

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**

*Специальность 25.00.14 – Технология и техника
геологоразведочных работ*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

г. Москва 2020г.

Работа выполнена на кафедре современных технологий бурения скважин в ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Оржоникидзе» (МГРИ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Современных технологий бурения скважин МГРИ

Соловьев Николай Владимирович

официальные оппоненты:

Сериков Дмитрий Юрьевич

доктор технических наук, доцент кафедры «Управления качеством, стандартизации и сертификации нефтегазового оборудования», ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»

Литкевич Юрий Федорович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Нефтегазовая техника и технологии», ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «ИРНТУ»

Защита диссертации состоится «24» декабря 2020 г. в 16 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.121.09 при Российском государственном геологоразведочном университете имени Серго Оржоникидзе.

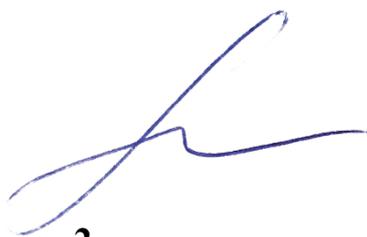
Адрес: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.23, ауд. 4-73.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Оржоникидзе и на сайте <https://www.mgri.ru/science/scientific-and-innovative-activity/dissertation-council/diss-212-121-09/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направить ученому секретарю диссертационного совета по указанному выше адресу.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
Диссертационного совета
Д 212.121.09
д.т.н., профессор



М.В. Меркулов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. 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-кобальтового (*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.

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.

В настоящий момент направление, связанное с созданием новых вариантов и видов материалов для создания буровых инструментов, активно развивается.

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 ствола скважины и на качество вскрываемого коллектора.

В то же время, учитывая сложность и высокую изменчивость геологических условий бурения, например, на площадях Восточной Сибири, где в настоящее время ведутся активные работы с использованием геологоразведочного и эксплуатационного бурения, представляется актуальным создание долот с более высокими эксплуатационными характеристиками при бурении в сложных горно-геологических условиях,

обеспечивая устойчивые высокие темпы проходки и значительный ресурс долот.

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 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 механизма разрушения твердых горных пород, с учетом линейной скорости работающего резца в упруго-жидкой среде, насыщенной твердой фазой разной фракции и состава, может быть востребована при создании других новых типов буровых инструментов, например, для высокочастотного алмазного бурения и механической обработки камня.

Практическая значимость работы также крайне важна и составляет значимую часть актуальности диссертационного исследования, определяя высокую роль буровых технологий при разведке и добыче полезных ископаемых. 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., Нескоромных В.В., Остроушко И.А., Перетолчина В.А., Страбыкина Н.Н., Попова А.Н., Протодьяконова М.М., Рожкова В.П., Спивака А.И., Соловьева Н.В., 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. 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, дополняющие знания в данной области, что позволит совершенствовать методику 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.

Основные задачи работы:

1. Выполнить анализ технического уровня разрабатываемого бурового инструмента, оснащенного резцами *PDC*, конструкций резцов типа *PDC*, основных результатов и механизма разрушения, методов проектирования долот с резцами *PDC*, износа резцов *PDC* в долотах при бурении различных по прочности и абразивности горных пород и систем проектирования буровых долот.

2. Получить аналитические зависимости характеризующие резание-скалывание горной породы резцами типа *PDC* с учетом параметров и места установки резцов на торце долота, используя результаты ранее полученных теоретических и экспериментальных исследований, выполненных по оценки динамических процессов резания-скалывания; построить и уточнить основные параметры аналитической модели резания-скалывания горной породы резцами типа *PDC*, учитывающую 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; и проанализировать параметр линейной скорости резания-скалывания, учитывающийся при аналитическом исследовании, с процессами деформирования и разрушения (развития трещин) горной породы и силами сопротивления, которые возникают при работе бурового инструмента в достаточно плотной среде

3. Провести анализ причин изнашивания долот, связанных 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, а также провести серию экспериментов по бурению

с целью оценки влияния частоты вращения на углубку за один оборот, с учетом физико-механических свойств горной породы и параметров внешней среды (очистного агента и зоны разрушения в горной породе под резцами).

4. Предложить методику расчета равнопрочного профиля инструмента с установкой резцов типа *PDC* на основе полученных аналитических и экспериментальных исследований, и произвести расчеты параметров расстановки резцов в долоте по разработанной методике, с учетом проведенного исследования.

5. Предложить конструкции долот для бурения геологоразведочных скважин, созданных с использованием результатов исследований. Выявить их патентоспособность и произвести патентование в патентном ведомстве.

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 резцов *PDC* в процессе резания-скалывания горной породы от величины и характера распределения по радиусу долота линейной скорости, что определяет различную сопротивляемость горной породе разрушению и создает условия для неравномерной нагрузки на вооружение долот и, соответственно, неодинаковую стойкость резцов к скалыванию и изнашиванию.

2. Создана аналитическая модель механизма разрушения горных пород резцами *PDC* и предложена методика проектирования равнопрочного профиля 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 максимальная интенсивность изнашивания 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, 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 бурового раствора, насыщенного шламом, и значения 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. Нескоромных, 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.

Основное содержание работы

Во введении приводится общая характеристика работы, обосновывается ее актуальность, определяется цель, идея, задачи, излагаются защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе дан обзор и анализ технического уровня разрабатываемого бурового инструмента, оснащенного резцами PDC, методов проектирования долот с резцами PDC, конструкций резцов типа PDC и буровых инструментов с данным типом вооружения, износа резцов PDC в долотах при бурении различных по прочности и абразивности горных пород, механизма разрушения, а также систем проектирования современных буровых долот.

Во второй главе описана методика опытных лабораторных

исследований на буровом стенде, в том числе методика исследования работы буровой коронки, методика обработки результатов стендовых исследований, а также методика исследования процесса разрушения горной породы по углублению за один оборот бурового инструмента на забое.

В третьей главе описаны теоретические исследования глубины и усилия резания-скалывания горной породы резцами PDC с учетом сопротивления среды, в том числе проанализированы причины и оценка износа PDC, вызванного неравными усилиями сопротивления при разрушении горной породы, разработаны теоретические основы механики разрушения горных пород резцами PDC с учетом динамических процессов резания-скалывания горной породы и сопротивления среды и представлены результаты стендовых испытаний буримости долерита и мрамора коронками с алмазным вооружением.

В четвертой главе предложена методика проектирования долот с резцами PDC, учитывающая динамические процессы резания-скалывания горной породы и сопротивления среды, а также описана разработка долот с резцами PDC в рамках программы совершенствования конструкций буровых долот.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях.

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.

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

$$v_p = 2\pi \cdot r \cdot \omega, \quad (1)$$

где r – радиус долота, м; ω – частота вращения долота, мин⁻¹.

На рис. 1 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 показывают результаты расчетов по формуле (1) линейная скорость перемещения резца, расположенного в крайнем внешнем ряду на торце долота может составлять 3–5 м/с. 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.

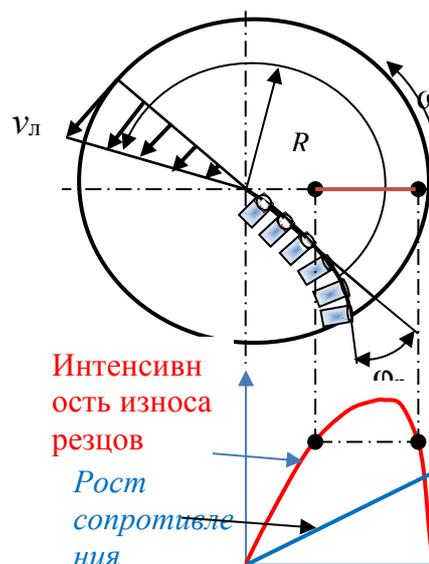


Рис. 1. Схема установки резцов на торце долота с учетом скоростей резания-скалывания породы и интенсивности изнашивания резцов

На рис. 2. представлены различные долота с резцами PDC, получившие значительный износ.



Рис. 2. Долота с характерными типом и местом износа и поломок резцов

Как следует из анализа, максимальные линии точек изнашивания резцов соответствуют тем местам, в которых резцы испытывают наибольшие сопротивления резанию-скалыванию из-за высоких линейных скоростей резания скалывания. Анализ изношенной торцевой части долота показывает, что максимально изношены резцы *PDC* на расстоянии от центра долота равное 0,7–0,8 радиуса долота.



Рис. 3. Долота, изношенные в процессе бурения в Восточной Сибири (Юрубчено-Тахомкое нефтегазовое месторождение)

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

Таким образом, анализ изнашивание 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.

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.

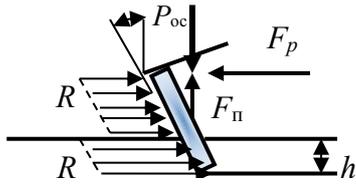


Рис. 4. Схема для анализа влияния среды на процесс резания

Для рассмотрения влияния на работу резца внешней среды, рассмотрим схему на рис. 4. Из схемы следует, что на плоскость резца, установленного с отрицательным передним углом $-\gamma_n$, 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_n .

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

$$R = \frac{F_p}{\cos\gamma_n} = \frac{P - F_n}{\sin\gamma_n}. \quad (2)$$

Из данной формулы следует, что

$$F_p = \frac{P - F_n}{\operatorname{tg}\gamma_n}, \quad (3)$$

где P_{oc} – осевая нагрузка на резец, Н; F_n – усилие, которое направлено вверх из-за сопротивления среды, воздействующей на переднюю поверхность резца, Н; γ_n – передний гол установки резца, град.

Усилие резания-скалывания породы F_p определим в соответствии с принятой схемой:

$$F_p = S_{ск} \sigma_{ск} (1 + \operatorname{tg}\varphi) + f(P - F_n) + (R_p + R_n), \quad (4)$$

где $S_{ск}$ – площадь площадки скалывания породы на передней грани резца, m^2 ; $\sigma_{ск}$ – 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_n – 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 (4) 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_n , направленного вверх и компенсирующего часть осевой нагрузки P_{oc} . Таким образом, рост сопротивления среды при бурении будет требовать более значительного осевого усилия на резец для сохранения глубины резания-скалывания горной породы.

Усилия R_p и R_n определим исходя из фундаментальных зависимостей Бернулли и уравнения Навье-Стокса. Для нашего случая эти выражения будут выглядеть следующим образом:

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

$$R_{\Pi} = 0,5v_p^2 \rho_{\Pi} S_2 C_c, \quad (6)$$

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} – удельный вес бурового раствора, насыщенного шламом и разрушаемой горной породы, H/m^3 .

В формулах (5) и (6) 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:

$$S_2 = \frac{360}{\alpha} \pi r^2 - \rho(r-h) = \frac{360}{\alpha} \pi r^2 - \sqrt{2rh}(r-h). \quad (7)$$

Площадь заглабленной в породу части резца рассчитывается по зависимости:

$$S_1 = \pi r^2 - \left[\frac{360}{\alpha} \pi r^2 - \sqrt{2rh}(r-h) \right]. \quad (8)$$

В приведенных формулах значения угла α и расстояния ρ можно определить по формулам:

$$\alpha = 2 \arccos \frac{r-h}{r}, \quad (9)$$

$$\rho = \sqrt{2rh}. \quad (10)$$

Для упрощения 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:

$$R_c = 0,5v_p^2 \rho_c S C_c, \quad (11)$$

где ρ_c – удельный вес среды с учетом плотности бурового раствора, насыщенного шламом из зоны разрушения и разрушаемой горной породы, H/m^3 ;

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°).

Удельный вес среды ρ_c определяется как средняя из таких значений как удельный вес бурового раствора насыщенного шламом – 11–12 kH/m^3 и разрушаемой горной породы – 20–25 kH/m^3 . Таким образом, ориентировочно ρ_c может составлять величину 14–18 kH/m^3 .

Усилие F_{Π} в формулах (3) и (4) найдем как проекцию на вертикальную линию усилия R_c с учетом того, что усилие R_c проецируется сначала на

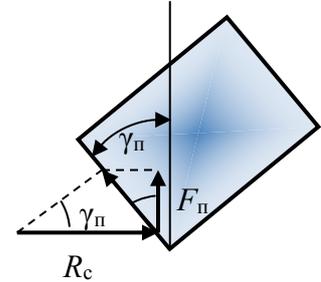


Рис.5. Схема к анализу процесса работы резца PDC

плоскость резца, установленную под углом $-(\gamma_{\pi})$.

В этом случае усилие F_{π} будет равно

$$F_{\pi} = 0,5v_p^2 \rho_c S C_c \sin \gamma_{\pi} \cos \gamma_{\pi}. \quad (12)$$

С учетом полученных формул (11) и (12), и выражения

$$F_p = \frac{\pi \sigma_{ск} h \sqrt{dh}}{\sin \gamma_{\pi}} \cos \varphi_p (1 + \operatorname{tg} \varphi) + f(P - F_{\pi}) + (R_p + R_{\pi}), \quad (13)$$

получит следующий вид:

$$F_p = \frac{\pi \sigma_{ск} h \sqrt{dh}}{\sin \gamma_{\pi}} \cos \varphi_p (1 + \operatorname{tg} \varphi) + f(P - 0,125v_p^2 \rho_c \pi d^2 C_c \sin \gamma_{\pi} \cos \gamma_{\pi}) + 0,125v_p^2 \rho_c \pi d^2 C_c \cos \gamma_{\pi} \quad (14)$$

Анализ этого выражения показывает, что усилие резания-скалывания зависит пропорционально от предела прочности на скалывание $\sigma_{ск}$ и диаметра резцов d^2 , глубины резания-скалывания породы h^3 , 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 (14) представим несколько иначе:

$$F_p = \frac{\pi \sigma_{ск} h \sqrt{dh}}{\sin \gamma_{\pi}} \cos \varphi_p (1 + \operatorname{tg} \varphi) + f(P_{ос} - A \sin \gamma_{\pi}) + A, \quad (15)$$

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

Используя ранее полученное выражение для расчета F_p можно определить глубину резания-скалывания породы h .

Глубина резания-скалывания будет равна:

$$h = \sqrt[2]{\left\{ \frac{[(P - A \sin \gamma_{\pi})(1 - f \operatorname{tg} \gamma_{\pi}) - A \operatorname{tg} \gamma_{\pi}] \sin \gamma_{ск}}{\pi \sigma_{ск} \sqrt{d} \operatorname{tg} \gamma_{\pi} \cos \varphi_p (1 + \operatorname{tg} \varphi)} \right\}^3}, \quad (16)$$

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

В формуле (16) P определяется как нагрузка на один резец, которую можно определить из соотношения

$$P = P_{ос} / N, \quad (17)$$

где $P_{ос}$ – 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 (16) повышение переднего отрицательного угла γ_n 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.

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.

Сила, выталкивающая резец с отрицательным передним углом в процессе-резания скалывания R_B

$$R_B = \frac{\sigma_{ск} K \pi h^2 \sqrt{d}}{2 \sin \gamma_{ск}}. \quad (18)$$

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

Для уточнения действующих сил и реакций рассмотрим схему на рис.6.

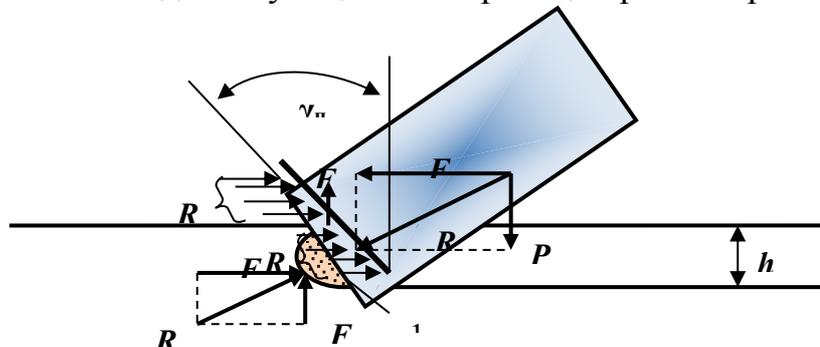


Рис. 6. Схема для анализа процесса резания-скалывания горной породы резцом PDC: 1 – ядро сжатия горной породы

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

$$F_B = R_B \sin \gamma_n. \quad (19)$$

Сопротивление среды, реакции R_p и R_n 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 (12).

Параметр прочности горной породы $\sigma_{ск}$ при повышении скорости резания-скалывания v_p будет также возрастать. В этом случае коэффициент K , будет равен:

$$K = \frac{R_{BT}}{R_{BH}}, \quad (20)$$

где R_{BT} – усилие сопротивления, соответствующее значению линейной скорости резца (расстояние x на рис. 6.); R_{BH} – усилие сопротивления, соответствующее линейной скорости, близкой к нулевому значению. Усилие R_{BT} можно определять по зависимости вида

$$R_{BT} = \text{tg}\beta \times r, \quad (21)$$

где β – угол наклона опытной кривой, которую можно получить при испытании предела прочности на скалывание определенной горной породы (угол наклона графика на рис. 7); x – текущее относительное значение расстояния от центра торца долота до точки в которой происходит определение R_v (рис. 7); 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 .

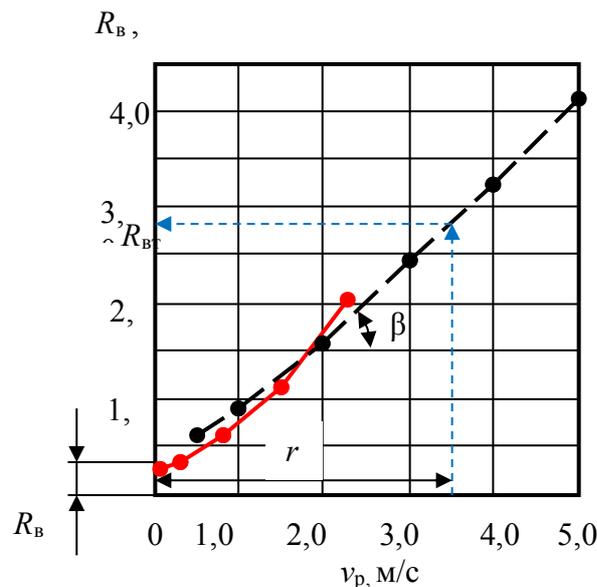


Рис. 7. Зависимость усилия R_v от скорости резания-скалывания породы v_p резцом типа PDC :
сплошная линия – экспериментальные данные;
пунктирная линия – аппроксимирующая кривая

На основе полученного нами определенного, значения K формула расчета глубины резания-скалывания горной породы резцом PDC, будет выглядеть следующим образом

$$h = \sqrt[2]{\left\{ \frac{[(P - A \sin \gamma_{п})(1 - f \text{tg} \gamma_{п}) - A \text{tg} \gamma_{п}] \sin \gamma_{ск}}{\pi K \sigma_{ск} \sqrt{d} \text{tg} \gamma_{п} \cos \varphi_p (1 + \text{tg} \varphi)} \right\}^3}, \quad (22)$$

где $A = 0,125v_p^2\rho_c\pi d^2 C_c \cos \gamma_{\Pi}$; $K = \frac{R_{BT}}{R_{BH}}$; $R_{BT} = \operatorname{tg}\beta \times r$.

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. 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.

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:

$$R_c = 0,5v_p^2\rho_c S C_c ; R_b = \frac{\sigma_{ск} K \pi h^2 \sqrt{d}}{2\sin\gamma_{ск}}. \quad (23)$$

$$F_{\Pi} = 0,125v_p^2\rho_c\pi d^2 C_c \sin \gamma_{\Pi} \cos \gamma_{\Pi}; F_b = R_b \sin\gamma_{\Pi} = \frac{\sigma_{ск} K \pi h^2 \sqrt{d}}{2\sin\gamma_{ск}} \sin\gamma_{\Pi}. \quad (24)$$

Как следует из полученных результатов расчетов, сопротивление перемещению резца как за счет резания-скалывания горной породы R_b и сопротивление за счет влияния среды R_c достигают достаточно высоких значений, особенно при высокой плотности среды и линейной скорости перемещения резца по забою.

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 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.

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, поскольку, определяющим для расчета крутящего момента будет суммарное сопротивление вращению долота в режиме резания-

скалывания горной породы. Этому соответствует выражение для резца в формуле (15):

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

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

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

$$M_{кр} = \frac{2}{3} r F_p N. \quad (25)$$

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 . В этом случае можно записать:

$$h_o = h n_p, \quad (26)$$

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

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_b , даН;	F_b , даН	R_c , даН;	$F_{п}$, даН	$R_b + R_c$, даН;	$F_b + F_{п}$, даН
Глина	3,0; 1,5	16,5·20=330	3,81·20=76,2	29,7·20=594	7,8·20=156	924	232,2
Песчаник, аргиллит	3,0; 1,5	82,5·20=1650	18,9·20=378	29,7·20=594	7,8·20=156	2244	534
Глина	4,0; 1,5	16,5·20=330	3,81·20=76,2	52,8·20=1056	13,5·20=270	1386	346,2
Песчаник, аргиллит	4,0; 1,5	82,5·20=1650	18,9·20=378	52,8·20=1056	13,5·20=270	2706	648
Глина	4,0; 2,0	16,5·20=330	3,81·20=76,2	70,4·20=1408	18·20=360	1738	446,2
Песчаник,	4,0; 2,0	82,5·20=1650	18,9·20=378	70,4·20=1408	18·20=360	3058	738

Результаты расчетов, 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.

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

Расчет глубины-резания скалыванию можно производить по формуле (22), полученной аналитически в диссертации, с учетом таких поправок, как

равенство нулю линейной скорости перемещения резца, равенство $K=1$. С учетом данных вводных формула (22) будет выглядеть следующим образом:

$$h = \sqrt[2]{\left\{ \frac{P(1-f\operatorname{tg}\gamma_{\Pi}) \sin\gamma_{\text{СК}}}{\pi\sigma_{\text{СК}}\sqrt{d} \operatorname{tg}\gamma_{\Pi} \cos\varphi_{\text{P}}(1+\operatorname{tg}\varphi)} \right\}^3}. \quad (23)$$

Значение осевой нагрузки P на резец рассчитывается из зависимости

$$P = \frac{P_{\text{ос}}}{N}, \quad (24)$$

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 $v_{\text{б}} = h \cdot n \cdot \omega$.

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 AB (рис.8), то с помощью формулы можно определить число резцов в линии резания с учетом глубины резания-скалывания h и диаметра резца d .

$$k = \frac{AB}{2\sqrt{hd-h^2}} \quad (25)$$

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:

$$AB = 2\sqrt{hd-h^2}k + \sum_{m=1}^{i=1} 2\sqrt{hd-h^2} \cos\varphi_{\text{Pi}}, \quad (26)$$

где k – число резцов с фронтальным углом резания-скалывания φ_{P} равным нулю и m – число резцов с фронтальным углом φ_{P} больше нуля.

Расчет изменения линейной скорости перемещения резцов по формуле

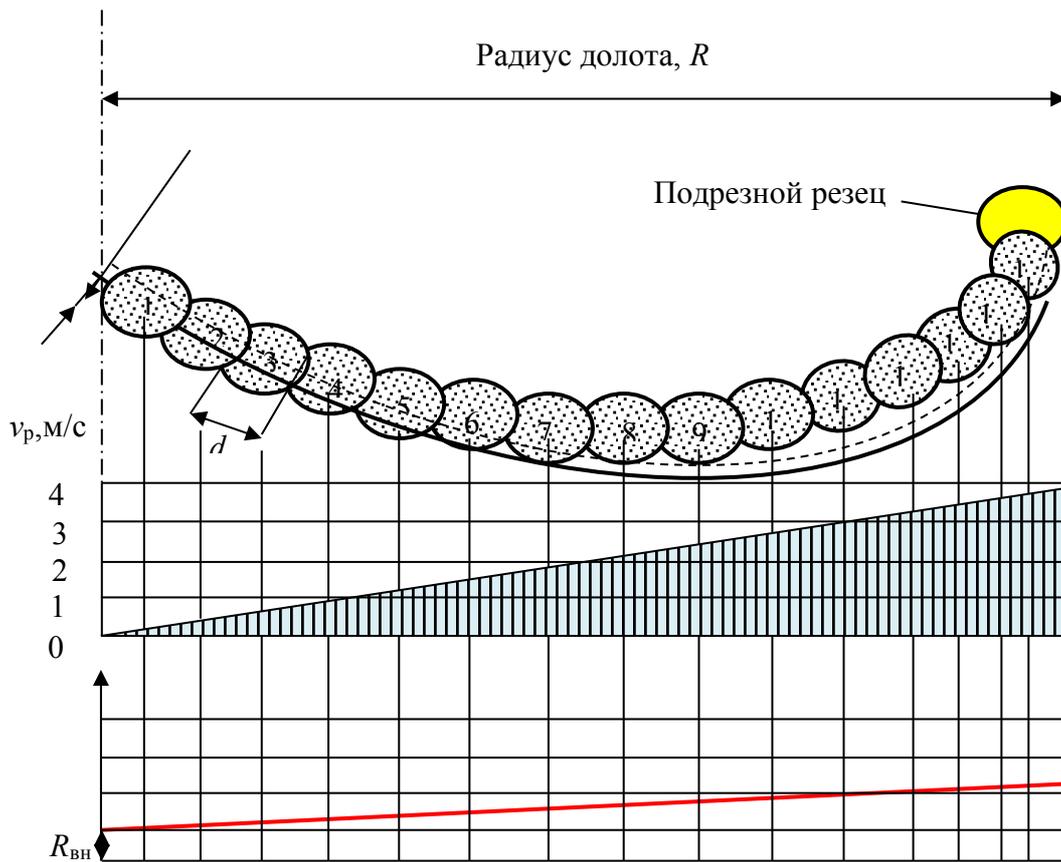
$$v_{\text{P}} = 2\pi \cdot r \cdot \omega \quad (27)$$

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



Рис. 8. 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 $\varphi_{\text{р}}$

С учетом полученных значений линейных скоростей для различных резцов на торце долота рассчитывается параметр $A = 0,125v_{\text{р}}^2\rho_c\pi d^2C_c \cos \gamma_{\text{п}}$ и значение коэффициента K , участвующих в определении глубины резания каждым из резцов в линии резания. 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 $\gamma_{\text{п}}$, фронтальный угол резания-скалывания $\varphi_{\text{р}}$ и диаметр резца d . При этом целесообразно использовать два первых из них: передним углом установки резца $\gamma_{\text{п}}$ и фронтальным углом резания-скалывания $\varphi_{\text{р}}$.



№ 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
$K = \frac{R_{\text{вн}}}{R_{\text{вн}}}$	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

Рис. 9. Графическое решение определения значений линейных скоростей перемещения резцов на торце долота и коэффициента сопротивления резанию-скалывания горной породы K

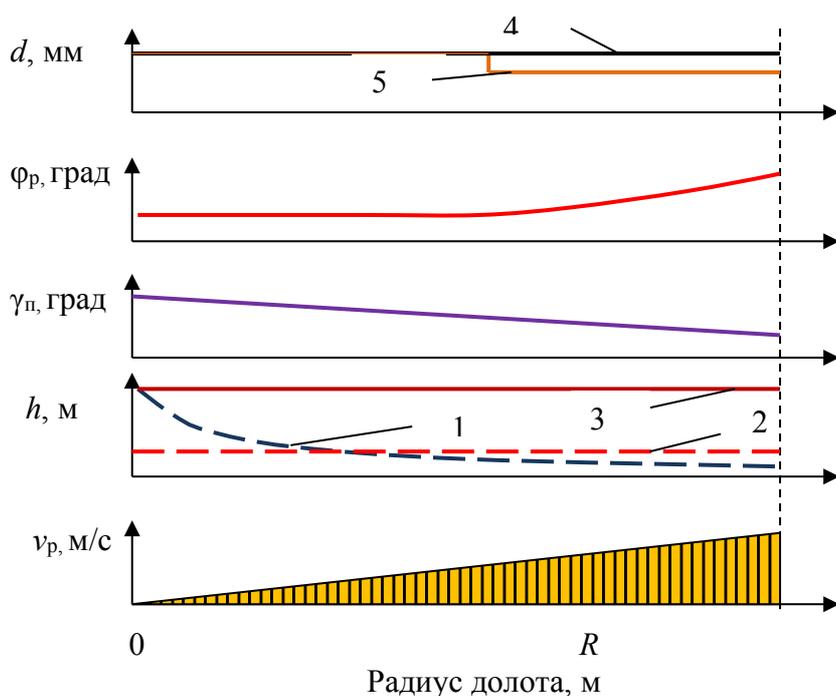


Рис. 10. Графические зависимости, показывающие возможную связь параметров установки резцов *PDC* с линейной скоростью перемещения резцов по забою v_p : h – глубина резания-скалывания горной породы: 1,2 – при неизменных значениях переднего угла γ_p , фронтального угла ϕ_p и диаметра резцов d ; 3 – глубина 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

неизменных значениях переднего угла γ_p , фронтального угла резания-скалывания ϕ_p и диаметра резцов d вследствие различных линейных скоростей резания-скалывания горной породы и преодоления среды резцы *PDC* испытывают горной породы.

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

На рис. 10 представлена планируемая связь параметров размещения резцов *PDC*, таких как передний угол установки резца γ_p , 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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является завершенной научно-исследовательской работой, в которой на основании экспериментальных и теоретических исследований установлены зависимости забойных процессов при бурении скважины от конструктивных особенностей породоразрушающего инструмента, позволяющие получить рекомендации по проектированию однослойного алмазного породоразрушающего инструмента.

Основными научными результатами, выводами и рекомендациями является следующее:

1. 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.

2. 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).

3. 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_n , фронтальный угол резания-скалывания φ_r , диаметра резца d и физико-механических свойств горной породы, таких как предел прочности на скалывание $\sigma_{ск}$ и коэффициент внутреннего трения $\operatorname{tg}\varphi$ и достигает существенных значений, без учёта которых сложно произвести проектирование вооружения долота без значительных издержек.

4. 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.

5. 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.

6. 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_n , фронтальный угол резания-скалывания φ_r и диаметр резца d . При этом целесообразно использовать два первых из них: передним углом установки резца γ_n и фронтальным углом резания-скалывания

Фр .

7. Снижение переднего угла γ_n от начального значения, например, 25° до -15° или 10° , а увеличение фронтального угла резания-скалывания ϕ_r приводят к снижению факторов снижающих глубину резания-скалывания горной породы и глубина резания-скалывания будет равной для всех резцов, расположенных на торце долота.

Наиболее значимые публикации по теме диссертации:

а) в журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации:

1. Нескоромных В. В., **Чихоткин А. В.** Аналитические исследования механики разрушения горных пород резцами PDC с учетом динамических процессов резания-скалывания горной породы и сопротивление среды // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020(4) - УДК 622.24.05 / DOI:10.25018/0236-1493-2020-4-0-127-136//

2. Нескоромных В. В., Попова М.С., **Чихоткин А.В.**, Головченко А.Е., Шубенина Е.Е. Анализ влияния сил сопротивления на эффективность бурения инструментом типа PDC // Инженер нефтяник- №1 - 2020г. С. 16-23.

3. Нескоромных В. В., Попова М.С., **Чихоткин А.В.**, Методика проектирования долот с резцами PDC, учитывающая динамические процессы резания-скалывания горной породы и сопротивление среды // Инженер нефтяник- №2 - 2020г. С. 13-18.

4. Нескоромных В. В., Попова М.С., **Чихоткин А.В.**, Головченко А.Е., Шубенина Е.Е. Определение глубины разрушения горной породы резцами PDC с учетом сопротивления среды. // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море №5 – 2020г. С 23-27.

б) Патенты:

5. Чихоткин В.Ф., Третьяк А.Я., Дуан Лунчэн, Тан Фуньлинь, Третьяк А.А., **Чихоткин А.В.** // Патент РФ №2694872, E21B 10/43, от 17.07.2019 г. Бюл. №20.

6. Чихоткин В.Ф., **Чихоткин А.В.**, Третьяк А.Я., Дуан Лунчэн, Тан Фуньлинь, // Патент РФ № 2700330, E21B 10/42, от 16.09.2019 г. Бюл. №26.

в) Конференции и доклады:

7. Чихоткин В.Ф., Аубакиров М.Т., **Чихоткин А.В.**, Глеуберген А. Особенности исследований призабойных процессов и их влияние на эффективность бурения горных пород // Международная научно-практическая конференция «Геологоразведочное и нефтегазовое дело в 21 веке».- Алматы. 2016г. С. 245-256.

8. **Чихоткин А.В.** Изучение ресурса работы алмазных буровых коронок // III Всероссийская научно-практическая конференция обучающихся и преподавателей // «Энергетика и автоматизация в современном обществе» г. Астрахань 2020г.

9. **Чихоткин А.В.** Особенности гидродинамических процессов в геологоразведочной отрасли // IX Международная конференция молодых ученых «Молодые – Научкам о Земле» - Москва. 2020г.

10. **Chikhotkin A.V.** // 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» China, Wuhan, September 26-27, 2019.

11. **Chikhotkin A.V.** //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» China, Jilin, September 14th – 16th, 2020.