсии снижает твердость забоя скважины, и роль осевого

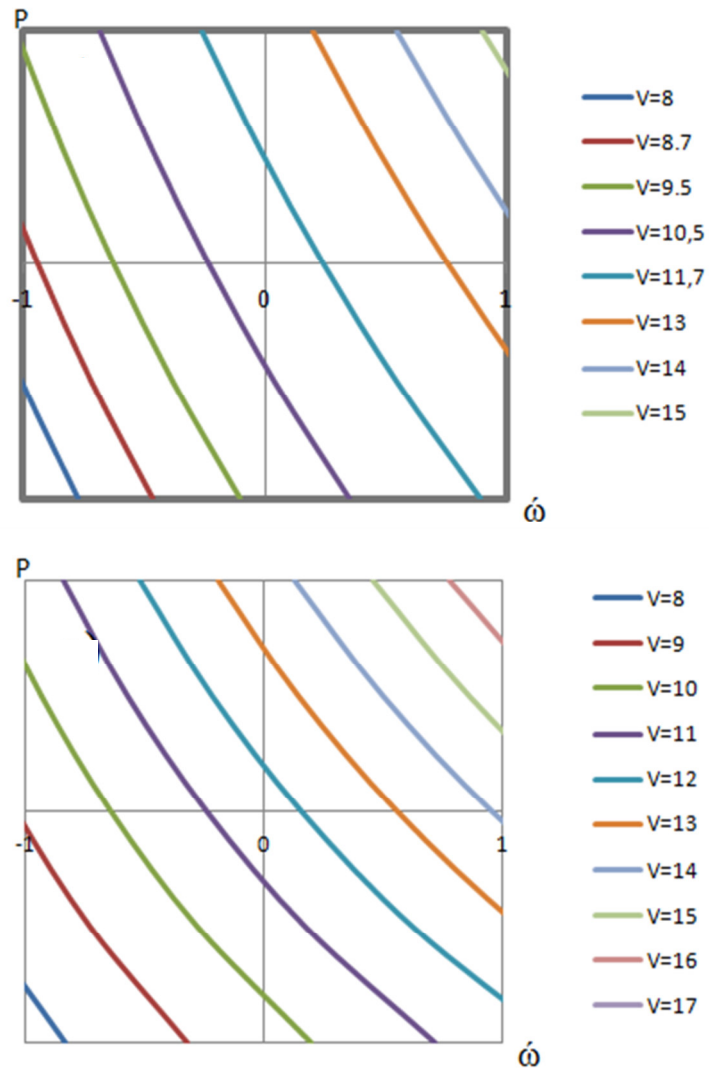


Рис. 3.20. Графическая интерпретация моделей механической скорости бурения (м/ч) : a – с промывкой водой;
 b – с промывкой водой с ПАВ

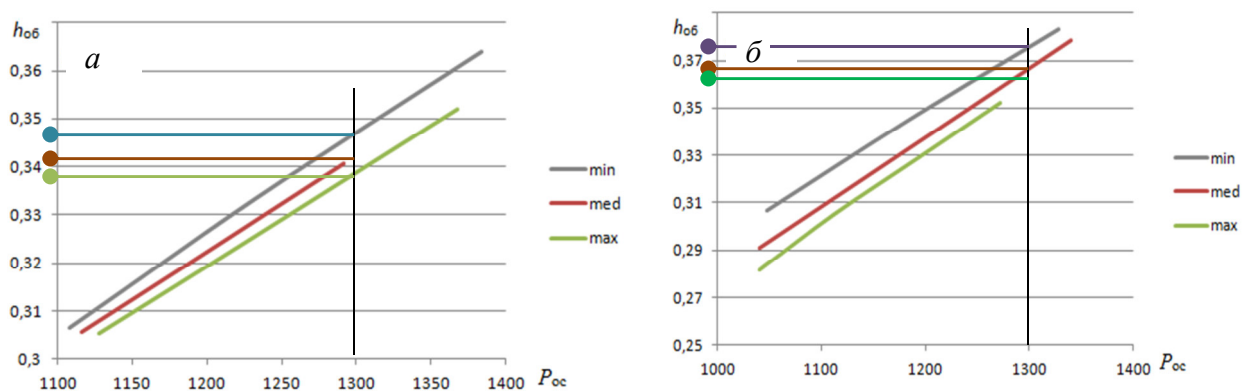


Рис. 3.21. Графические зависимости величины углубления за один оборот (мм/оборот) от осевой нагрузки (даН), частоты вращения снаряда (min – 435; med – 572,5; max – 710 мин⁻¹): a – бурение с промывкой водой; b – бурении с промывкой ПАВ

усилия при разрушении долерита возрастает. При этом выше энергоёмкость бурения при использовании эмульсии (в среднем на 2,2 %).

На рис. 3.20, *а, б* представлены графические интерпретации уравнений механической скорости бурения долерита (3.34) и (3.38), которые показывают основные тенденции в изменении темпа бурения в зависимости от параметров режима бурения – осевой нагрузки и частоты вращения.

На рис. 3.21, *а, б* даны графики, показывающие изменение углубления за один оборот от осевого усилия при трех различных значениях частоты вращения.

Из графиков следует, что углубление увеличивается по мере повышения осевого усилия, а максимальная величина углубления достигается при минимальном значении частоты вращения, как при бурении с водой, так и при бурении с водой и добавлением ПАВ. Это характеризует процесс разрушения при бурении как объемное разрушение, при котором по мере роста частоты вращения нарастает сопротивление, как горной породы, так и сопротивление среды [38].

Это подтверждает теоретические выводы диссертационного исследования.

При этом углубление при использовании в качестве промывочной жидкости воды с ПАВ

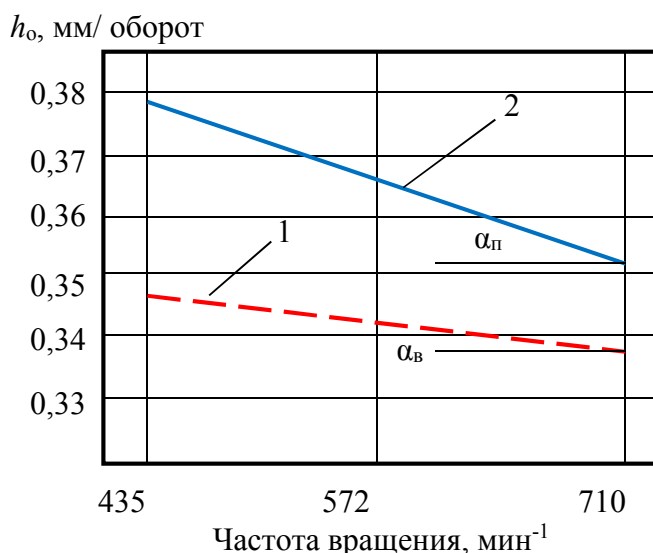


Рис. 3.22. Графическая зависимость углубления за один оборот от частоты вращения при осевой нагрузке 1300 даН при бурении импрегнированной коронкой долерита: 1 – при бурении водой; 2 – при бурении водой с ПАВ

существенно выше, в сравнении с углублением при промывке забоя водой. Этот факт указывает на то, что при использовании воды с ПАВ достигается более активное проникновение буровой жидкости в трещины зоны разрушения горной породы и микротрещины зоны предразрушения

горной породы, что приводит к снижению твердости горной породы.

На рис. 3.22 приведены графические зависимости, полученные с графиков на рис. 3.21 при осевой нагрузке на коронку равную 1300 даН. Представленные зависимости показывают, что при объемном разрушении горной породы алмазными резцами по мере роста частоты вращения углубление за один оборот снижается, причем более активно при бурении с применением в качестве добавки в техническую воду ПАВ, что четко показывает угол наклона линий 1 и 2. Линия 2 наклонена с большим углом $\alpha_{\text{п}}$, чем линия 1, имеющая угол наклона $\alpha_{\text{в}}$.

В данном случае, очевидно, что более резкое снижение углубления за один оборот при бурении технической водой с ПАВ связано с более значительной величиной углубления резцов и более существенным ростом сопротивлений, как со стороны горной породы, так и со стороны среды, т.е. бурового раствора насыщенного шламом. Плотность самого бурового раствора в этих случаях была одинаковой. При этом учитывая, что рост глубины внедрения резцов в породу сказывается именно на сопротивлении резанию-скалыванию породы, следует отметить возрастающую роль именно этого вида сопротивления работе бурового инструмента.

Данный вывод также подтверждает основные положения теоретической части диссертационного исследования.

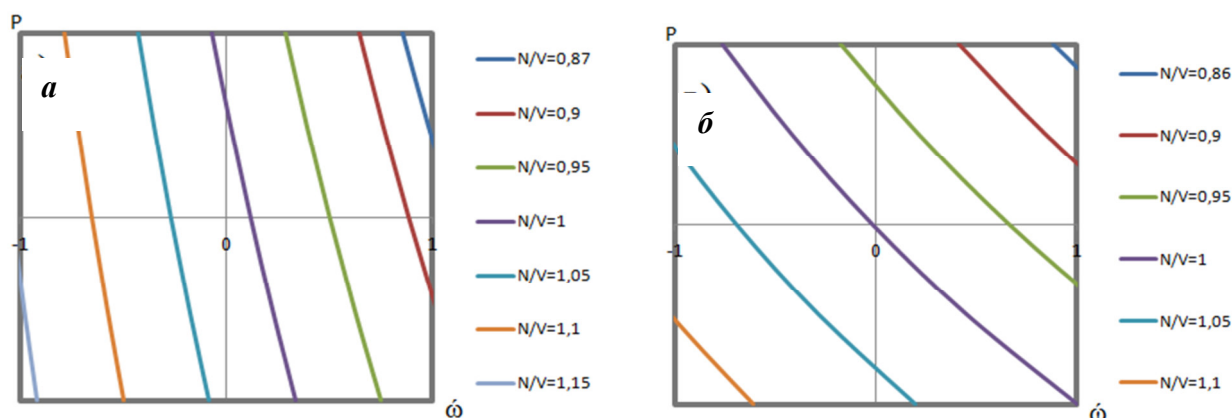


Рис. 3.23. Графическая интерпретация моделей энергоёмкости процесса бурения (углубка за один оборот) при: *а*– бурение с промывкой водой; *б* – бурение с промывкой ПАВ

На рис. 3.23. представлена графическая интерпретация моделей (3.37) и (3.41), отражающих влияние энергоёмкости разрушения горной породы при

бурении импрегнированной коронкой долерита с применением в качестве очистного агента воды (рис. 3.23, *а*) и воды с добавлением ПАВ (рис. 3.23, *б*).

Полученные результаты достаточно интересны тем, что максимальные значения параметров режима бурения не дают повышения энергоемкости, а значит, могут повышаться без ущерба для ресурса бурового инструмента.

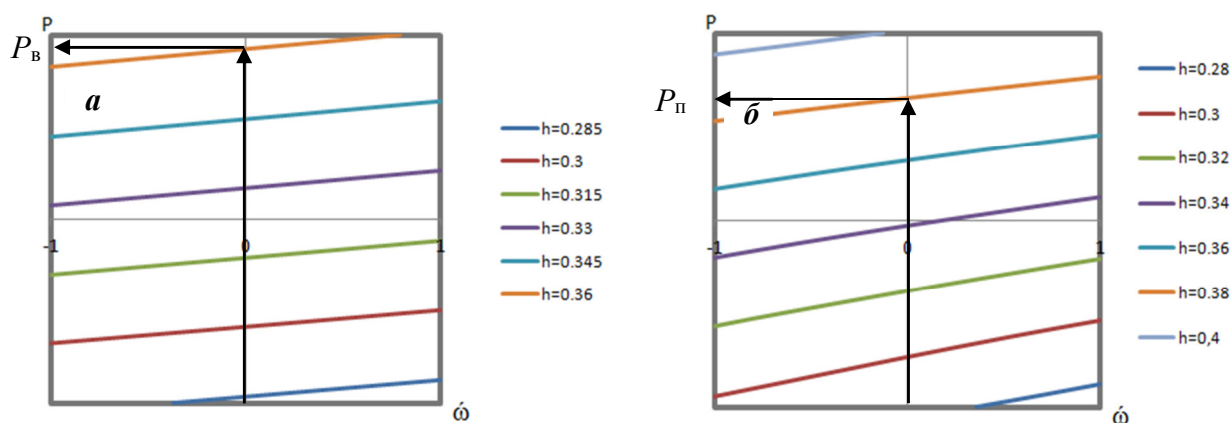


Рис. 3.24. Графическая интерпретация моделей углубления за оборот при:
– бурении с промывкой водой; *б* – бурении с промывкой ПАВ

На рис. 3.24 представлена графическая интерпретация моделей (3.35) и (3.39) углубления за один оборот бурового инструмента на забое при бурении долерита с промывкой водой (рис. 3.24, *а*) и водой с добавлением ПАВ.

Полученные графики показывают четкую связь между значениями частоты вращения ω и осевой нагрузкой P при которых достигается заданная величина углубления за один оборот бурового инструмента на забое скважины.

Как следует из работы [39], если математическую модель углубления за один оборот представить в общем виде, так как это дано в уравнениях (3.34), (3.38), то выражение для расчета осевого усилия $P_{ос}$ при заданном углублении за один оборот $h_{об}$ будет выглядеть следующим образом:

$$P_{ос} = \frac{h_{об} - A - C \cdot \omega}{B + D \cdot \omega}, \quad (3.42)$$

где A , B , C , D – числовые коэффициенты из моделей механической скорости бурения. В нашем случае, моделей (3.34) и (3.38).

Таким образом, выбирая величину частоты вращения ω при заданной величине углубления за один оборот $h_{об}$, можно определить соответствующую этому заданному углублению и выбранной частоте вращения величину оптимальной осевой нагрузки.

Для нашего случая, если мы ограничили величину углубления за один оборот величиной 0,36 мм/оборот для бурения с водой и 0,38 мм/оборот при бурении водой с добавлением ПАВ (см. рис. 3.24, а, б), поскольку по данным энергоемкости это не приведет к повышенному изнашиванию бурового инструмента, то при частоте вращения 572, 5 мин⁻¹ при бурении водой потребуются осевая нагрузка P_v , а при бурении водой с добавлением ПАВ $P_{п.}$.

Аналитически это решение будет выглядеть следующим образом.

Для случая бурения с водой, учитывая, что частота вращения в кодовом обозначении равно нулю, получим

$$P = \frac{0,36-0,32-0,009 \cdot 0}{0,04+0,0003 \cdot 0} = \frac{0,36-0,32}{0,04} = \frac{0,04}{0,04} = 1,$$

что в натуральном значении соответствует значению 1400 даН.

Для случая бурения с водой и с добавлением ПАВ, учитывая, что частота вращения в кодовом обозначении также равна нулю, получим

$$P = \frac{0,38-0,34-0,009 \cdot 0}{0,057+0,0003 \cdot 0} = \frac{0,38-0,34}{0,057} = \frac{0,04}{0,057} = 0,7,$$

что в натуральном значении соответствует значению 1270 даН.

Это же решение представлено и на графиках на рис. 3.24, а, б.

Изменение частоты вращения, например, её рост, позволят определить и соответствующее этим значениям частоты вращения, величину осевой нагрузки, определяющие заданные величины углубления за один оборот коронки на забое скважины.

Расчеты показали, что при бурении с водой с добавлением ПАВ осевая нагрузка для рационального и более производительного бурения будет ниже на 130 даН, при этом механическая скорость бурения будет равна 13,05 м/ч, а при бурении с водой при рациональном углублении за один оборот 0,36 мм/оборот механическая скорость составит 12,37 м/ч. При этом при бурении с применением ПАВ будет несколько ниже энергоемкость (см. рис. 3.23, а, б) – 0,9 против 1,0 кВт·ч/м, а значит, и ресурс инструмента будет выше примерно на 10%.

Таблица 3.4

Сочетания выбранных параметров при различных режимах бурения коронкой с резцами *PDC* мрамора

Параметры	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4
Осевая нагрузка, даН	400	800	400	800
Частота вращения, мин ⁻¹	50	50	200	200

Экспериментальные данные бурения мрамора коронкой с резцами *PDC* диаметром 76,2 мм осуществлялось при следующих параметрах режима бурения (табл.3.4)

В результате бурения по плану эксперимента получены следующие модели, отражающие процесс бурения с различных позиций, учитывающих как темп проходки и ресурс инструмента, так и величину углубления за один оборот – важнейший параметр управления бурением.

$$v_M = 5,84 + 4,53 P_{oc} + 3,15 \omega + 2,4 P_{oc} \omega, \quad (3.43)$$

$$h_o = 0,82 + 0,63 P_{oc} - 0,07 \omega - 0,05 P_{oc} \omega, \quad (3.44)$$

$$N = 10,04 + 8,38 P_{oc} + 3,66 \omega + 2,53 P_{oc} \omega. \quad (3.45)$$

$$N/v_M = 1,8 + 0,3 P_{oc} - 0,23 \omega - 0,306 P_{oc} \omega. \quad (3.46)$$

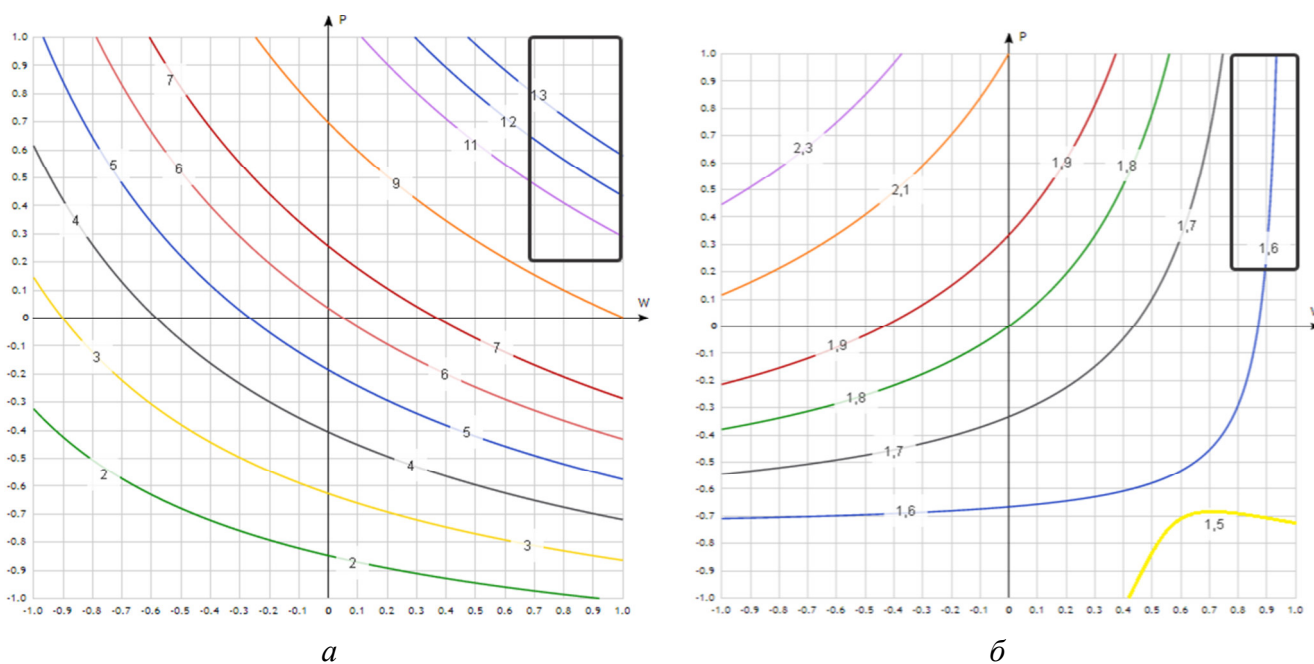


Рис. 3.25. Графическая интерпретация моделей механической скорости бурения (а) и энергоёмкости бурения (б)

На рис. 3.25, а, б показана графическая интерпретация моделей механической скорости бурения (3.43) и энергоёмкости разрушения горной породы при бурении (3.46) в пределах использованных при проведении эксперимента осевой нагрузки P и частоты вращения ω . На графиках выделены области наиболее благоприятной области как, с точки зрения достижения максимальной скорости проходки (рис. 3.25, а), так и близкого к

максимальному ресурсу бурового инструмента (3.25, б), который соответствует минимальной, в пределах эксперимента, энергоемкости.

На рис. 3.26 показана графическая интерпретация модели углубления за один оборот (3.44). Рациональная область управления режимами бурения, выявленная с помощью графиков на рис. 3.25, показывает, что эффективным

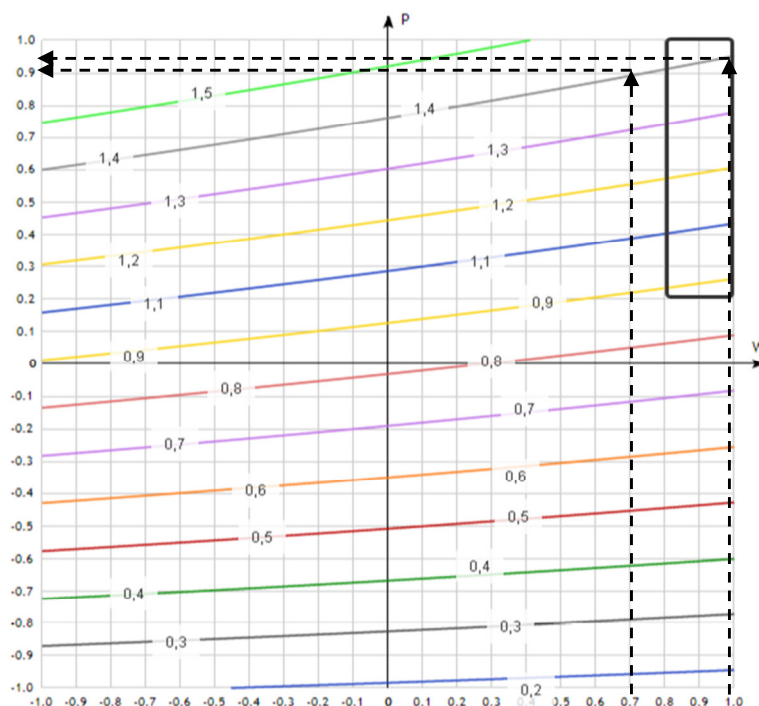


Рис. 3.26. Графическая интерпретация модели углубления за один оборот инструмента на забое

будет углубление на уровне 1,3–1,4 мм/оборот, что обеспечит практически самую высокую, в пределах рамок опыта, механическую скорость бурения.

Режим управления оптимальным бурением предполагает поддержание частоты вращения в определенном пределе, которому соответствуют значения осевой нагрузки (рис. 3.26).

Обработка полученных данных, в частности графиков механической скорости бурения, в соответствии с используемой методикой, позволяет получить графические зависимости углубки за один оборот от величины осевого усилия (рис. 3.27) и частоты вращения (рис. 3.28).

Первые зависимости, представленные на рис. 3.27 получены по графикам механической скорости бурения (рис. 3.25, а). Эти данные показывают, что с повышением осевой нагрузки повышается и углубление за один оборот, при этом максимальная величина углубления соответствует наименьшему значению частоты вращения (50 мин^{-1}). Данное обстоятельство

указывает на то, что механизм разрушения горной породы соответствует объемному разрушению [38, 39].

При этом, как следует из полученных данных, объемное разрушение наступило при осевой нагрузке 420 даН, ранее режим разрушения соответствовал усталостно-поверхностному механизму разрушения горной породы [38,39].

Графики на рис. 3.27 позволяют определить зависимость углубления за один оборот от частоты вращения при различных значениях осевого усилия. На рис. 3.28 представлены графики показывающие зависимость величины углубления за один оборот от частоты вращения при значениях осевой нагрузки 600, 750 и 800 даН. Эти данные показывают снижение углубления за один оборот по мере повышения частоты вращения, что указывает на рост сопротивлений со стороны горной породы и среды по мере роста линейной

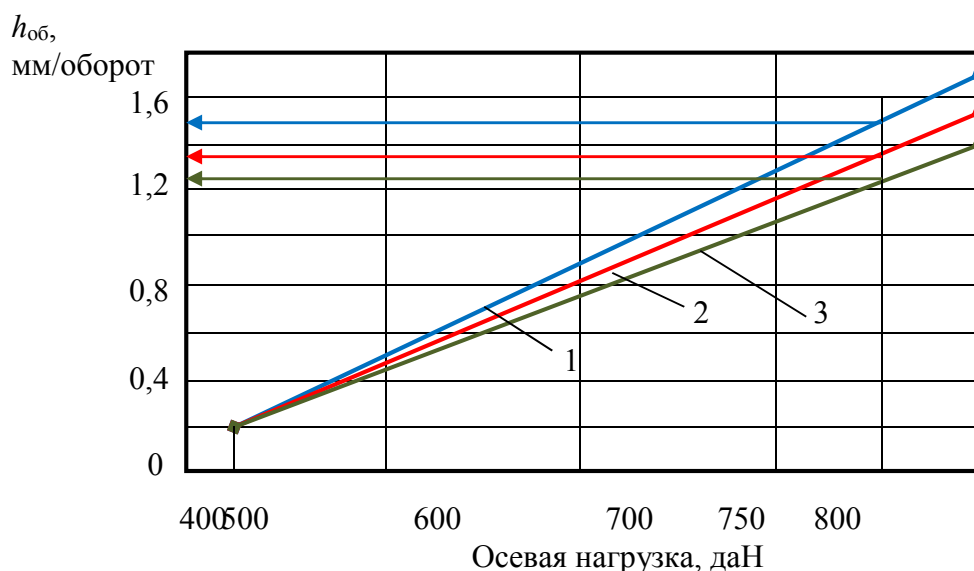


Рис.3.27. Зависимость углубления за один оборот от осевой нагрузки при различных значениях частоты вращения бурового инструмента: 1 – максимальная частота вращения – 200 мин⁻¹; 2 –средняя частота вращения – 125 мин⁻¹; 3 –минимальная частота вращения – 50 мин⁻¹

скорости резания-скалывания горной породы. При этом темп снижения глубины резания-скалывания горной породы повышается при повышении осевого усилия и соответственно глубины внедрения резцов в горную породу.

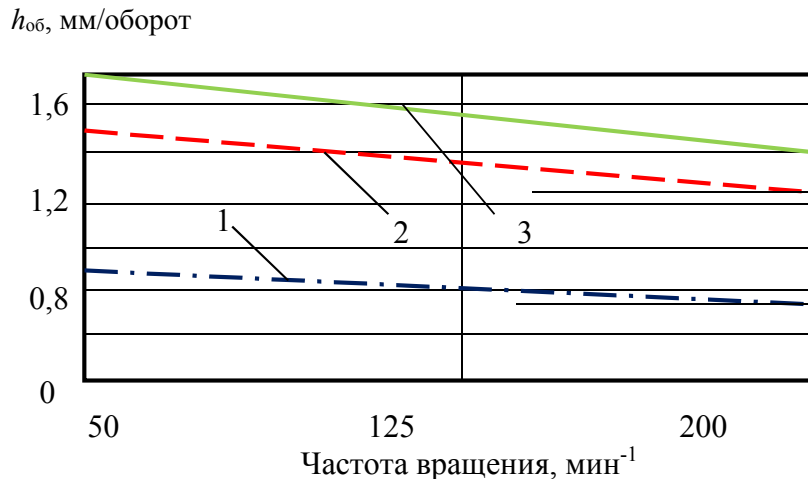


Рис. 3.28. Зависимость углубления за один оборот от частоты вращения бурового инструмента: 1 – осевая нагрузка 600 даН; 2 – осевая нагрузка 750 даН; 3 – осевая нагрузка 800 даН

Представленные результаты обработки данных экспериментального бурения показывают, что полученные теоретические зависимости получили подтверждение.

Основные выводы по результатам исследований, представленных в третьей главе.

1. Место наиболее интенсивного изнашивания долот с резцами *PDC* на торце определено на расстоянии около 0,8 радиуса долота r и с большой долей вероятности связано с нарастающей от оси долота к внешнему радиусу долота линейной скоростью перемещения резцов долота, поскольку этот параметр оказывает системное влияние на процесс работы долота и объективно определяется зависимостью $2\pi\omega r$, где ω – частота вращения долота, а r – радиус торца долота. При этом несколько меньший износ резцов расположенных на самом внешнем радиусе долота $((0,8-1,0) \cdot r)$, не смотря на самые высокие значения линейных скоростей в данной части торца, определяется более значительным и плотным размещением вооружения долота по внешнему радиусу долота.

2. Учитывая вышеизложенное, можно утверждать, что при проектировании долот с резцами *PDC* следует в более полном объеме учитывать особенности динамических процессов при работе долот, а именно особенности механизма разрушения горных пород в динамическом режиме с учетом величины линейной скорости перемещения резцов по забою, имея в виду, что для резцов расположенных в различных частях торца линейная

скорость перемещения будет различной.

3. Линейная скорость перемещения резцов по забою в зависимости от механизма разрушения горной породы, который принято разделять на усталостно-поверхностное и объемное, различным образом влияет на величину углубления резцов бурового инструмента в горную породу:

- при усталостно-поверхностном разрушении углубление в породу по мере роста линейной скорости резцов (рост частоты вращения) увеличивается;
- при объемном разрушении углубление в породу по мере роста линейной скорости резцов (рост частоты вращения) снижается.

При этом темп снижения углубления при объемном разрушении характеризует рост сил сопротивления со стороны горной породы и среды (промывочной жидкости насыщенной шламом и разрушенной, но не удаленной из зоны разрушения горной породы).

4. Установлено, что сопротивление горной породы и среды зависят от линейной скорости резца в квадратичной зависимости, глубины резания-скалывания, таких параметров установки резцов на торце долота как передний угол резца γ_p , фронтальный угол резания-скалывания φ_p , диаметра резца d и физико-механических свойств горной породы, таких как предел прочности на скалывание $\sigma_{ск}$ и коэффициент внутреннего трения $tg\varphi$ и достигает существенных значений, без учёта которых сложно произвести проектирование вооружения долота без значительных издержек [32].

5. Для создания условий для более равномерного изнашивания резцов на торце долота целесообразно практиковать установку резцов со значениями переднего угла и фронтального угла резания-скалывания, диаметра резцов, обеспечивающих равную глубину резания-скалывания с учётом величины линейной скорости перемещения резца по забою.

6. Рациональная глубина резания-скалывания горной породы резцами долота позволяет производить отработку долот по заданной величине углубления за один оборот, которая определяется на основе глубины резания-скалывания горной породы резцами и числом резцов в линии резания-скалывания. При этом важным является поддержание величины углубления на заданном уровне путем варьирования параметрами режима бурения в соответствии с рассчитываемыми аналитическими и эмпирическими моделями. В данном случае появляется возможность проектирования

оптимальной скорости бурения долотом с учетом того, что этот параметр рассчитывается по зависимости: $v_m = h \cdot n_p \cdot \omega$, где h – глубина резания-скалывания горной породы резцами; n_p – число резцов линии резания; ω – частота вращения долота.

7. Оптимальное регулирование параметрами режима бурения целесообразно производить в соответствии с оценкой трех основных критериев, которые позволяют рассчитывать в режиме текущего времени механическую скорость проходки, энергоемкость бурения и углубление за один оборот.

Два первых критерия позволяют выбрать наиболее рациональную область управления режима бурения, ориентируясь на высокие темп проходки (v_m) и ресурс бурового инструмента по критерию энергоемкости (N/v_m , где N – забойная мощность).

Критерий углубления за один оборот (h_o) позволяет определить наиболее верные соотношения между величинами частоты вращения и осевого усилия при заданной величине углубления за один оборот.

Подобный режим управления возможен при реализации управления процесса бурения с применением современных электронных систем и компьютеров, забойных телеметрических систем.

8. Разработанные теоретические модели расчета глубины резания-скалывания горной породы с учетом влияния сопротивления горной породы и среды могут использоваться при проектировании бурового инструмента и дополнить известные методики компьютерного моделирования с целью создания бурового инструмента с резцами *PDC*, обладающего высокими эксплуатационными характеристиками.

4. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДОЛОТ С РЕЗЦАМИ *PDC* С УЧЕТОМ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ-СКАЛЫВАНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ И СОПРОТИВЛЕНИЕ СРЕДЫ

4.1. Методика проектирования долот с резцами *PDC*

Рассмотренные ранее положения теории резания горной породы резцами *PDC* с учетом влияния среды позволили выделить ряд зависимостей, которые могут быть положено в основу методики проектирования долот отличающихся более значительным запасом стойкости к изнашиванию и поломкам вследствие неравенства сопротивлений резанию скалыванию в различных частях торцевой части инструмента [16].

В частности это полученная аналитически зависимость (3.27) расчета глубины резания-скалывания горной породы с учетом коэффициента K позволяет определить позиции методики определения рациональной схемы расстановки резцов *PDC* в долоте.

С учетом, нами определенного, значения K формула расчета глубины резания-скалывания горной породы резцом *PDC*, выглядит следующим образом

$$h = \sqrt[2]{\left\{ \frac{[(P - A \sin \gamma_{\pi})(1 - f \operatorname{tg} \gamma_{\pi}) - A \operatorname{tg} \gamma_{\pi}] \sin \gamma_{\text{СК}}}{\pi K \sigma_{\text{СК}} \sqrt{d} \operatorname{tg} \gamma_{\pi} \cos \varphi_{\text{p}} (1 + \operatorname{tg} \varphi)} \right\}^3},$$

где $A = 0,125 v_{\text{p}}^2 \rho_{\text{c}} \pi d^2 C_{\text{c}} \cos \gamma_{\pi}$;

$$K = \frac{R_{\text{BT}}}{R_{\text{BH}}},$$

$$R_{\text{BT}} = \operatorname{tg} \beta x;$$

R_{BT} — усилие сопротивления, соответствующее значению линейной скорости резца (расстояние x на рис. 2.8);

R_{BH} — усилие сопротивления, соответствующее линейной скорости, близкой к нулевому значению (рис. 2.8).

β — угол наклона опытной кривой, которую можно получить при испытании предела прочности на скалывание определенной горной породы (угол наклона графика на рис. 2.8);

x – текущее относительное значение расстояния от центра торца долота до точки в которой происходит определение R_v (рис. 2.8).

Существо методики проектирования вооружения долота с резцами *PDC* включает следующие этапы.

1. Анализ условий применения долота, включающий диаметр долота, назначение долота, типы горных пород, их прочностные характеристики, а именно такие нужные параметры как предел прочности на скалывание $\sigma_{ск}$ горной породы.

В этом случае для расчетов при проектировании долота, с целью определения параметров упрочнения могут использоваться известные из справочников значения предела прочности на растяжения горной породы σ_p . При их отсутствии будет достаточно иметь значение предела прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ (ГОСТ 21153.2-84), по которому можно судить и о σ_p , поскольку известно, что соотношение $\sigma_{сж}/\sigma_p = 10-15$ для основной группы пород осадочного комплекса [58]. Указывается ориентировочное значение плотности горных пород, для бурения которых предназначено долото и плотность бурового раствора, который будет использован.

2. Одним из параметров технологии бурения выбираются частота вращения и осевая нагрузка, рекомендуемые для реализации в качестве параметров технологии.

3. На следующем этапе проектирования долота выбираются такие общие параметры как число лопастей долота, число линий резания горной породы (один, два или три) и соответственно предварительное число резцов *PDC*.

4. Выбирается диаметр резцов *PDC*. В данном случае размер резцов связан с твердостью горной породы, для которой предназначено долото, и диаметр резцов может быть в диапазоне 10 – 20 мм. При этом больший размер предназначен для более мягких горных пород.

5. Производится расчет глубины внедрения резцов в статике, т.е. без учёта динамической составляющей. В данном случае, учитывая, что резцы, располагаемые вблизи центральной точки торца долота имеют практически нулевую линейную скорость, рассчитанная величина глубины резания-скалыванию соответствует при реальном бурении именно глубине резания-скалывания именно этими центральными резцами.

Расчет глубины-резания скалыванию можно производить по формуле

(3.27), полученной аналитически в диссертации, с учетом таких поправок, как равенство нулю линейной скорости перемещения резца, равенство $K=1$. С учетом данных вводных формула (3.27) будет выглядеть следующим образом:

$$h = \sqrt[2]{\left\{ \frac{P(1 - \text{tg}\gamma_{\text{п}}) \sin\gamma_{\text{ск}}}{\pi\sigma_{\text{ск}}\sqrt{d}\text{tg}\gamma_{\text{п}}\cos\varphi_{\text{р}}(1 + \text{tg}\varphi)} \right\}^3}. \quad (1.1)$$

Значение осевой нагрузки P на резец рассчитывается из зависимости

$$P = \frac{P_{\text{ос}}}{N},$$

где $P_{\text{ос}}$ – проектная нагрузка на долото, кН;

N – число резцов PDC на торце долота.

Рассчитанный параметр h является той величиной глубины резания скалывания горной породы, который может рекомендоваться для всех резцов долота.

Исходя из полученного значения h может прогнозироваться величина углубления за один оборот $h_{\text{об}} = h \cdot n$, где n – число линий резания, предусмотренных в долоте.

Прогнозируемую механическую скорость соответственно можно определить по формуле $v_{\text{б}} = h \cdot n \cdot \omega$.

Если число линий резания равно единица, как чаще всего бывает в долотах для бурения мягких горных и горных пород средней твердости, то углубление за один оборот $h_{\text{об}}$ равно глубине резания-скалывания горной породы h .

6. После определения глубины резания-скалывания горной породы h производится раскладка резцов в линии резания с учетом глубины резания-скалывания (рис. 4.1).

При расстановке резцов учитывается заданная глубина резания-скалывания h , которая учитывается при перекрытии плоскости резания скалывания породы. Также в раскладке нужно учитывать, что резцы, установленные с фронтальным углом резания-скалывания, превышающего нулевое значение позволяют в фронтальном плане разместить большее число резцов, усиливая таким образом защищенность периферийной области торца долота.

Если произвести расчет длины АВ (рис.4.1), то с помощью формулы

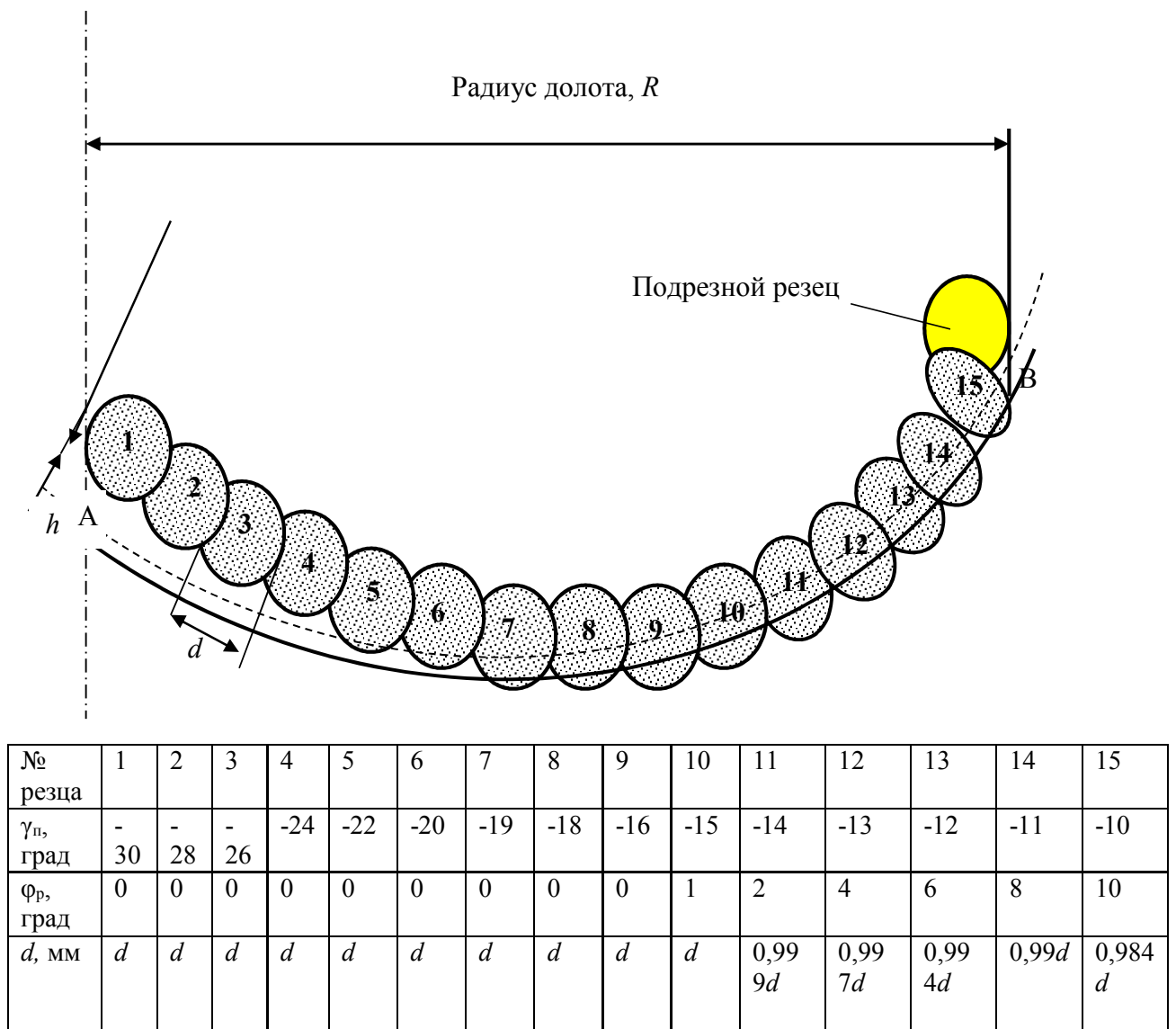


Рис. 4.1. Схема раскладки резцов PDC по линии резания-скалывания: h – заданная глубина резания-скалывания горной породы; d – поперечный размер резца в раскладке с учетом фронтального угла резания-скалывания φ_p

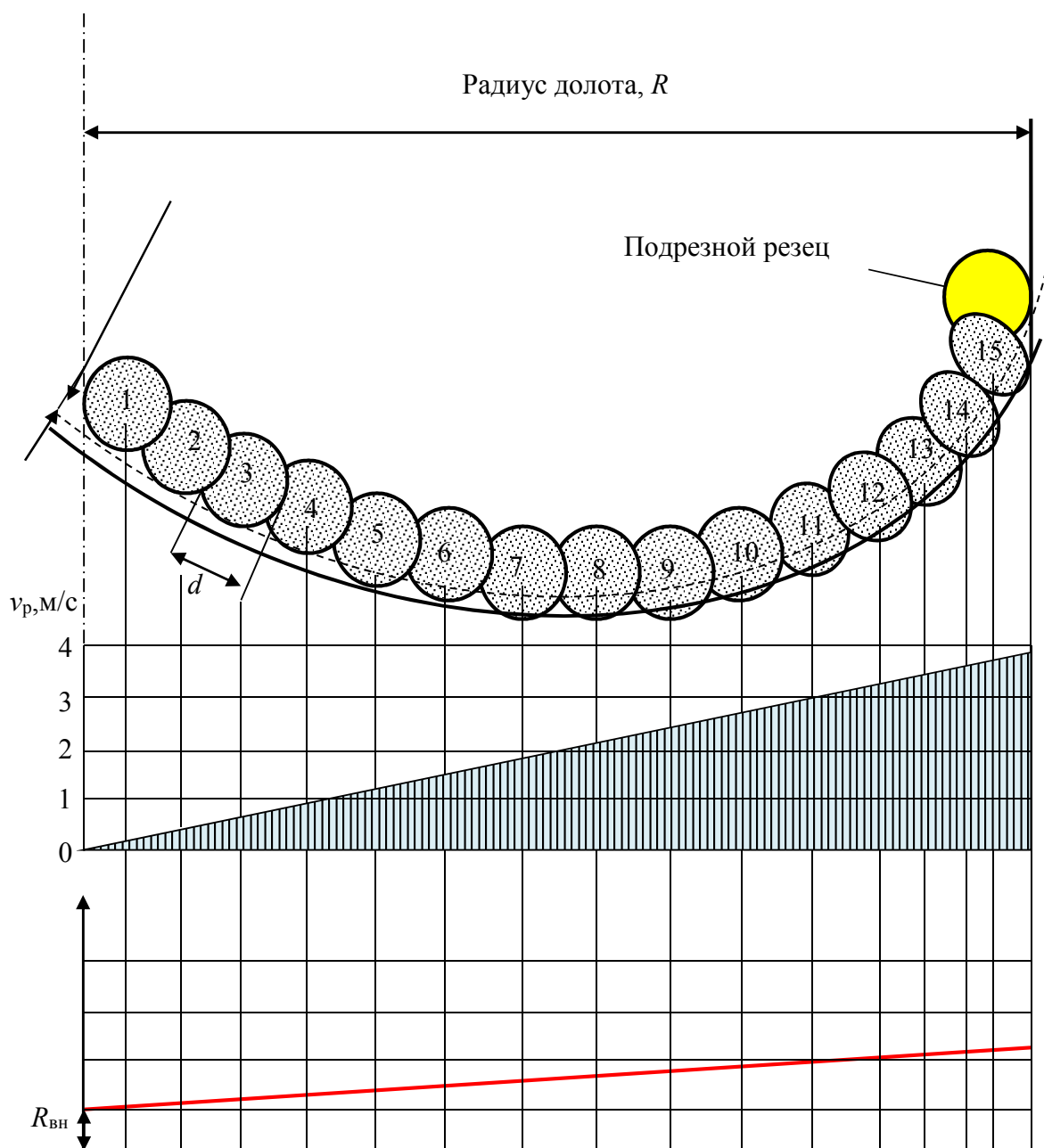
$$k = \frac{AB}{2\sqrt{hd-h^2}}$$

можно определить число резцов в линии резания с учетом глубины резания-скалывания h и диаметра резца d . При этом следует сделать корректировку с учетом изменения фронтального угла резания-скалывания φ_p . Более подробная запись выражения для расчета числа резцов будет выглядеть следующим образом:

$$AB = 2\sqrt{hd-h^2}k + \sum_{m=1}^i 2\sqrt{hd-h^2}\cos\varphi_{pi},$$

где k – число резцов с фронтальным углом резания-скалывания φ_p равным нулю и m – число резцов с фронтальным углом φ_p больше нуля.

7. Важными параметрами при расчетах являются угол внутреннего трения в деформируемых слоях горной породы φ и угол скалывания горной породы. Указанные параметры могут определяться ориентировочно на основании справочных данных и классических источников информации [60]



№ резца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$v_p, \text{м/с}$	0,2	0,4	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,2	2,4	2,7	3,0	3,3	3,5	3,6	3,7
$R_{\text{вн}}$	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	1,9	1,95	2,0	2,1	2,2	2,3
$K = \frac{R_{\text{вн}}}{R}$	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	1,9	1,95	2,0	2,1	2,2	2,3

Рис. 4.2. Графическое решение определения значений линейных скоростей перемещения резцов на торце долота и коэффициента сопротивления резанию-скалыванию горной породы K

8. Рассчитывается изменение линейной скорости перемещения резцов по формуле $v_p = 2\pi \cdot r \cdot \omega$,

где r – радиус долота, м; ω – частота вращения долота, мин^{-1} .

Линейные скорости v_p рассчитываются для каждого резца для того, чтобы в соответствии с графиком, отражающим связь линейной скорости с динамической составляющей сопротивления резания скалывания горной породы, примером которого является график на рис. 3.14, определить коэффициент K в формуле (3.27).

Например, для случая, представленного на рис. 4.1, можно рассчитать величины линейных скоростей при заданной частоте вращения долота. Учитывая сложную геометрию торца долота и возможные вариации с раскладкой резцов, данную работу лучше выполнить графически, совмещая схему расстановки резцов с графиком линейных скоростей (рис. 4.2). В этом случае необходимо графические объекты выполнять с соблюдением масштаба размеров.

Так совмещая график линейной скорости v_p , выполненный в масштабе радиуса торца долота, с графической раскладкой резцов в линии резания можно точно определить значения линейных скоростей опустив вертикальные линии из центров резцов на график линейной скорости.

Далее потребуется график зависимости реакции сопротивления R_v , аналогичный графику на рис. 3.14. Данный график может быть получен только экспериментально, путем измерения сопротивления при резании единичным резцом по поверхности соответствующей горной породы. Горная порода должна соответствовать по параметрам горной породе, для бурения которой создается модель долота.

По графику реакции сопротивления R_v определяется коэффициент K , который следует ввести в формулу (3.27) при расчете глубине резания-скалывания горной породы с целью подбора значений переднего угла γ_n и фронтального угла резания-скалывания горной породы φ_p .

9. С учетом полученных значений линейных скоростей для различных резцов на торце долота рассчитывается параметр $A = 0,125 v_p^2 \rho_c \pi d^2 C_c \cos \gamma_n$ из значения коэффициента K , участвующих в определении глубины резания каждым из резцов в линии резания.

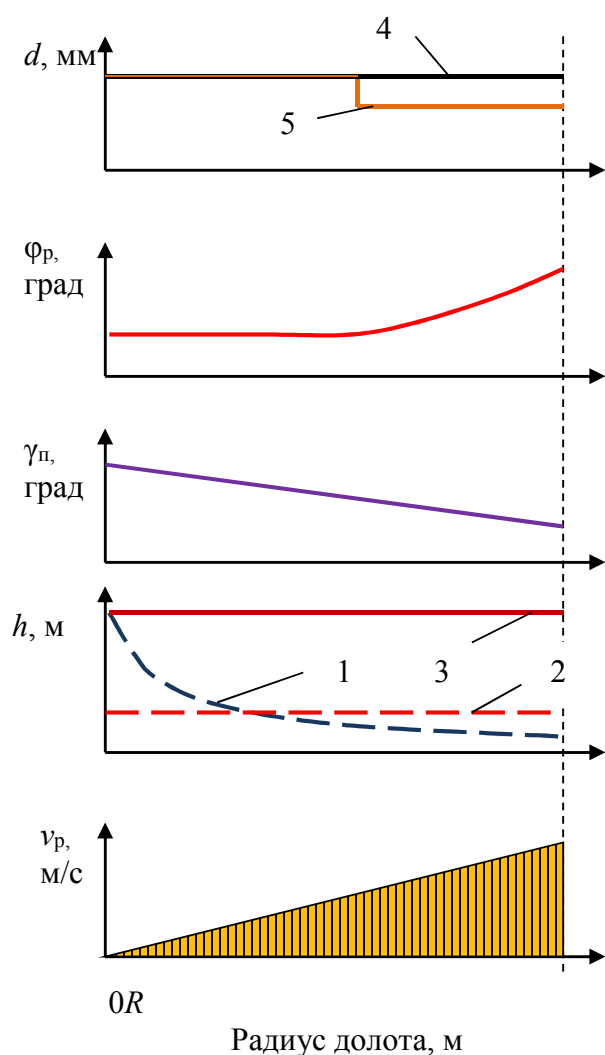


Рис. 4.3. Графические зависимости, показывающие возможную связь параметров установки резцов *PDC* с линейной скоростью перемещения резцов по забою $v_p:h$ – глубина резания-скалывания горной породы: 1,2 – при неизменных значениях переднего угла γ_p , фронтального угла ϕ_p и диаметра резцов d ; 3 – глубина резания-скалывания породы при заданной корректировке значений γ_p , ϕ_p и d ; 4 – варианте решения задачи без изменения диаметра резцов; 5 – вариант решения задачи с изменением диаметра резцов

резания-скалывания будет равной для всех резцов, расположенных на торце долота.

В соответствии с формулой (3.27) влияние возрастающей от центра долота к его периферии линейной скорости приводит к снижению глубины-резания скалывания горной породы, если неизменными остаются такие параметры установки резцов *PDC* как передний угол установки резца γ_p , фронтальный угол резания-скалывания ϕ_p и диаметр резца d .

10. Условием равнопрочности торцевого вооружения долота является равенство глубины резания скалывания горной породы. Для выравнивания глубины резания-скалывания горной породы всеми резцами долота следует при проектировании вооружения долота оперировать такими параметрами как передний угол установки резца γ_p , фронтальный угол резания-скалывания ϕ_p и диаметр резца d . При этом целесообразно использовать два первых из них: передним углом установки резца γ_p и фронтальным углом резания-скалывания ϕ_p .

Так снижение переднего угла γ_p от начального значения, например, -25° до -15° или 10° , а увеличение фронтального угла резания-скалывания ϕ_p приводят к снижению факторов снижающих глубину резания-скалывания горной породы и глубина

На рис. 4.3 представлена планируемая связь параметров размещения резцов *PDC*, таких как передний угол установки резца γ_n , фронтальный угол резания-скалывания горной породы φ_p и диаметра резцов d с линейной скоростью перемещения резцов по забою в процессе бурения.

Как следует из представленных графиков в процессе бурения при неизменных значениях переднего угла γ_n , фронтального угла резания-скалывания φ_p и диаметра резцов d вследствие различных линейных скоростей резания-скалывания горной породы и преодоления среды резцы *PDC* испытывают различное сопротивление со стороны породы и среды и не способны реализовывать при бурении заданную высокую глубину резания-скалывания горной породы. В результате этого может устанавливаться ограниченная величина глубины резания-скалывания (линия 2 на рис. 4.2). Корректировка параметров установки резцов *PDC* способна увеличить глубину резания скалывания горной породы, обеспечив снижение сопротивления при работе резцов и за счет этого повысить эффективность работы буровых инструментов с резцами *PDC*.

11. Возвращаясь к примеру раскладки резцов, представленного на рис. 4.1, в завершении изложения методики, следует отметить, что 15 резцов из раскладки линии резания должны распределяться по лопастям с учетом их

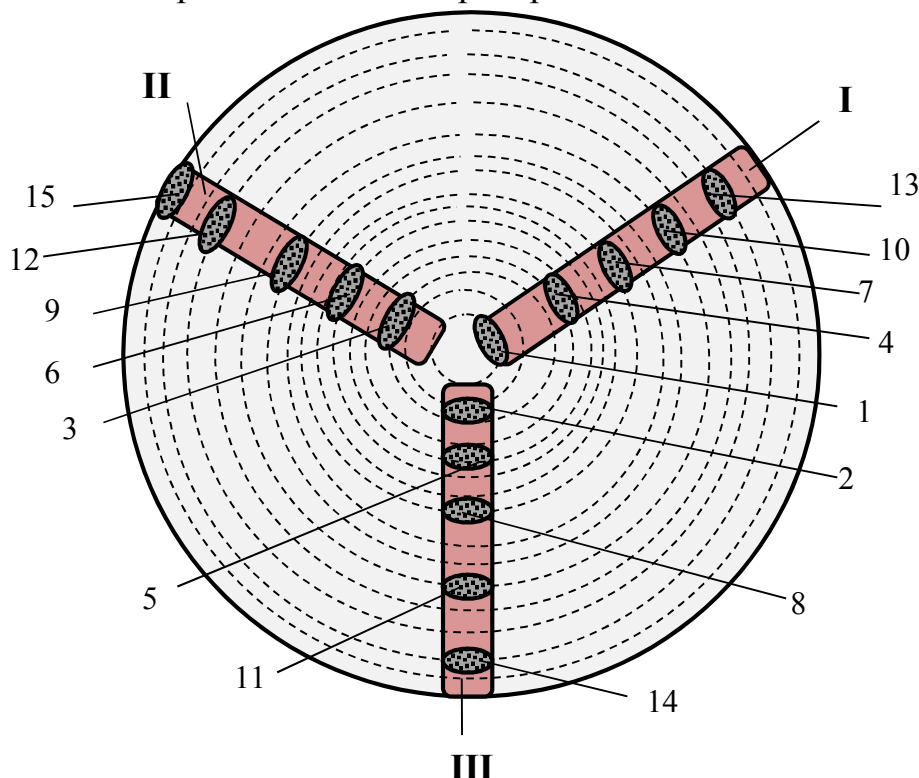


Рис. 4.4. Схема распределения резцов линии резания по лопастям: 1-15 – номера резцов *PDC* в соответствии с примером, показанном в виде схемы на рис. 4.1 и рис. 4.2; I-III – номера лопастей долота

положения в линии резания. Например, если 15 резцов распределяются по трем лопастям, то на каждой размещается по пять резцов, но строго с сохранением места в линии резания как это установлено схемой на рис. 4.1 и рис. 4.2.

Данная схема показана на рис. 4.4.

При анализе этой схемы следует учитывать, что в данном случае размещены резцы одной линии резания без установки калибрующих боковых резцов, усиливающих периметр долота, а также без размещения на торце центрального резца, решающего проблему так называемой нулевой точки.

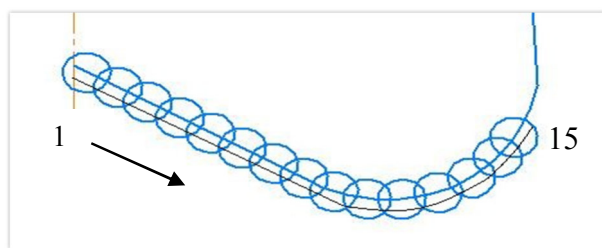


Рис. 4.5. Размещение резцов в линии резания-скалывания

Если в долоте планируется размещение второй линии резания горной породы, то сгущение резцов производится добавлением (сдвиганием) резцов на каждой траектории работы резца. Например, резец 1 на лопасти I (рис. 4.4) будет в этом случае

дублироваться резцом 1¹ на лопасти II, резец 2, резцом 2¹ на лопасти I и так далее.

Пример расчета параметров установки резцов PDC.

Долото диаметром 190,5 мм для бурения по коллектору, например, песчанику. Предел прочности на скалывание песчаника ориентировочно 5 МПа. Частота вращения долота 200 мин⁻¹.

Для конструирования выбираем четырех лопастное долото, рекомендуемое для горных пород типа МС. Диаметр резцов принят 10 мм.

Раскладка резцов показала, что будет достаточно 15 резцов в линии резания, которые будут распределены

Расчеты показывают, что максимальная линейная скорость резца на внешней кромке долота составит около 2 м/с. Размещение резцов в линии резания (рис. 4.5) позволяет определить значение линейной скорости для каждого резца. Данные о значениях линейных скоростей для каждого из резцов приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Расчетные данные распределения линейной скорости по резцам долота

№ резца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
r , мм	2,1	9,1	15,3	21,9	28,2	34,7	41,1	47,3	53,5	60,3	67,4	74,4	81,8	87,1	90,3
v_p , м/с	0,1	0,2	0,32	0,46	0,59	0,73	0,86	0,99	1,12	1,26	1,41	1,57	1,71	1,82	1,9
K	1	1,1	1,15	1,23	1,31	1,38	1,46	1,54	1,6	1,77	1,85	1,88	1,89	1,94	2,0
γ_n , град	-20	-20	-19	-19	-18	-18	-17	-17	-17	-16	-16	-16	-15	-15	-15
φ_p , град	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	6	7	8	9	10

При бурении проектируемым долот планируется глубина резания-скалывания на уровне 3 мм. Учитывая, что в данном случае проектируется долото с одной линией резания, то углубление за один оборот составит 3 мм за оборот долота на забое. Механическая скорость, для которой проектируется долото, при частоте вращения 200 мин^{-1} составит величину 36 м/ч.

4.2. Разработка долот с резцами *PDC* в рамках программы совершенствования конструкций буровых долот

По плану диссертационного исследования созданы технические решения на уровне изобретений, отличающиеся высокой эффективностью при бурении.[75]

Буровое долото [76] (патент РФ №2694872, E21B 10/43, дата регистрации 17.07.2019 г.).

Изобретение относится к области породоразрушающего инструмента для бурения скважин на твердые, жидкие и газообразные полезные ископаемые, а именно к буровым лопастным долотам, армированных алмазно-твердосплавными пластинами (АТП) или, как принято обозначать за рубежом – *PDC*.

При создании долота рассмотрена известная конструкция долота (патент WO2008/100455, опубликовано 21.08.2008, МПК E21B47/12; E21B47/26), содержащая корпус с размещенными на лопастях режущими элементами *PDC*.

Недостатком данной конструкции является отсутствие системного, схематического расположения режущих элементов *PDC* и, как результат, – низкий ресурс и недостаточная эффективность работы при бурении горных пород.

Известна конструкция долота (патент РФ на полезную модель №119012, опубликованный 10.08.2012, МПК E21B 10/43), содержащая корпус с размещенными на лопастях режущими элементами *PDC*. Недостатком этого изобретения является то, что эта конструкция представляет собой колонковую бурильную головку, а не долото, следовательно, разместить на лопастях этого устройства *PDC* по логарифмической спирали не представляется возможным вообще, из-за узкого диапазона применимости.

Наиболее близким техническим решением к предлагаемому изобретению, принятое авторами за прототип, является лопастное буровое долото, содержащее корпус с размещенными на лопастях *PDC* (патент WO2008/091654, опубликован 31.07.2008, МПК E21B47/12; E21B47/26).

Недостатками данной конструкции является то, что пластины *PDC* расположены не по логарифмической спирали в диаметральной плоскости рабочей части долота и не под отрицательным передним углом от -30 градусов до -10 градусов, а поэтому долото имеет низкий ресурс.

Цель создания изобретения по патенту РФ №2694872 [76], заключается в разработке такого бурового долота, которое одинаково хорошо разрушало бы горные породы от IV до IX категории по буримости. Таким образом решается задача повышения механической скорости по бурению горных пород, за счет повышения интенсивности выноса продуктов разрушения забоя из зон резания-скалывания, что способствует облегчению внедрения долота в забой и относительному уменьшению требуемой для эффективного бурения величины осевой нагрузки, а также снижение сопротивления горной породы и среды в процессе разрушения горной породы, что способно обеспечить более высокую стойкость бурового долота.

Поставленная задача решается за счет того, что буровое долото, включающее корпус с выполненными на нем лопастями, в которых размещены режущие пластины *PDC*, закрепленные на лопастях от центра к периферии по двум симметричным логарифмическим спиралям с отрицательными передними углами, изменяющимися от минус 30° в центре до минус 10° на периферии с интервалом один градус в виде двухзаходной «резьбы» или спирали (рис. 4.6, рис. 4.7, рис.4.8).

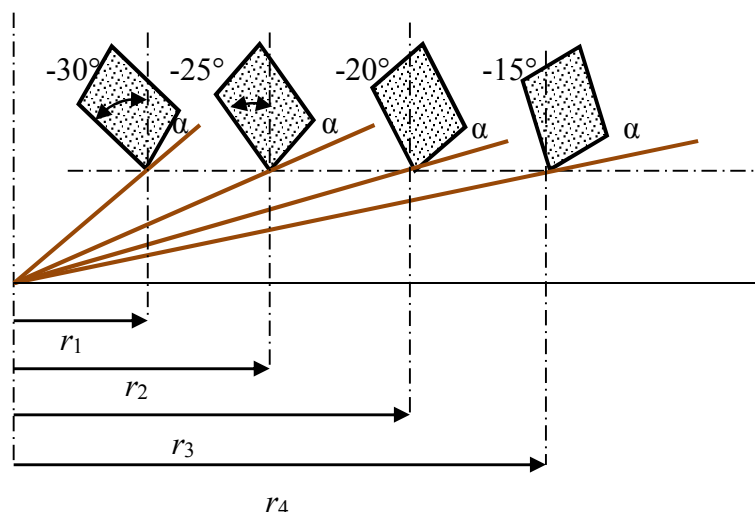


Рис. 4.6. Схема вооружения долота по патенту РФ
№ 2694872

Отличительными признаками предлагаемого изобретения от известных аналогов является то, что режущие пластины *PDC* закреплены на лопастях от центра к периферии по двум симметричным логарифмическим спиралям с отрицательными передними углами, изменяющимися от минус 30° в центре до минус 10° на периферии с интервалом один градус в виде двухзаходной «резьбы» или спирали, обеспечивающих интенсивный вынос продуктов разрушения забоя из зон резания, что способствует облегчению внедрения долота в забой и относительно уменьшению величины осевой нагрузки.

В то же время установка резцов *PDC* с уменьшением переднего угла γ_n от -30 до -10 градусов соответствует условиям сохранения заданной глубины резания скалывания горной породы в соответствии с ранее полученной и проанализированной формулой (3.27).

Установка на лопастях бурового долота в диаметральной плоскости режущих пластин *PDC* под отрицательным передним углом от минус 30 до минус 10 градусов по логарифмической спирали с двукратным и более перекрытием зоны рабочего торца инструмента значительно повышает работоспособность долота и его ресурс за счет исключения на рабочем торце не перекрытых режущими элементами зон.

Спиралевидная с логарифмической формой расстановки режущих пластин схема способствует более активному удалению продуктов разрушения из-под рабочего торца инструмента. Установка пластин *PDC* под отрицательным передним углом от -30° до -10° градусов позволяет при бурении трещиноватых горных пород, плавно заходить в линию резания,

снижая динамические нагрузки (вибрацию), что увеличивает ресурс работы. Промывочная жидкость, подаваемая на забой, под рабочий торец инструмента, попадая под наклонные плоскости пластин, при вращении инструмента, создает гидродинамический эффект. При этом промывочная жидкость под усилием, вдавливаясь в буримую горную породу разупрочняя ее, создавая обширную зону разрушения и предразрушения, увеличивая, тем самым механическую скорость бурения, эффективность и ресурс работы в перемежающихся по твердости горных породах с одновременным снижением энергоемкости процесса разрушения забоя скважины и созданием турбулентного потока на забое скважины.

Буровое долото, включает корпус 1 с выполненными на нем лопастями 2, в которых размещены режущие пластины PDC 3 закрепленные на лопастях 2 от центра к периферии по двум симметричным логарифмическим спиралям с отрицательными передними углами, изменяющимися от минус 30° в центре до минус 10° на периферии с интервалом один градус в виде двухзаходной «резьбы». В корпусе 1 для прохода промывочной жидкости выполнены отверстия 4.

Предлагаемое буровое долото работает следующим образом. Промывочная жидкость, предназначенная для охлаждения долота и транспортировки продуктов разрушения на поверхность скважины, двигаясь через вращающуюся колонну бурильных труб, корпус 1 бурового лопастного долота и отверстия 4, попадает на забой скважины. При этом за счет осевых нагрузок передаваемых долоту через колонну бурильных труб, режущие пластины PDC 3, установленные на лопастях от центра к периферии по двум симметричным логарифмическим спиралям с отрицательными передними углами, изменяющимися от минус 30° в центре до минус 10° на периферии с интервалом один градус в виде 2х заходной «резьбы», плавно заходя в линию резания, исключая динамические нагрузки (вибрацию), разрушают забой скважины при бурении трещиноватых и перемежающихся по крепости горных пород. При этом промывочная жидкость, попадая под наклонную плоскость режущих пластин PDC 3, размещенных на лопастях 2, во время вращения снаряда вдавливаясь в разрушаемую горную породу и за счет гидродинамического эффекта (отрицательный передний угол от минус 30 до минус 10 градусов создает эффект-вязкий клин, то есть разупрочняет ее,

создавая активную зону разрушения и предразрушения, снижая, тем самым, энергоемкость процесса разрушения. Своей спиралевидной формой расстановки на торце инструмента пластины *PDC* 3 активно способствует выносу продуктов разрушения из-под рабочего торца долота. Промывочная жидкость, подхватив эти продукты разрушения, транспортирует их к устью скважины через отверстие 4 на поверхность в турбулентном режиме. Турбулентный режим очистки забоя не позволяет шламу повторно попадать под резец *PDC*, что способствует увеличению механической скорости бурения.

Применение предлагаемой конструкции позволит разрушать породы от IV до IX категории по буримости и бурить в сложных геологических условиях, увеличить механическую скорость, а также повысить технико-экономические показатели [42].

Установка на лопастях бурового долота пластин *PDC* под отрицательным передним углом от минус 30° до минус 10° по логарифмической спирали в диаметральной плоскости с интервалом один градус в виде двухзаходной «резьбы», значительно повышает работоспособность долота, а также его ресурс за счет исключения не перекрытых режущими элементами зон.

Спиралевидная расстановка *PDC* способствует активному удалению продуктов разрушения из-под рабочего торца инструмента. Установка пластин с наибольшим углом в центре долота способствует плавному захождению в линию резания, снижая динамические нагрузки (вибрацию), что увеличивает ресурс работы долота. Угол установки каждой единичной пластины АТП непосредственно на лопасти показан на фиг.3 и фиг.4.

При заглублении долота за один оборот на глубину, режущие элементы, расположены на разных радиусах r , проходят путь резания по траекториям разной длины и с разными углами наклона. Поэтому для обеспечения равных условий внедрения режущих элементов в породу необходимо чтобы у каждого из резцов были одинаковые задние углы (α). Для этого необходимо, чтобы режущий элемент лопасти, расположенные на разных радиусах имели в продольной плоскости свои углы наклона. На фигуре 3 показана проекция на забой скважин режущих элементов пятилопастного долота, расставленных с

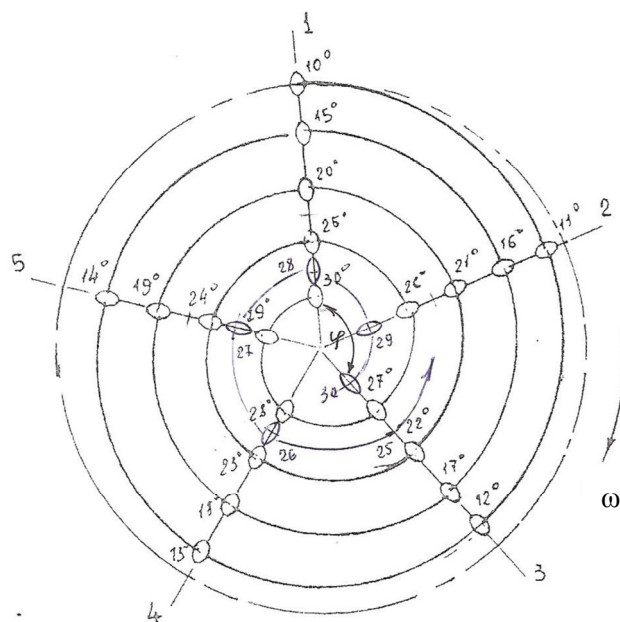


Рис. 4.7. Схема размещения резцов на торце долота (патент РФ № 2694872)

отрицательными передними углами наклона PDC от минус 30° до минус 10° по одной логарифмической спирали в диаметральной плоскости.

Расстановка режущих элементов PDC в диаметральной плоскости по логарифмической спирали обеспечивает полное покрытие забоя линиями резания и способствует созданию турбулентности бурового раствора, что улучшает качество очистки забоя скважины от выбуренной породы. Таким образом, турбулентный режим промывки образуется уже непосредственно на забое скважины, что способствует повышению механической скорости бурения.

На рис. 4.7 показано расположение режущих элементов первого ряда по спирали и начало формирования второго ряда режущих элементов с отставанием (опережением) на угол $\varphi = \frac{4\pi}{n}$ (рад) или $\varphi = 144^\circ$, где n – число режущих лопастей на долоте.

Для нормальной, (устойчивой) работы долота в каждой линии резания должно быть не менее двух режущих элементов.

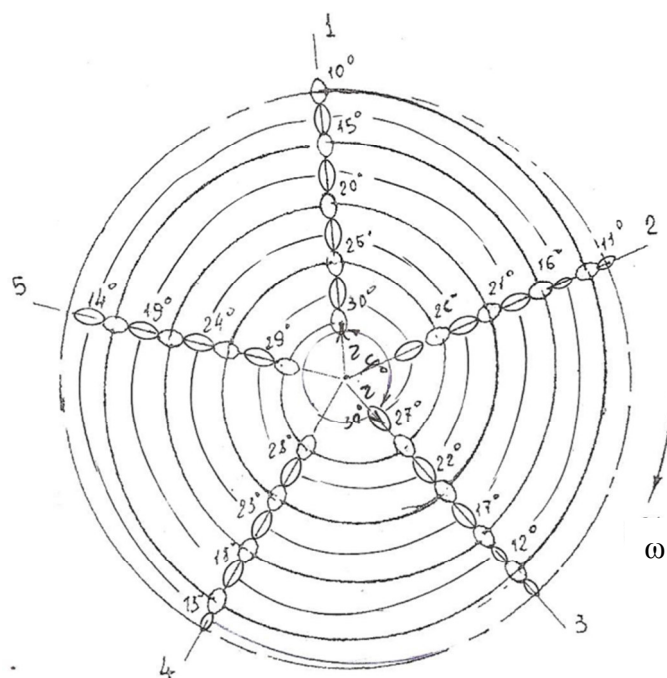


Рис. 4.8. Схема размещения резцов на торце долота п
(патент РФ № 2694872)

На рис. 4.8 показано отставание на 144° режущего элемента в линии резания радиусом z , имеющими передние углы -30° . Такое смещение режущих элементов обеспечивает сплошность разрушения забоя и вписывается в понятие двухзаходной «резьбы».

Применение предлагаемой конструкции позволит разрушать перемежающиеся по твердости горные породы от IV до IX категории по буримости и бурить в сложных условиях трещиноватости горных пород, увеличить механическую скорость бурения и ресурс работы инструмента, повысить технико-экономические показатели производства буровых работ и эффективность при бурении глубоких и сверхглубоких скважин на нефть и газ.

Для повышения надежности работы долота, забуривающие и скважинообразующие режущие элементы кратно продублированы для того, чтобы такое расположение этих резцов способствовало в процессе воздействия на горную породу ввинчиванию долота в забой, за счет чего происходило снижение осевой нагрузки.

Оценивая все выше сказанное, можно сделать вывод: предлагаемое долото по конструкции соединил в себе, в виде комбинации, все известные в мире инновационные идеи в одном изделии, следовательно, имеет более

высокий качественный показатель работы и коэффициент полезного действия, что позволит добиться увеличения механической скорости бурения горных пород.

Стабилизирующее двухъярусное долото для отбора керна

Патент РФ [77] № 2700330, Е21В 10/42, дата регистрации 16.09.2019 г.

Разработка относится к области бурения скважин долотами режущего типа и может найти применение в горнодобывающей и нефтегазовой отраслях при бурении скважин различного назначения. Двухъярусное долото режущего типа предназначено для бурения с забойным двигателем в породах выше средней крепости и крепких.

Известно многоярусное долото режущего типа (см. патент на изобретение РФ № 2310732. Многоярусное долото режущего типа. Опубликовано 20.11.2007, бюллетень №32), предназначенное для бурения скважин различного назначения в породах VI–VIII категории по буримости.

Недостатком данного бурового инструмента является отсутствие возможности отобрать керн.

Задачей изобретения является усовершенствование известного долота, придание ему дополнительной функции (возможности отбора керна). Выполняется эта задача путем замены забуривающего яруса известного стабилизирующего двухъярусного долота режущего типа на съемную буровую головку, армированную *PDC*.

Разработанное долото представлено на рис. 4.9 и рис. 4.10.

Стабилизирующее долото для отбора керна используется только в интервалах отбора керна по стволу скважины, путем замены нижнего разбуривающего яруса на бурильную головку (рис. 4.9) предназначенную для отбора керна.

Предлагаемое долото экономически эффективно так как позволяет:

- осуществлять бескерновое бурение с высоким стабилизирующим эффектом, то есть степень вертикальности будет достаточно высокая;
- отбирать керн в заданных интервалах по стволу скважины путем замены разбуривающего яруса на бурильную головку и включения колонковой трубы в состав снаряда;

- после отбора керна любым керноприемным устройством отпадает необходимость этот интервал разбуривать до проектного диаметра, так как верхний разбуривающий ярус уже сформировал требуемый диаметр;
- способствует увеличению механической скорости бурения, скорости проходки и его износостойкости;
- сбалансировать общую нагрузку на долото;
- формировать оптимальную режущую структуру долота для эффективного разрушения породы;
- увеличить динамическую стойкость долота;

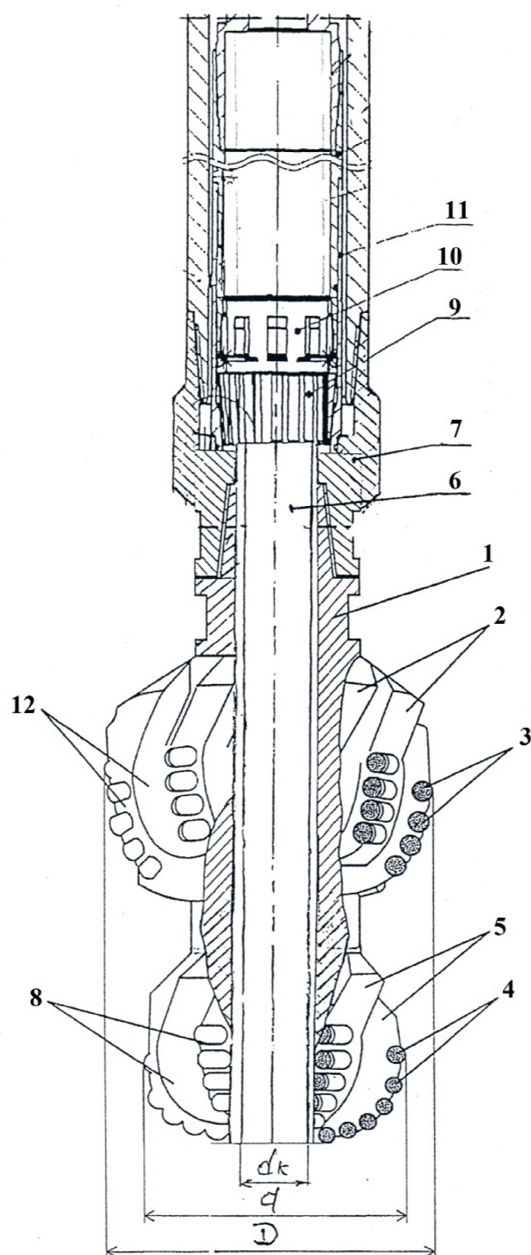


Рис. 4.9. Двухярусное долото (патент РФ № 2700330)

- обеспечить высокую управляемость долота;
- снизить стоимость буровых работ;
- долото способно выбуриваться, в случае обвала стенок скважины;
- один непрерывный элемент конструкции – бурильная головка и разбуривающий ярус – создает монолитность конструкции долота;
- сбалансировать конструкцию долота по массе и действующим на него силам;
- уменьшить крутящий момент на буровом ставе, что препятствует возникновению крутильных колебаний, которые снижают качество отбираемого керна.

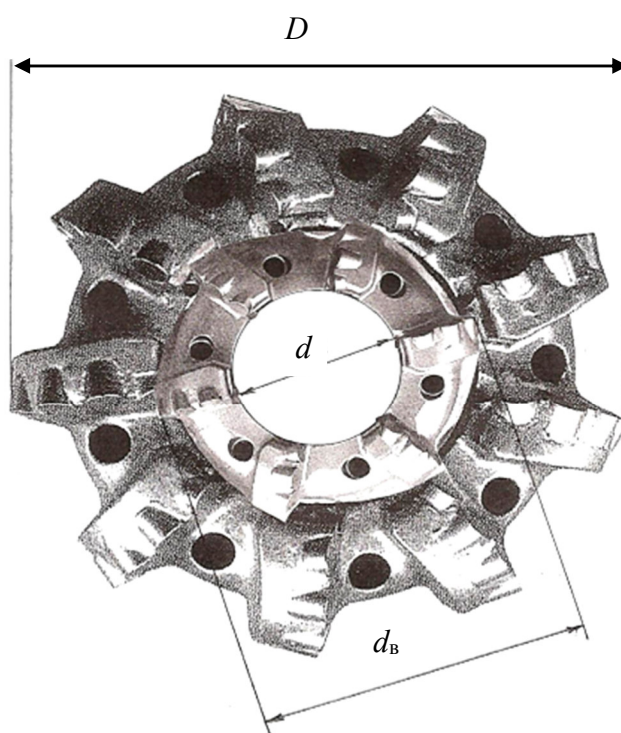


Рис. 4.10 . Стабилизирующее двухъярусное долото (патент РФ № 2700330) для отбора керна (вид с торца)

Стабилизирующее двухъярусное долото (рис. 4.9) для отбора керна 1 включает стабилизаторы 2, 5, режущие элементы разбуривающего яруса 3, режущие элементы буровой головки 4, переводник для соединения долота с колонковым набором 7, колонковую трубу 6, буровую головку 8, цанговый кернорватель 9, рычажковый кернорватель 10, корпус кернорвательного снаряда 11, лопасти разбуривающего сектора 12.

Предлагаемое стабилизирующее двухъярусное долото для отбора керна работает следующим образом. Промывочная жидкость, двигаясь через колонковую трубу – 6 и стабилизирующее двухъярусное долото для отбора керна – 1, выходит на поверхность по зазору между стенками скважины и долотом, транспортируя продукты разрушения горных пород на поверхность. Керна, при этом, заходит в колонковую трубу – 6, а весь буровой снаряд вращается вправо. После заполнения колонковой трубы осуществляется подъем инструмента на поверхность и извлечение керна из колонковой трубы.

Вооружение двухъярусного долота, представленного на рис. 4.9 [77] (патент РФ № 2700330) также может проектироваться в соответствии с разработанной методикой расчета параметров установки резцов, что обеспечит высокую стойкость резцов и высокую механическую скорость бурения.

ОБЩИЕ ВЫВОоды И РЕКОМЕНДАЦИИ

На основании сделанного анализа конструкций долот и буровых коронок с резцами *PDC* ведущих компаний, анализа изнашивания резцов *PDC*, теоретических исследований по механике и гидромеханике работы долот с резцами режуще-скалывающего действия решена задача в направлении совершенствования методики проектирования буровых долот.

Решение данной задачи стало возможно за счет использования результатов ранее полученных теоретических и экспериментальных исследований, выполненных по оценке динамических процессов резания-скалывания горных пород резцами *PDC*, что позволило, прежде всего, получить аналитические зависимости характеризующие резание-скалывание горной породы резцами типа *PDC* с учетом параметров и места установки резцов на торце долота.

В результате исследований получена аналитическая модель резания-скалывания горной породы резцами типа *PDC*, которая учитывает как процесс разрушения горной породы и возникающие при этом силы сопротивления, так и влияние среды (бурового раствора, насыщенного шламом и разрушенной, но еще не удаленной из зоны разрушения горной породы) на работу резцов.

Основным параметром, который учитывался при аналитическом исследовании, выбран параметр линейной скорости резания-скалывания, так как именно этот параметр связан с процессами деформирования и разрушения (развития трещин) горной породы и силами сопротивления, которые возникают при работе бурового инструмента в достаточно плотной среде. Установлено, что влияние скорости резания-скалывания существенным образом влияют на силы сопротивления разрушению горной породы и приводят к снижению глубины резания-скалывания горной породы.

В диссертации проанализированы причины изнашивания долот с резцами *PDC*, которые связаны с динамическими процессами разрушения горных пород, а именно, влиянием линейной скорости резания-скалывания горной породы резцами *PDC* и возникающих в связи с этим сил сопротивления горной породы и среды, через которую движутся резцы.

Установлено, что места наиболее интенсивного изнашивания долот с резцами *PDC* находятся на расстоянии около 0,8 радиуса долота r_n с большой

долей вероятности связаны с нарастающей от оси долота к внешнему радиусу долота линейной скоростью перемещения резцов долота, поскольку этот параметр определяется зависимостью $2\pi\omega r$, где ω – частота вращения долота, а r – его радиус. При этом несколько меньший износ резцов расположенных на самом внешнем радиусе долота, не смотря на самые высокие значения линейных скоростей в данной части торца, определяется более значительным и плотным размещением вооружения долота по внешнему радиусу долота.

Для подтверждения полученных аналитических зависимостей проведена серия экспериментов по бурению горной породы на буровом стенде с целью оценки таких явлений, как влияние частоты вращения на углубление за один оборот. Данный параметр, являясь параметром управления, подтвердил связь линейной скорости перемещения резца по забою с глубиной резания-скалывания горной породы и степень влияния частоты вращения на этот процесс. Проанализировано также влияние таких параметров, как физико-механические свойства горной породы, и параметры внешней среды (очистного агента и зоны разрушения в горной породе под резцами).

Достоверность результатов экспериментальных исследований, и, следовательно, выводов и рекомендаций при проведении научных исследований обеспечивалась применением методов математической статистики с использованием специальных компьютерных программ, применением такого метода планирования эксперимента и обработки экспериментальных данных, как полный факторный эксперимент.

Точность измерений при проведении экспериментальных исследований обеспечивалась тарированием измерительных приборов и устройств, проверкой их точности, которые соответствовали паспортным показателям.

Выводы о реализуемом механизме разрушения горных пород при проведении экспериментов основывался на объективных данных стендового бурения алмазным мелкорезцовым (импрегнированная коронка) и крупнорезцовым (коронка с резцами *PDC*) инструментами с использованием оригинальной методики, обоснованной многочисленными экспериментальными данными, которая заключается в оценке забойных процессов и механизма разрушения горной породы по зависимости углубления за один оборот бурового инструмента на забое скважины от

частоты вращения, а именно от линейной скорости перемещения породоразрушающих элементов [38].

На основании проведенных аналитических и экспериментальных исследований предложена методика расчета равнопрочной установки резцов типа *PDC* учитывающая закономерность распределения линейных скоростей резания-скалывания резцами современных долот.

Разработанные новые положения теории и методика проектировании буровых долот с резцами *PDC* могут использоваться и повысить эффективность компьютерного моделирования бурового инструмента. В частности целесообразно использовать выводы и результаты исследований о влиянии линейных скоростей резания-скалывания резцами на сопротивление горной породы при бурении, влиянии среды на силы сопротивления при работе долот в компьютерных программах.

В диссертации произведены расчеты параметров расстановки резцов в долоте по разработанной методике, с учетом проведенных исследований и предложены конструкции долот для промышленной реализации, созданных с использованием результатов исследований (патенты РФ № 2694872 и №2700330).

Учитывая вышеизложенное, можно утверждать, что при проектировании долот с резцами *PDC* следует в более полном объеме учитывать особенности динамических процессов при работе долот, а именно особенности механизма разрушения горных пород в динамическом режиме с учетом величины линейной скорости перемещения резцов по забою.

Линейная скорость перемещения резцов по забою в зависимости от механизма разрушения горной породы, который принято разделять на усталостно-поверхностное, объемное качественно различным образом влияет на величину углубления резцов бурового инструмента в горную породу: при усталостно-поверхностном разрушении углубление в породу по мере роста линейной скорости резцов (рост частоты вращения) увеличивается, при объемном снижается. При этом темп снижения углубления при объемном разрушении характеризует рост сил сопротивления со стороны горной породы и среды (промывочной жидкости насыщенной шламом и разрушенной, но не удаленной из зоны разрушения горной породы).

Установлено, что сопротивление горной породы и среды зависят от

линейной скорости резца, глубины резания-скалывания и ряда параметров установки резцов на торце долота.

Дальнейшие исследования в направлении развития указанного направления могут связываться с совершенствованием компьютерных программ моделирования и проектирования, что особенно актуально для высокочастного алмазного бурения, поскольку влияние гидродинамических процессов в этом случае очень значительно. Основываясь на полученных данных появляется возможность совершенствовать конструкции буровых инструментов разного типа, существенно повысив эффективность буровых работ, производимых как для эксплуатации, так и геологической разведки различных типов месторождений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адлер, Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий/ Ю.П. Адлер, Е.В.Маркова, Ю.В.Грановский// М.: Недра. – 1976. – 279 с.
2. Арсеньев Ю.А., Соловьев Н.В., Назаров А.П. Обоснование основных параметров механизма разрушения горных пород и конструктивных элементов лопастных долот. //Инженер нефтяник- №2 - 2019г. стр. 13-20
3. Арсеньев Ю.А., Соловьев Н.В., Нгуен Тиен Хунг и др. //Инженер нефтяник- №2 - 2017г. стр. 12-16
4. Бакиев, Р.Т. Применение *PDC* долот *ONYX* при бурении карбонатных и солевых отложений Ярактинского НГКМ в Иркутской области / Р.Т. Бакиев, А.С. Пятницкий. // Инженерная практика. – 2011. – № 10. – 98 с.
5. Башкатов, Д.Н. Обоснование угла установки резцов в долотах лопастного типа / Д.Н. Башкатов. // Инженер-нефтяник. – 2010. – № 3. – 24 с.
6. Бессон, А. Новый взгляд на режущие элементы буровых долот / А. Бессон, Б. Берр, С. Диллард, Э. Дрейк, Б. Айви, К. Айви, Р. Смит, Г. Уотсон // Нефтегазовое обозрение. –2002. – Режим доступа http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/russia02/spr02/p4_31.pdf. – 1. – 26 с.
7. Богданов Р.К. Сверхтвердые материалы в геологоразведочном инструменте/ Р.К. Богданов, А.П. Загора, А.М. Исонкин [и др.] – Екатеринбург: изд-во УГГГА, 2003. – 138 с.
8. Блинов Г.А. Алмазосберегающая технология бурения/ Г.А.Блинов, В.И. Васильев, М.Г. Глазов [и др.] – Л.: Недра, 1989. – 184 с.
9. Блинов Г.А. Техника и технология высокоскоростного бурения/ Г.А.Блинов, О.А. Буркин, О.А. Володин [и др.] – М.: Недра, 1982. – 408 с.
10. Борисов К. И. Научный метод оценки эффективности процессов динамического разрушения горных пород при бурении скважин современными инструментами режуще-скалывающего действия. Диссертация на соискание ученой степени доктора наук по специальности 25.00.14. – Технология и техника геологоразведочных работ, Томск, 2012 г., 197 с.

11. Борисов К.И. Современные методы оценки сопротивления горных пород резанию-скалыванию при бурении долотами *PDC*: монография, ТПУ, 2013. – 166 с.
12. Борисов К.И. Актуальные научные и прикладные вопросы развития нового научного метода оценки свойств и эффективности динамического разрушения горных пород инструментами режуще-скалывающего действия типа «*PDC*» // Вестник Ассоциации Буровых подрядчиков. - 2010. - № 3. - С. 8-16.
13. Бочечка А.А. Особенности спекания алмазных порошков различной дисперсности в условиях высокого давления / А.А. Бочечка, Л.А. Романко, В.С. Гаврилова // Сверхтвердые материалы. – 2007. – №1. – С. 24-31.
14. Бочечка А. А., Гадзыра Н. Ф., Назарчук С. Н. и др. Композит алмаз–карбид вольфрама на основе алмазного порошка АСМ 1/0 // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – К: Изд-во ИСМ им. В. Н. Бакуля, ИПЦ АЛКОН НАНУ Украины, 2009. – С. 244–247.
15. Будюков, Ю.Е. Алмазный породоразрушающий инструмент/ Ю.Е. Будюков, В.И. Власюк, В.И. Спирин. – Тула: ИПП «Гриф и К°», 2005. – 288 с.
16. Буренков, Н. Н. Режущая часть долота *PDC*: оптимизация геометрических параметров/ Н. Н. Буренков, Третьяк А.А., Чихоткин А.В./ *Oil and Gas Journal Russia*, №5, 2013. – с.56–58.
17. Буровая коронка: пат. Рос. Федерация № 2478767; заявл. 04.04.11; опубл. 10.04.13, Бюл. № 10. – 11 с.
18. Буринтех. Каталог продукции [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <http://burintekh.ru/products/pdc/>. – 11 с.
19. Бурсервис. Каталог продукции. – 2015. – 6 с.
20. «ВБМ-СЕРВИС» – комплексный подход к решению ваших проблем // Бурение и нефть. – 2003. – 19 с.
21. ВНИИБТ – Буровой инструмент. Каталог продукции [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <http://www.vniibtbi.ru/upload/iblock/522/5222133e136601e8185e7c3da5fcf452.pdf>. – 31 с.

22. Воздвиженский Б.И. Физико-механические свойства горных пород и влияние их на эффективность бурения/ Б.И.Воздвиженский, И. П. Мельничук, Ю. А. Пешалов. – М.: Недра, 1973. – 240 с.

23. Воздвиженский Б.И. Повышение эффективности колонкового алмазного бурения/ Б.И.Воздвиженский, Г.А.Воробьёв, Л.К.Горшков и др. – М.: Недра, 1990. – 208 с.

24. Гусман, А.М. Новые подходы к конструкциям долот PDC для крепких пород / А.М. Гусман, В.И. Вяхирев, А.Б. Левина. // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. – 2010. – № 4. – 22–24 с.

25. Евсеев В.Д. Физика разрушения горных пород при бурении нефтяных и газовых скважин: учебное пособие для вузов/ В.Д. Евсеев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 151 с.

26. Ильницкая Г. Д. Исследование и рекомендации по оснащению бурового инструмента крупными синтетическими алмазами / Г. Д. Ильницкая, А. П. Закора, Р. К. Богданов, С. А. Ивахненко, О. А. Заневский, А. А. Каракозов, М.С. Попова // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент и технология его изготовления. Сб. научн. Трудов. – Киев: ИСМ им. Бакуля, 2012. – Вып.15. – С. 56–62

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

28. Каракозов А. А. Исследования и разработка конструкции однослойной буровой коронки с синтетическими алмазными монокристаллами / А. А. Каракозов, М. С. Попова, Р. К. Богданов, Закора А. П. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент и технология его изготовления. Сб. научн. Трудов. – Киев: ИСМ им. Бакуля, 2014. – Вып.17. – С. 73–79.

29. Кардыш В.Г. Энергоемкость бурения геологоразведочных скважин/ В.Г. Кардыш, Б.В. Мурзаков, А.С. Окмянский. – М.: Недра, 1984. – 201 с.

30. Корнилов Н.И. Технология бурения скважин алмазным инструментом при высоких скоростях вращения/ Н.И.Корнилов, Г.А. Блинов, П.Н. Курочкин. – М.: Недра, 1978.– 237 с.

31. Корнилов Н.И. Буровой инструмент для геологоразведочных скважин: Справочник/ Н.И.Корнилов, Н.Н. Бухарев, А.Т. Киселев [и др.]/ под ред. Н.И.Корнилова. – М.: Недра, 1990. – 395 с.
32. Маковей Н. Гидравлика бурения: пер. с румынского/ Н. Маковей. – М.: Недра, 1986. – 536 с.
33. Мусанов А., Шалбай А. Буровое оборудование компании Атлас Копко Крелиус. ВУЗ «УНАТ», Алматы, 2015.
34. Назарчук С. Н. Поликристаллический композиционный материал алмаз-карбид вольфрама / С.Н. Назарчук, А.А. Бочечка, В.С. Гаврилова, Л.А. Романко, Н.Н. Белявина, Л.И. Александрова, В.Н. Ткач, Е.Ф. Кузьменко, С.Д. Заболотный // Сверхтвердые материалы, 2011, № 1.
35. Нгуен Т.Х. Рациональная технология бурения долотами PDC с применением полимерных растворов в перемежающихся по твердости горных породах месторождения "Южный Дракон и Доймой" (СРВ): диссертация кандидата технических наук: 25.00.15, Москва 2016.
36. Нескоромных В.В., Борисов К.И. Аналитическое исследование процесса резания-скалывания горной породы долотом с резцами PDC // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т323. – №1. – С. 191–195.
37. Нескоромных В.В. Искривление скважин в анизотропных горных породах: монография/ В.В. Нескоромных. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. – 204 с.
38. Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при бурении скважин: учебное пособие. – М.: ИНФРА-М; Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. – 336 с.
39. Нескоромных В.В. Оптимизация в геологоразведочном производстве. – М.: ИНФРА-М; Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. – 199 с.
40. Нескоромных В.В. Направленное бурение и основы кернометрии: учебник. – М.: ИНФРА-М; Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. – 336 с.
41. Нескоромных В.В., Пушмин П.С. Методика оптимальных параметров режима и условий бурения скважин // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН – 2011. – №1 (38). – С. 151–157.
42. Нескоромных В.В., Попова М.С., Головченко А.Е. Применение материала нового поколения в качестве элементов современного

породоразрушающего инструмента. Журнал «Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море», №10, 2019, с. 15–20.

43. Нескоромных В. В. Разработка и экспериментальные исследования особенностей работы алмазной коронки для бурения в твердых анизотропных горных породах /В. В.Нескоромных, П. Г. Петенёв, А. Л. Неверов, П. С. Пушмин, Г. Р. Романов // Известия Томского политехнического университета. – Томск: Изд. ТПУ. – 2015. – №4. – С. 30–40.

44. Нескоромных В. В. Результаты теоретических и опытных работ по изучению механизма работы буровых компоновок со смещенных центром масс поперечного сечения / В. В. Нескоромных, П. Г. Петенёв, // Известия Томского политехнического университета. – Томск: Изд. ТПУ. – 2016. – №5. – С. 87–97.

45. Нескоромных В.В. Проектирование скважин на твердые полезные ископаемые: Учеб. пособие/ В.В. Нескоромных. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: ИНФРА-М; Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. — 327 с.— (Высшее образование: Бакалавриат). — DOI 10.12737/3625(www.doi.org).

46. Нескоромных, В. В. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ : учеб. пособие / В. В. Нескоромных. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2015. – 396 с. ISBN 978-5-7638-3157-3

47. Нескоромных, В. В. Разрушение горных пород при бурении скважин : учебное пособие / В. В. Нескоромных. — Красноярск : СФУ, 2014. — 336 с. — ISBN 978-5-7638-3044-6.

48. Нескоромных В.В., Попова М.С., Парахонько Е.В. Разработка породоразрушающего инструмента с резцами PDC // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2020. - Т. 331, № 2. - С. 131-138.

49. Нескоромных В.В., Петенёв П.Г., Пушмин П.С. Разработка алмазной коронки для бурения в твердых анизотропных горных породах // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: гірничо-геологічна. – 2016. – №2 (25).– С. 3-14.

50. ОАО «Волгабурмаш»: надежный сервис для любых условий бурения [Электронный ресурс] // Бурение и нефть. – 2013. – № 6. – Режим доступа: <http://www.burneft.ru/archive/issues/2013-06/5>.

51. Пак, М.С. Долота *StingBlade* с алмазными коническими элементами / М.С. Пак. // Бурение и нефть. – 2015. – № 6. – 51 с.

52. Петенев П. Г. Исследование и совершенствование компоновки бурильной колонны для повышения эффективности бурения геологоразведочных скважин : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : спец. 25.00.14 / П. Г. Петенев ; Сибирский федеральный университет (СФУ) ; науч. рук. В. В. Нескормных. — Томск, 2016.

53. Попов, А.Н. Технология бурения нефтяных и газовых скважин / А.Н. Попов, А.И.Спивак, Т.О. Акбулатов, М.Р. Мавлютин, Р.Х. Санников, Л.А. Алексеев, Г.В. Конесев, Л.М. Левинсон, Ф.А. Агмазов, Х.И. Акчурин, Р.М. Сакаев, П.Н. Матюшин. — М. : Недра-Бизнесцентр, 2003. — С. 111–144 с.

54. Попова М.С., Парахонько Е.В. Разработка буровых инструментов с вращающимися резцами PDC // ПРОБЛЕМЫ ГЕОЛОГИИ И ОСВОЕНИЯ НЕДР. Труды XXIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 120-летию со дня рождения академика К.И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения профессора К.В. Радугина. Томск. 2019. С. 459-461.

55. Пятницкий, А.С. Возможности второго поколения резцов *ONYX* для долот PDC / А.С. Пятницкий, М.В. Жентичка. // Инженерная практика. – 2010. – № 10 – 105, 108 с.

56. Протасов, Ю.И. Теоретические основы механического разрушения горных пород/ Ю.И. Протасов. – М.: Недра, 1985.– 242 с.

57. Разрушение горных пород инструментом из сверхтвёрдых материалов: сборник научных работ. – ИСМ АН УССР, Киев, 1980 г. – 125 с.

58. Ржевский, В.В. Основы физики горных пород: учебник для вузов/ В.В. Ржевский, Г.Я. Новик.– 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 359 с.

59. Рожков, В.П. Разработка метода определения микротвёрдости пород при бурении мелкоалмазным инструментом/ В.П. Рожков// Изв. вузов. Геология и разведка. – М.: 1998. – № 4. – С.119-126.

60. Симонянц, Л.Е. Разрушение горных пород и рациональная характеристика двигателей для бурения/ Л.Е.Симонянц. – М.: Недра, 1966. – 227 с.

61. Соловьев Н.В., Чихоткин В.Ф., Богданов Р.К., Закора А.П. Ресурсосберегающая технология алмазного бурения в сложных геологических условиях М.: Изд-во ВНИИОЭНГ, – 1997. – 329 с.
62. Соловьев, Н.В. Механизм разрушения горной породы и определение составляющих сил ее резания буровым инструментом, оснащенным алмазотвердосплавными пластинами / Н.В. Соловьев, А.М. Исонкин, Р.К. Богданов, С.И. Шестаков. // Инженер-нефтяник. — 2010. — № 1. — 35 с.
63. Спивак А.И. Разрушение горных пород при бурении скважин: учебник для вузов.– 4-е изд., перераб. и допол./ А.И. Спивак, А.Н. Попов. – М.: Недра, 1986. – 208 с.
64. Страбыкин Н.Н. Техника бурения взрывных скважин в мерзлых породах/ Н.Н.Страбыкин. – М.: Недра, 1989. – 172 с.
65. Сулакшин С.С. Разрушение горных пород при бурении скважин: учеб. пособие для вузов/ С.С. Сулакшин. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004 . – 136 с.
66. Тан Фуньлинь. Алмазосодержащие сверхтвердые материалы в бурении/ Текст лекций/ Тан Фуньлинь, А.И. Ламбин. – Иркутск: ИПИ, 1985. – 62 с.
67. Технология «*Kymera*TM» [Электронный ресурс]. — март 2013. — Режим доступа:
<http://www.eric siegmund.com/fireant/2013/03/130306kymerabit.html>.
68. Троллоп Д.Х. Введение в механику скальных пород: пер. с англ./ Д.Х. Троллоп, Х. Бок, . Б.С. Бест [и др.]; под ред. Х. Бока. – М.: Мир, 1983. – 276 с.
69. Филин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. Т.1 / А.П. Филин. – М.: Наука, 1975. – 832 с.
70. Хорюшин И.Г. Бурение геологоразведочных скважин шарошечными долотами/ И.Г. Хорюшин. – М.: Недра, 1977. – 172 с.
71. Чулкова В. В. Разработка методических и технологических решений по выбору долот PDC с усиленным антивибрационным вооружением // Автореф. дис.. канд. техн. наук. - М.: РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2017.
72. Эйгелес Р.М. Разрушение горных пород при бурении/ Р.М. Эйгелес. – М.: Недра, 1970. – 232 с.

73. *Baker Hughes*. Каталог продукции. — 2011. — 11 с.
74. *Bu C. G., Qu Y. G., Liu B. L.. Dynamic Modeling and Simulation of DTH Hammer. Proceeding of 16th CIRP International Design Seminar*. 2006. p.810–813.
75. *Bu C., Qu Y., Cheng Z., Liu B., Numerical simulation of impact on pneumatic DTH hammer percussive drilling. Journal of Earth Science*. 2009. Vol. 20, №. 5, p.868-878.
76. *Saadati M., Forquin P.A., Weddfelt K., Larsson P-L., Hild F. Granite rock fragmentation at percussive drilling – experimental and numerical investigation. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2014.
77. *Saksala T. 3D numerical modelling of bit-rock fracture mechanisms in percussive drilling with a multiplebutton bit. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2013. p.309–324.
78. *Smith*. Каталог продукции. – 24–30 с.
79. *Stinger*. Алмазный конический элемент. За гранью возможностей [Электронный ресурс] // Инженерная практика. – 2013. – № 11. – Режим доступа: <http://lib.glavteh.ru/publicationreader/303/?folder=demo#page/1/mode/1up>.
80. *Kivade S. B., Murthy Ch. S. N., Vardhan H. Laboratory Investigations on Percussive Drilling. Journal of The Institution of Engineers*, 2013. Vol. 94, №2.
81. *Zhang X., Zhang S., Luo Y., Wua D. Experimental study and analysis on a fluidic hammer—an innovative rotary-percussion drilling tool. Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019. p. 362–370.
82. *Aalizad S. A., Farshad R. Prediction of penetration rate of rotary-percussive drilling using artificial neural networks - a case study. Archives of Mining Sciences*, 2012. Vol. 57, №3.
83. *Stratapax drill blanks & Geoset drill diamond* // www.abrasivesnet.com/en/product/mbs/strata/down/DI%20Stratapax.pdf
84. *Placement of non-planar cutting element: Pat. U.S. № 20180320449A1; Filed: 30.04.18. Pub. Date: 08.11.18, Appl. No 16/009, 294. – p. 31.*
85. *Drill bit body construction: Pat. U.S. № 20180291691A1; Filed: 15.06.18. Pub. Date: 11.10.18; Appl. No 15/966,004. – p. 31.*
86. *Product Catalog. Smith Bits. A Schlumberger Company. 17-BDT-310907 Copyright 2018 Schlumberger. All rights reserved.*

87. *Tran, M.* Разработка конструкций долот при помощи использования программных средств / *M. Tran.* // Нефтегазовые технологии. – 2008. – № 3. – 32 с.

88. *Varel International.* Каталог продукции [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.varelintl.com/ru/Oil-and-Gas/PDC-Drill-Bits/>.

89. <https://www.youtube.com/>.