

На правах рукописи



ГОЛОВЧЕНКО АНТОН ЕВГЕНЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ И ТЕХНОЛОГИИ
УДАРНО-ВРАЩАТЕЛЬНОГО БУРЕНИЯ НА ОСНОВЕ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВНЕЦЕНТРЕННЫХ УДАРНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

Специальность 25.00.14 – Технология и техника геологоразведочных работ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре технологии и техники разведки Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор,
Нескоромных Вячеслав Васильевич

Официальные оппоненты:

Шадрина Анастасия Викторовна

доктор технических наук, доцент отделения нефтегазового дела Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ, г. Томск)

Дмитриев Андрей Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры бурения скважин Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (ФГБОУ ВО СПбГУ, г. Санкт-Петербург)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», (ФГБОУ ВО «ИРНТУ», г. Иркутск)

Защита диссертации состоится «25» марта 2021 г. в 11 час 00 мин. на заседании диссертационного совета Д.212.121.09 на базе ФГБОУ ВО «РГГРУ имени Серго Орджоникидзе» по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, зал диссертационных советов (каб.4-73).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «РГГРУ имени Серго Орджоникидзе» по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, <https://mgri.ru/science/scientific-and-innovative-activity/dissertation-council/diss-212-121-09/>

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
д.т.н., профессор

М.В. Меркулов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Ударно–вращательное бурение погружными пневмударниками – способ, широко используемый в горном деле, геологоразведке, бурении скважин на воду, строительстве дорог и других буровых работах, как в отечественной практике, так и за рубежом. В настоящее время ударно–вращательный способ является одним из наиболее перспективных способов бурения, в особенности горных пород твёрдых и очень твёрдых кристаллических и упруго–хрупких, благодаря высоким скоростям проходки скважин (механическая скорость бурения в идентичных горно-геологических условиях по сравнению с вращательным способом бурения выше до 4 раз) в сочетании с долговечностью и надёжностью применяемых при реализации способа конструкций, а сбалансированное сочетание шламового и кернового опробования позволяет значительно экономить материальные ресурсы и время на бурение при проведении геологоразведочных работ без ущерба для достоверности данных о месторождении и его рудах.

Несмотря на высокую по отношению к традиционному вращательному бурению производительность процесса разрушения горных пород на забое скважины, на данный момент она определяется главным образом давлением нагнетаемого компрессором высокого давления очистного агента. Очевидно, что бесконечное повышение этого параметра невозможно, к тому же по мере увеличения давления очистного агента его себестоимость возрастает, ввиду чего повышение производительности процесса разрушения горных пород на забое скважины при ударно-вращательном бурении скважин без повышения затрат энергии является актуальной и требующей решения задачей. Также к таковой относится и отсутствие серийно выпускаемого отклоняющего комплекса, способного с высокой механической скоростью производить корректировку направления проведения скважин без снижения механической скорости в условиях ударно–вращательного способа бурения скважин.

Целью диссертационной работы является научное обоснование конструкций породоразрушающего инструмента для повышения производительности процесса бурения скважин и конструкции забойного отклоняющего комплекса для управления направлением скважин в условиях ударно–вращательного способа бурения скважин приложением внецентренных ударных импульсов.

Идея работы заключается в рациональном, научно обоснованном применении внецентренной ударной нагрузки для повышения производительности процесса ударно–вращательного бурения скважин и управления их направлением.

Основные задачи исследований:

1. Обзор и анализ современной техники и технологии ударно–вращательного способа бурения скважин.
2. Обзор и анализ методов повышения производительности процесса ударно–вращательного бурения скважин.
3. Анализ современных технических средств управления направлением скважин в условиях ударно–вращательного способа бурения скважин.
4. Разработка методики проведения экспериментальных работ по изучению механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами.
5. Проведение экспериментальных работ по исследованию производительности процесса разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами.
6. Обработка и анализ полученных в результате экспериментальных работ данных, установление основных зависимостей.
7. Разработка и совершенствование технических средств для повышения производительности процесса ударно–вращательного бурения и управления направлением скважин.

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационного исследования автор опирался на систему регулятивных принципов, приёмов и способов комплекса универсальных (анализ, синтез, обобщение, индукция, дедукция), эмпирических (наблюдение, описание, измерение, эксперимент) и теоретических (мысленный эксперимент, идеализация, формализация) научных методов изучения механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами.

Эмпирические исследования механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами проводились на стенде, выполненном на базе бурового станка СКБ-4 и бурового насоса НБ-3. Обработка результатов опытных исследований выполнялась в соответствии с методами математической статистики по плану полного факторного эксперимента.

Личный вклад автора состоит в обзоре, анализе и обобщении отечественного и зарубежного опыта применения и методов повышения производительности ударно-вращательного способа бурения скважин, постановке задач исследования, а также выполнении теоретических и экспериментальных исследований, обработке и интерпретации их результатов.

Научная новизна:

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена зависимость механической скорости бурения от величины эксцентриситета приложения удара, режимных параметров бурения и физико-механических свойств горных пород в диапазоне 0 – 2 миллиметра, определяющая изменение механизма разрушения и повышение объема разрушения горных пород.

2. Установлена зависимость погрешности ориентации ударника со смещённым центром масс поперечного сечения от его геометрических параметров и режима работы, определяющая точность выполнения работ по управлению направлением скважин в условиях ударно-вращательного бурения скважин с использованием внецентренных ударных импульсов.

Защищаемые научные положения.

1. Внецентренное приложение ударного импульса в сравнении с центральным меняет механизм разрушения горной породы с осевого дробления-скалывания к разрушению при осевом дроблении-скалывании с одновременным скалыванием в тангенциальном направлении, что позволяет при определённых значениях эксцентриситета приложения удара обеспечивать повышение объёма разрушения горной породы и производительности бурения без увеличения энергии ударного импульса.

2. В зависимости от схемы приложения внецентренного ударного импульса – в фиксированной плоскости относительно забоя скважины или равномерно по его периметру возможна реализация технологии направленного бурения и изменения направления скважины или технология бурения без искривления ствола скважины с повышенной производительностью соответственно.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций определяется современным уровнем теоретических исследований, используемым при экспериментальных исследованиях измерительным оборудованием, результатами специально проведённых экспериментальных работ и достаточной сходимостью результатов теоретических и стендовых исследований по изучению механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами, а также их воспроизводимостью и оценкой достоверности результатов с использованием методов математической статистики.

Практическая и теоретическая значимость работы заключается в теоретическом обосновании и практической верификации возможности применения внецентренной ударной нагрузки при бурении ударно-вращательным способом с целью повышения производительности процесса бурения и управления направлением скважин, а также разработке соответствующих технических средств.

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования представлены и обсуждены на XX, XXI, XXII, XXIII и XIV Международных научных симпозиумах имени академика М. А. Усова студентов и молодых учёных «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, ТПУ, 2016, 2017, 2018, 2019 и 2020 гг.), XVI Всероссийской конференции–конкурсе студентов выпускного курса «Проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, СПГУ, 2018 г.), Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, преподавателей и молодых ученых "Актуальные проблемы недропользования 2018" (г. Новочеркасск, ЮРГПУ, 2018 г.), XV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспектива – 2019» (г. Красноярск, СФУ, 2019 г.).

Публикации. По теме диссертационного исследования автором опубликовано 15 научных статей, из которых 1 – в журнале, индексируемом международными базами научного цитирования Web of Science / Scopus, 3 – в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 1 патент РФ на изобретение, 2 патента РФ на полезную модель.

Объём и структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 101 наименования, содержит 118 страниц машинописного текста, 47 рисунков и 8 таблиц.

Благодарность. Автор выражает глубокую признательность и благодарность научному руководителю, доктору технических наук, профессору, члену–корреспонденту РАЕН Нескормных Вячеславу Васильевичу за идейное вдохновение, ценные наставления и всеобъемлющую помощь при выполнении работы и её подготовке к защите, а также коллективу кафедры ТТР ИГДГиГ СФУ за поддержку и ценные замечания.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится общая характеристика работы, обосновывается ее актуальность, определяется цель, идея, задачи и методы их решения, излагаются научная новизна, защищаемые положения и практическая значимость, приводятся сведения об апробации результатов работы и публикационной активности автора.

Первая глава посвящена обзору и анализу современной техники и технологии ударно–вращательного способа бурения скважин, включая обзор и анализ методов повышения производительности процесса ударно–вращательного бурения скважин и рассмотрение современных технических средств управления направлением скважин в условиях ударно–вращательного способа бурения скважин.

Во второй главе приведена методика решения эмпирических и теоретических задач диссертационного исследования, в частности методика изучения механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами для определения зависимости угла перекоса забоя от величины эксцентриситета приложения удара. Приведена методика обработки результатов эмпирических исследований.

В третьей главе представлены теоретические исследования механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами. Выявлены основные факторы, влияющие на формирование величин объёма разрушения горных пород и угла перекоса забоя при внецентренном приложении ударной нагрузки.

Четвёртая глава посвящена обоснованию конструктивных особенностей технических средств, реализующих внецентренное приложение ударных импульсов, таких как породоразрушающий инструмент для повышения объёма разрушения горных пород и отклоняющий комплекс для управления направлением скважин с высокой механической скоростью на основе проведённых теоретических и практических исследований.

В заключении отражены основные выводы и рекомендации, обобщающие основные положения диссертационной работы.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Внецентренное приложение ударного импульса в сравнении с центральным меняет механизм разрушения горной породы с осевого дробления-скалывания к разрушению при осевом дроблении-скалывании с одновременным скалыванием в тангенциальном направлении, что позволяет при определённых значениях эксцентриситета приложения удара обеспечивать повышение объёма разрушения горной породы и производительности бурения без увеличения энергии ударного импульса.

Разрушение горных пород при ударно-вращательном способе бурения скважин производится посредством осевого удара высокой энергии и является сложным многофакторным параметром. Характеризуется высокими значениями энергии удара, малыми значениями частоты вращения бурового инструмента и осевой нагрузки, при этом величина частоты вращения обеспечивает в большей мере перемещение породоразрушающих элементов по забою скважины и оптимальную схему его поражения, а с помощью осевой нагрузки предотвращается отскакивание долота от забоя в процессе бурения.

При разрушении горных пород центральным ударом под породоразрушающими вставками реализуются нормальные, перпендикулярные к плоскости забоя напряжения,

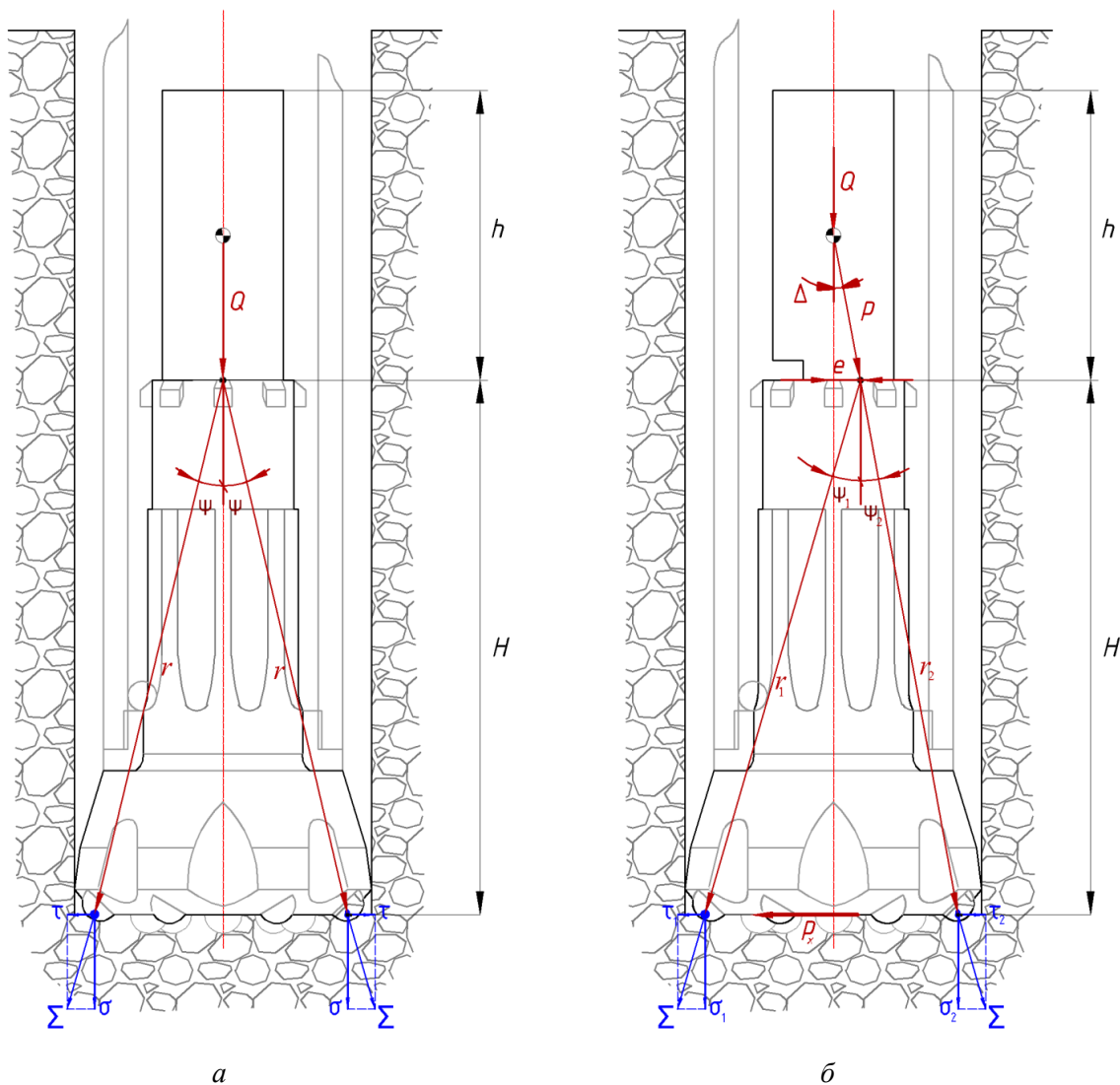


Рисунок 1 – Схема передачи ударных импульсов и создания напряжений под породоразрушающими вставками при точечном ударе:
а – центральный удар; б – внецентренный удар

разрушение пород производится путём смятия и дробления ударами высокой энергии, а тангенциальные сдвиговые усилия в силу симметричности удара компенсируют друг друга (рисунок 1 а). В то же время при нанесении удара с некоторым эксцентриситетом меняется механизм разрушения горной породы – удар становится несимметричным относительно породоразрушающего инструмента ($r_1 \neq r_2$), вследствие чего тангенциальные сдвиговые усилия на породоразрушающих вставках перестают компенсировать друг друга. Это приводит к смещению резцов вдоль забоя скважины и формированию тангенциальных сдвиговых усилий, действующих в плоскости забоя, дополняя нормальные (рисунок 1 б).

В рамках диссертационной работы проанализированы, доработаны и уточнены теоретические положения исследования проф. Нескоромных В.В., в частности рассмотрен и уточнён вопрос формирования напряжений под породоразрушающими вставками при точечном ударном приложении нагрузки (считая тело долота и породоразрушающей вставки упругим, однородным и изотропным):

$$\sigma_i = \frac{3Q \cdot \cos^2 \Psi_i \cdot \cos^2 \Delta}{2\pi r_i^2}, \quad (1)$$

где Q – вес ударника, Н; ψ – угол между осью инструмента и направлением распространения ударного импульса по породоразрушающему инструменту, град; Δ – угол между осью инструмента и направлением ударного импульса, передаваемого ударником породоразрушающему инструменту, град; r_i – расстояние от точки приложения ударного импульса к породоразрушающему инструменту до контакта индентор – порода, м.

Таким образом, согласно зависимости (1) при центральном ударе напряжения под породоразрушающими вставками равны, что создаёт условия для получения достаточно симметричных лунок разрушения одного размера. В случае внецентренного приложения ударного импульса напряжения под породоразрушающими вставками не равны, их максимальные значения наблюдаются под теми вставками, которые расположены со стороны точки приложения удара. При этом максимальные значения напряжений при внецентренном ударе выше, а минимальные существенно ниже уровня напряжений, получаемых при центральном ударе, для которого характерно их равенство.

Установлено, что в случае разрушения горных пород вставками сферической формы, которыми оснащаются штыревые буровые долота, будет справедливо соотношение

$$\frac{4P_i}{\pi d^2} = \frac{3Q \cdot \cos^2 \psi_i \cdot \cos^2 \Delta}{2r_i^2}, \quad (2)$$

где d – диаметр пятна контакта сферы торца породоразрушающей вставки с породой, мм²; P_i – нормальное усилие на породоразрушающей вставке, формирующей лунку разрушения, Н.

Значение d определяется из зависимости Г. Герца:

$$d = 1,144 \sqrt[3]{P_i R \cdot \left(\frac{4}{E_1} (1 - \mu_1^2) + \frac{4}{E_2} (1 - \mu_2^2) \right)}, \quad (3)$$

где R – радиус сферы торца твердосплавной вставки, м; E_1 , E_2 – модули упругости материала твердосплавной вставки и породы, Па; μ_1 , μ_2 – коэффициенты Пуассона для материала твердосплавной вставки и породы.

Учитывая, что модуль упругости E_1 для твёрдого сплава величина во многом превышающая E_2 для горной породы, а также малость величины μ_2^2

$$d = 1,144 \sqrt[3]{\frac{4P_i \cdot R}{E}} = 1,82 \sqrt[3]{\frac{P_i \cdot R}{E}}, \quad (4)$$

где E – модуль упругости горной породы, Па.

Исходя из формул (1)–(4) зависимость для определения нормального усилия воздействия породоразрушающей вставки на горную породу

$$P_i = 1,95 \sqrt[3]{\frac{Q \cdot \cos^2 \psi_i \cdot \cos \Delta \cdot R^{\frac{2}{3}}}{r_i^2 \cdot E^{\frac{2}{3}}}}. \quad (5)$$

Исходя из того, что глубина лунки разрушения определяется как

$$h = \frac{2P_i}{C}, \quad (6)$$

то выражение для определения глубины лунки разрушения

$$h = \frac{3,9}{C} \sqrt[3]{\frac{Q \cdot \cos^2 \psi_i \cdot \cos \Delta \cdot R^{\frac{2}{3}}}{r_i^2 \cdot E^{\frac{2}{3}}}}, \quad (7)$$

где C – жесткость взаимодействующей породоразрушающей вставки и породы, даН/м.

Анализ полученной зависимости позволяет определить основные влияющие факторы на величину глубины лунок разрушения ударными импульсами. Одним из главных является r_n – расстояние от точки приложения ударного импульса к породоразрушающему инструменту до контакта индентор–горная порода.

В случае внецентренного приложения ударных импульсов также необходимо отметить факт снижения силы удара при росте величины эксцентриситета приложения ударного импульса:

$$P = Q \cdot \cos \Delta = \frac{Qh_1}{2\sqrt{e^2 + \left(\frac{h_1}{2}\right)^2}}, \quad (8)$$

где Q – вес ударника, Н; h_1 – высота ударника, м; e – эксцентриситет приложения удара.

Тангенциальное усилие, действующее в плоскости торца породоразрушающего инструмента вследствие нанесения внецентренного ударного импульса и неравенства тангенциальных сдвиговых усилий на породоразрушающих элементах, растёт при увеличении эксцентриситета приложения удара:

$$P_x = \frac{2P \cdot e}{\sqrt{4e^2 + H^2}} = \frac{Q \cdot e}{\sqrt{(4e^2 + H^2) \cdot \left(e^2 + \frac{h_1^2}{4}\right)}}, \quad (9)$$

где H – высота породоразрушающего инструмента, м.

Согласно полученной зависимости, величина отклоняющей силы прямо пропорциональна силе удара и эксцентриситету приложения ударного импульса, при этом обратно пропорциональна высоте породоразрушающего инструмента (кратчайшему расстоянию от точки приложения внецентренного ударного импульса до забоя скважины). Следовательно, наиболее эффективное применение механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами возможно в условиях пневмоударного бурения, имеющего большую энергию удара, а также сравнительно небольшое расстояние от точки его приложения до забоя скважины.

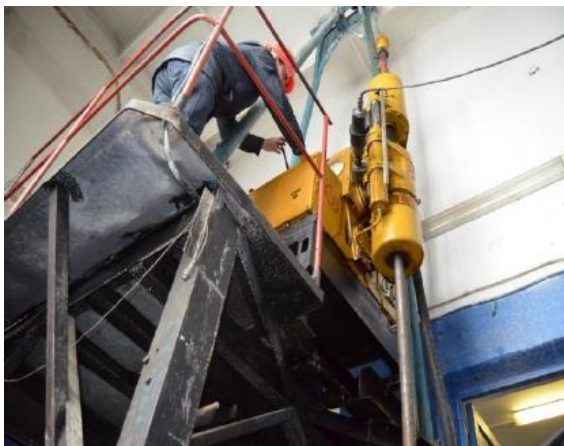


Рисунок 2 – Стенд для проведения экспериментальных работ на базе станка СКБ-4

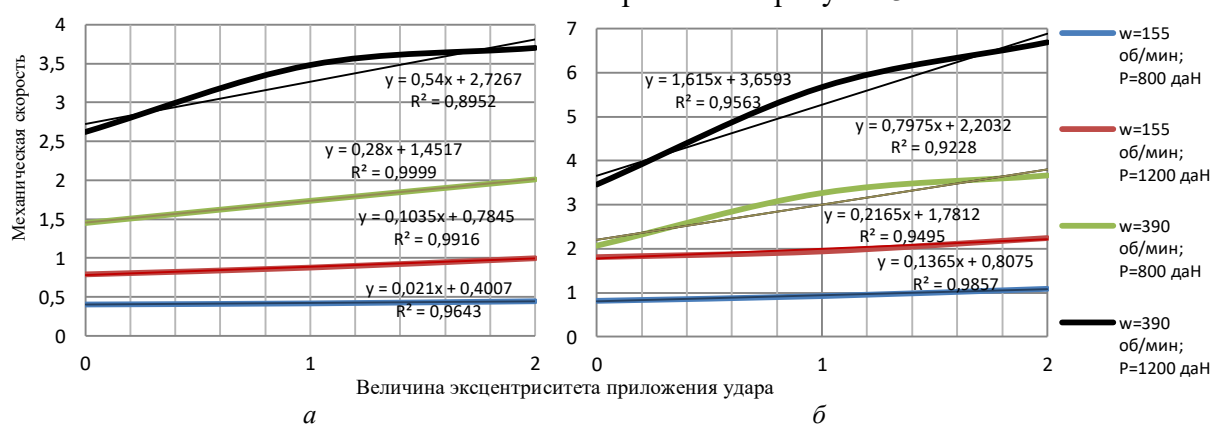


Рисунок 3 – Зависимость механической скорости от величины эксцентриситета приложения удара при разрушении: а – долерита; б – мрамора

Проведённые экспериментальные исследования позволили сформировать следующие основные выводы:

- максимальные величины механической скорости бурения долерита и мрамора зафиксированы при максимальных величинах осевой нагрузки и частоты вращения бурового инструмента независимо от величины эксцентриситета приложения ударного импульса;
- при увеличении эксцентриситета приложения ударного импульса на интервале от 0 до 2 миллиметров без изменения технологических параметров механическая скорость бурения долерита и мрамора перманентно возрастает;
- отмечено большее влияние величины осевой нагрузки на механическую скорость бурения долерита и мрамора, нежели частоты вращения снаряда;
- интенсивность роста величины механической скорости бурения долерита и мрамора при увеличении эксцентриситета приложения ударных импульсов увеличивается с интенсификацией режимных параметров;
- увеличение эксцентриситета приложения удара на всём диапазоне интервала от 0 до 2 миллиметров при различных сочетаниях режимных параметров приводит к увеличению механической скорости бурения долерита и мрамора с определённой эффективностью;
- большая интенсивность роста механической скорости бурения при увеличении эксцентриситета приложения удара в интервале от 0 до 2 миллиметров наблюдалась для имеющего более низкие прочностные характеристики относительно долерита мрамора, независимо от реализуемого сочетания режимных параметров.

– на выбор оптимальной величины эксцентриситета приложения удара влияет тип разрушаемой горной породы – в породах твёрдых, оказывающих большое сопротивление тангенциальному смещению породоразрушающих элементов, будет более эффективно применение малых величин эксцентриситета, в то время как при разрушении пород более мягких, по тому же принципу, больший эффект будет достигнут при повышенном эксцентриситете приложения ударного импульса.

– отмечено, что и для долерита, и для мрамора, различных по физико–механическим свойствам горных пород, больший прирост механической скорости реализуется на интервале изменения эксцентриситета приложения удара от 0 до 1 миллиметра.

2. В зависимости от схемы приложения внецентренного ударного импульса – в фиксированной плоскости относительно забоя скважины или равномерно по его периметру возможна реализация технологии направленного бурения и изменения направления скважины или технология бурения без искривления ствола скважины с повышенной производительностью соответственно.

В ходе теоретических и экспериментальных исследований установлено, что при центральном ударе напряжения под породоразрушающими вставками равны, что создаёт условия для получения достаточно симметричных лунок разрушения одного размера (рисунок 4 а). При внецентренном ударе $\sigma_z^1 > \sigma_z^2$ (рисунок 1 б), что определяет неравномерность разрушения породы, возникновение результирующего тангенциального усилия в плоскости забоя и может при условии ориентированного нанесения внецентренных ударных импульсов вызывать искривление скважины. В случае нанесения внецентренных ударных импульсов равномерно по периметру забоя искривление скважины исключается.

Увеличение производительности разрушения горных пород при определённых величинах эксцентриситета приложения удара в большей степени связано с изменением механизма разрушения горных пород. При ударном разрушении горных пород с нулевым эксцентриситетом (центральный удар) реализуется осевое вдавливание индентора, смятие и разрушение породы. При появлении эксцентриситета к осевому усилию, действующему перпендикулярно плоскости забоя, добавляется тангенциальная составляющая, действующая в её плоскости, тем самым способствуя сколу части массива горной породы. Этому обстоятельству свидетельствуют формы лунок разрушения при приложении

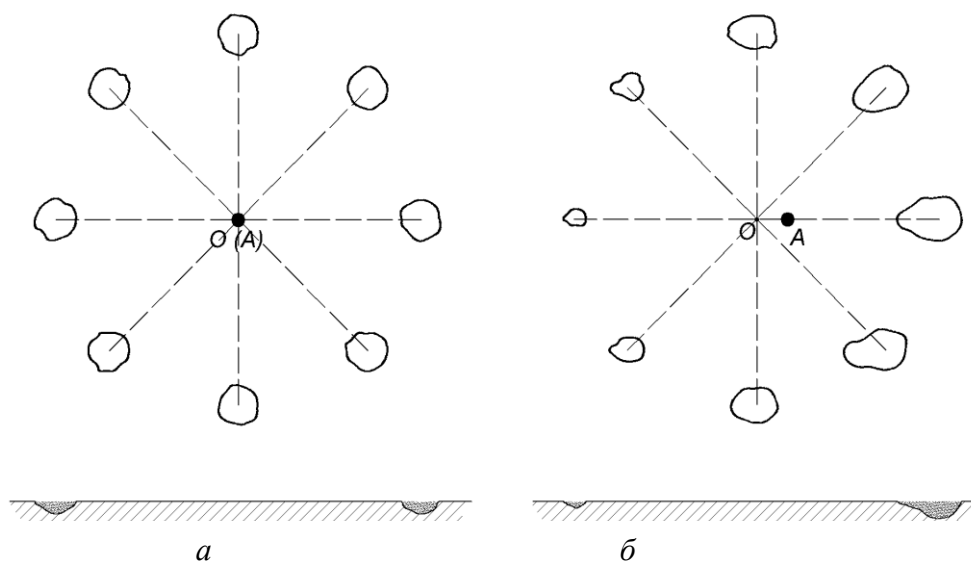


Рисунок 4 – Формы лунок разрушения при нанесении: а – центрального удара, б – внецентренного; О – проекция оси породоразрушающего инструмента, А – проекция точки приложения ударного импульса

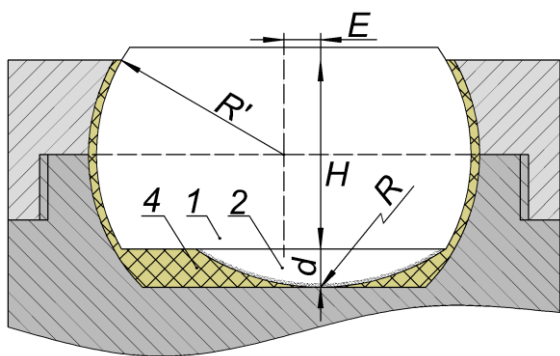


Рисунок 5 – Торговая шайба

2018118680; заявл. 21.05.2018; опубл. 21.03.2019].

Для передачи внецентренного ударного импульса конструкция оснащена торговой шайбой 1, имеющей эксцентрично расположенный на нижнем торце выступ 2 (рисунок 5), посредством которого осуществляется преобразование центрального ударного импульса, воспринимаемого шайбой верхним торцом, во внецентренный, передаваемый далее хвостовику долота 5 (рисунок 6). При этом заполнение пространства между торговой шайбой и её посадочным местом в хвостовике долота 5 упругим материалом 4 позволит уменьшить её колебания при передаче ударного импульса и вероятность перекоса торговой шайбы после некоторого количества циклов передачи ударного импульса.

Следует отметить, что в вопросе внецентренной передачи ударных импульсов важную роль играет деструктивный изгибающий момент, отрицательно влияющий на работоспособность и долговечность конструкции. В целях борьбы с данным явлением торговая шайба выполнена с возможностью поворота относительно оси, перпендикулярной оси долота, что позволит исключить деструктивный изгибающий момент при передаче внецентренного ударного импульса. Торговая шайба закрепляется на хвостовике долота путём навинчивания фиксирующей шайбы 3 (рисунок 6).

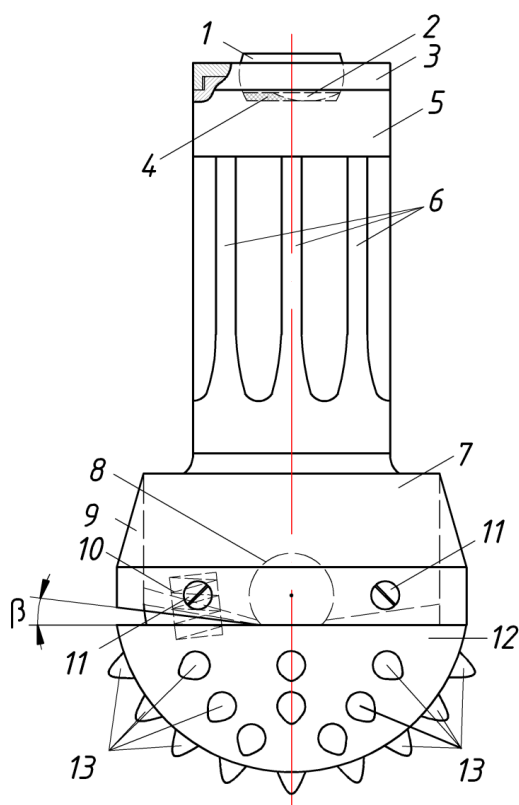


Рисунок 6 – Схема долота для ударно-вращательного бурения

внецентренного удара, которые имеют вытянутую овальную форму (рисунок 4 б).

Для реализации механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами с целью повышения производительности процесса бурения ведётся разработка конструкции породоразрушающего инструмента [Буровое долото для ударно-вращательного бурения : пат. 2682824 Рос. Федерация : МПК⁷ E 21 В 10/36 / Нескоромных В.В., Головченко А.Е. ; заявитель и патентообладатель Сиб. федер. ун-т – №

С целью повышения прочности и долговечности эксцентричного выступа 2 торговой шайбы 1 может быть применено упрочнение его поверхности закалкой токами высокой частоты, что позволит повысить твёрдость поверхности выступа, в то же время под твёрдой закалённой поверхностью останутся вязкие незакалённые слои металла, что уменьшит хрупкость, повысит износостойкость и циклическую прочность. А выполнение эксцентричного выступа 2 на нижнем торце торговой шайбы 1 в виде шарового сегмента радиусом

$$R = \frac{\left(\sqrt{R'^2 - \left(\frac{H}{2} \right)^2} - E \right)^2 + d^2}{2d} \quad (10)$$

позволит добиться нанесения удара с заданной, неизменной при износе в ходе работы величиной эксцентриситета приложения точечного удара при различных величинах высоты и радиуса шарового слоя торговой шайбы и высоты сегмента (рисунок 5) [Буровое

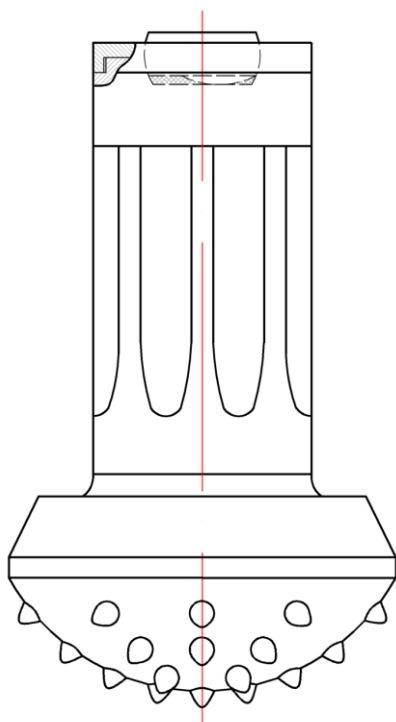


Рисунок 7 – Схема долота для ударно-вращательного бурения твёрдых горных пород

долото для ударно–вращательного бурения : пат. 191770 Рос. Федерация : МПК⁷ Е 21 В 10/36 / Нескормных В. В., Головченко А. Е. ; заявитель и патентообладатель Сиб. федер. ун-т – № 2019115771; заявл. 22.05.2019 ; опубл. 21.08.2019].

Головка долота состоит из подвижной 12 и неподвижной 7 частей. Внецентренный ударный импульс, сообщенный хвостовику торовой шайбой, передаётся головке, вызывая поворот её подвижной полусферической части в плоскости нанесения внецентренного удара на некоторый угол. Подвижная и неподвижная части головки долота связаны шарнирным элементом 8, а поддержание подвижной части головки долота в исходном положении и её возврат в него после окончания цикла разрушения производится с помощью упругого элемента 10. Для разрушения пород на забое подвижная часть головки содержит породоразрушающие элементы 13. Сборка подвижной и неподвижной частей головки бурового долота производится с помощью закрепления цилиндрической шайбы 9 на неподвижной части головки долота болтами 11. Поворот подвижной полусферической части головки долота увеличивает амплитуду тангенциального смещения

породоразрушающих элементов, что приводит к изменению формы лунок разрушения, повышению их размеров и обеспечивает отделение от забоя части массива горной породы, которая испытала разрушающее действие, разделена трещинами, но ещё удерживается в лунках разрушения силами своих внутренних связей.

Оптимальной областью применения долота для ударно–вращательного бурения разработанной конструкции (рисунок 6) – средне–твёрдые хрупкие породы, в том числе достаточно пластичные. В то же время если требуется разрушение пород, имеющих несколько более высокие прочностные показатели, то в таком случае нет необходимости в больших тангенциальных смещениях породоразрушающих элементов. Конструкция долота (рисунок 6) значительно упрощается, лишаясь шарнирного элемента, связывающего подвижную и неподвижную части головки долота, упругого элемента, цилиндрической шайбы, болтов (рисунок 7). Головка долота становится монолитной, что положительно сказывается на её прочностных характеристиках, при этом тангенциальные смещения породоразрушающих элементов сохраняются, имея меньшую амплитуду.

С целью реализации технологии направленного бурения скважин в рамках диссертационного исследования проведена модернизация забойного ударного механизма, обеспечивающего набор кривизны за счёт приложения к породоразрушающему инструменту внецентренных ударных импульсов (рисунок 8) [пат. РФ №2039185].

Сущность способа изменения направления скважины состоит в том, что внецентренное точечное приложение ударов со стороны ударника по породоразрушающему инструменту обеспечивает неравномерное разрушение забоя. Неравномерность разрушения забоя, а именно различная глубина внедрения породоразрушающих вставок в породу создают угол перекоса забоя скважины, что и определяет направление искривления. Таким образом, способ направленного бурения приложением внецентренных ударных импульсов состоит в том, что для набора кривизны определённого направления удары следует наносить по породоразрушающему инструменту со стороны, противоположной направлению искривления.

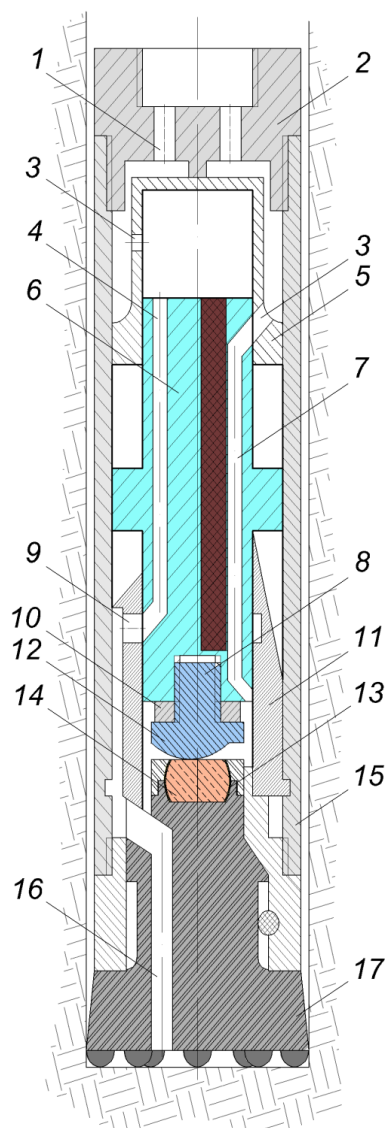


Рисунок 8 – Схема конструкции отклоняющего комплекса для ударно-вращательного бурения

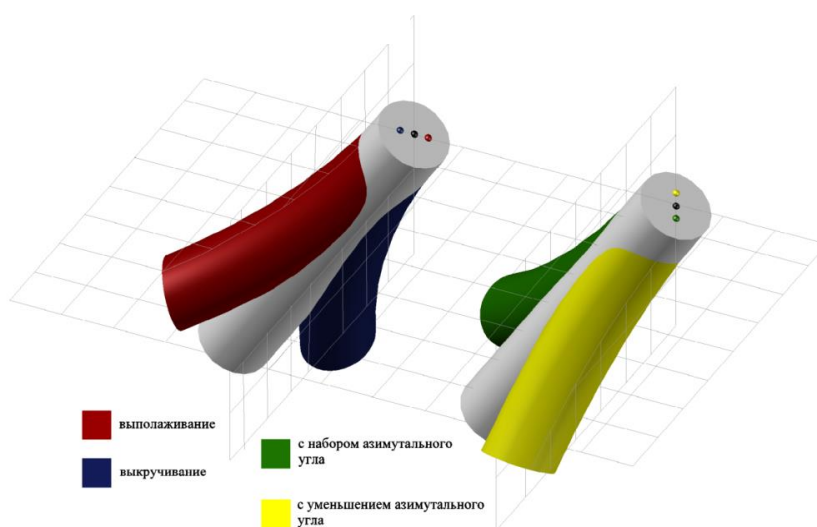


Рисунок 9 – Схема формирования нового направления скважины при реализации механизма разрушения горных пород внецентренными ударами импульсами

Принцип работы забойного ударного механизма. Через бурильные трубы под давлением подается сжатый воздух, попадающий внутрь корпуса 15 через каналы 1 в переходнике 2, и затем по отверстиям 3 в гильзе 5 и каналу 7 в ударнике 6 попадает под торец пяты 8, поднимая ударник 6 в крайнее верхнее положение. Воздух, одновременно двигаясь по каналам 4 и 7, попадает через отверстие 9 в гильзе 11 и канал 16 под торец породоразрушающего инструмента 17, очищая забой скважины. Перекрытие канала 4 при перемещении ударника 6 в верхнее положение, обеспечивает рост давления воздуха над ним, вследствие чего ударник воздействует на породоразрушающий инструмент 17 посредством выступа 12, эксцентрично расположенного на нижнем торце пяты 8, зафиксированной на ударнике контргайкой 10, одновременно производя выхлоп воздуха на забой по каналу 4, отверстию 9 и каналу 16.

При этом с целью исключения деструктивного изгибающего момента передача удара осуществляется через торовую шайбу 14, имеющую возможность поворота относительно оси, перпендикулярной оси механизма. Пространство между торовой шайбой 14 и её посадочным местом заполнено упругим материалом 13. Данное техническое решение защищено патентом №191770.

Ударник 6 размещен свободной посадкой в корпусе 15 и гильзах 5, 11 и выполнен со смещенным центром тяжести поперечного сечения для осуществления его самоориентирования относительно апсидальной плоскости скважины. На торце ударника установлена пята 8 с возможностью установочного поворота относительно оси механизма и центра тяжести ударника. На торце пяты выполнен эксцентричный выступ 12 относительно оси ударника и породоразрушающего инструмента 17 для нанесения внецентренного точечного удара. Для

изменения направления скважины

пятя ориентируется

эксцентричным выступом относительно центра

тяжести ударника на угол ориентации таким образом,

чтобы удары по породоразрушающему

инструменту наносились со стороны, противоположной направлению искривления.

Интенсивность искривления регулируется величиной эксцентриситета выступа

путем замены пяты.

Поскольку выступ 12 расположен эксцентрично,

то и удар по породоразрушающему инструменту 17 наносится эксцентричный, что способствует неравномерному разрушению забоя и обеспечивает набор кривизны.

Управление интенсивностью набора кривизны производится с помощью изменения величины эксцентриситета приложения удара, при этом интенсивность набора кривизны находится в линейной зависимости от величины эксцентриситета приложения удара. В то же время управление направлением скважины производится путём изменения точки приложения внецентренного ударного импульса относительно апсидальной плоскости (рисунок 9).

С целью нанесения ударов с заданной, неизменной при износе в ходе работы величиной эксцентриситета приложения удара при различных величинах радиуса пяты и высоты сегмента радиус выступа на нижнем торце пяты описывается следующим выражением (рисунок 10):

$$R = \frac{(R' - e)^2}{2d} + \frac{d}{2}. \quad (11)$$

Область применения представленного отклоняющего комплекса – наклонные скважины различного целевого назначения с зенитным углом более 3° . Данное ограничение связано с принципом ориентации пяты с эксцентрично расположенным на её нижнем торце выступом, расположенной на ударнике со смещённым центром масс поперечного сечения и принимающей положение, соответствующее нахождению центра масс в апсидальной плоскости скважины под действием силы тяжести.

Ключевым аспектом работоспособности забойного механизма является самоориентация ударника со смещённым центром масс поперечного сечения в наклонных скважинах по принципу работы самоориентаторов типа ОП. К характерным особенностям работы ударника в забойной машине можно отнести отсутствие контакта со стенками скважины, вращение корпуса забойной машины (с частотой вращения в пределах $1-2 \text{ с}^{-1}$), а также необходимость ориентации в условиях ударно-вибрационного характера работы. В процессе работы на ударник действуют момент смещения, ориентирующий его в процессе работы в положение, соответствующее нахождению центра масс поперечного сечения в апсидальной плоскости, и момент трения, препятствующий смещению и формирующий погрешность ориентирования ударника со смещённым центром масс (рисунок 11).

С учётом характерных особенностей работы ударника и его ускоренного движения, периодически разгоняющегося из положения, когда скорость его движения равна нулю, до

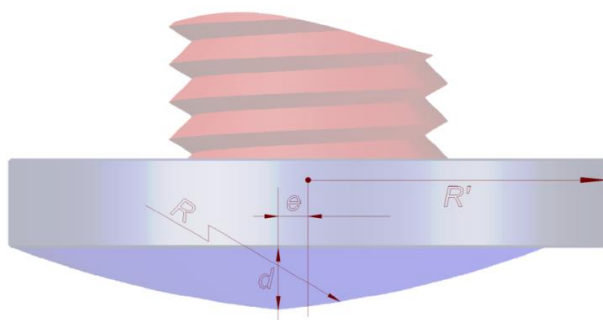


Рисунок 10 – Геометрические параметры пяты с внецентренно расположенным выступом

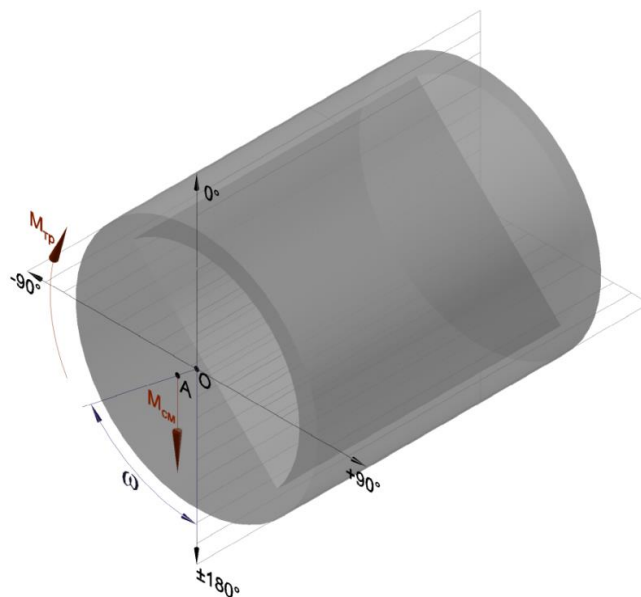


Рисунок 11 – Схема, поясняющая процесс формирования погрешности ориентирования ударника со смещённым центром масс

максимальной скорости, предшествующей удару величина погрешности ориентирования $\Delta\omega_0$ определяется как

$$\Delta\omega_0 = \arcsin \left(\frac{u \cdot \mu \cdot t_{уд} \cdot R_B}{t_{ц} \cdot \sqrt{v^2 + u^2 + 2v \cdot u \cdot \cos J} \left(\frac{1}{e} + \frac{\omega^2}{g \cdot \sin \theta} \right)} \right), \quad (12)$$

где v, u – скорости движения ударника и корпуса забойной машины, м/с; μ – коэффициент трения скольжения между ударником и корпусом забойной машины в состоянии покоя; $t_{уд}$ – длительность удара, с; J – угол встречи вектора ударной нагрузки с породоразрушающим инструментом, град; θ – зенитный угол скважины, град; R_B – радиус ударника, м; ω – частота вращения забойной ударной машины, с⁻¹; g – ускорение силы тяжести, м/с²; $t_{ц}$ – время движения ударника из верхней точки рабочего хода в нижнюю, с.

Повышение точности ориентирования ударника со смещённым центром масс может осуществляться покрытием из твёрдого пористого металла наружной поверхности ударника и внутренней поверхности верхней и нижней гильз, а также внутренней поверхности корпуса [Устройство для направленного ударно-вращательного бурения : пат. 172743 Рос. Федерация : МПК ⁷ E 21 В 7/06, E 21 В 7/00, E 21 В 4/14 / Нескоромных В.В., Головченко А.Е. ; заявитель и патентообладатель Сиб. федер. ун-т – № 2017110940 ; заявл 31.03.2017 ; опубл. 21.07.2017, Бюл. №21]. Данное покрытие позволит дополнительно уменьшить момент трения между внутренней поверхностью корпуса, верхней и нижней гильз и наружной поверхностью ударника, а также более эффективно применять смазывающие добавки, концентрирующиеся в порах на поверхности конструктивных элементов отклоняющего комплекса.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

На основании проведённых теоретических и экспериментальных исследований получены следующие основные научные результаты, выводы и рекомендации:

1. Повышение производительности процесса ударно–вращательного бурения скважин возможно путём дезориентированного приложения ударных импульсов с эксцентриситетом, причём для каждого сочетания физико-механических свойств горной породы и параметров ударной системы оптимальная величина эксцентриситета будет индивидуальна.

2. Изменение направления скважин в условиях ударно–вращательного бурения возможно путём нанесения ориентированной внецентренной ударной нагрузки, причём удары необходимо наносить со стороны, противоположной направлению искривления.

3. Установлено, что в случае внецентренного приложения ударных импульсов наблюдается некоторое снижение силы удара при росте величины эксцентриситета приложения удара.

4. Установлена прямая зависимость величины тангенциального усилия, действующего в плоскости забоя от величины эксцентриситета приложения удара вследствие нанесения внецентренного ударного импульса и неравенства тангенциальных сдвиговых усилий на породоразрушающих элементах.

5. Получены зависимости для определения глубины лунок разрушения, погрешности ориентирования ударника со смещённым центром масс поперечного сечения и интенсивности искривления скважин в условиях ударно-вращательного бурения внецентренными ударными импульсами.

6. Установлено повышение механической скорости бурения долерита при увеличении эксцентриситета приложения ударных импульсов в интервале 0–2 мм на 41 %.

7. Установлено повышение механической скорости бурения мрамора при увеличении эксцентриситета приложения ударных импульсов в интервале 0–2 мм на 93 %.

8. Для различных по физико-механическим свойствам долерита и мрамора наибольший прирост механической скорости зафиксирован на интервале изменения эксцентриситета приложения удара от 0 до 1 миллиметра.

9. Разработаны конструкции породоразрушающего инструмента и отклоняющего комплекса, учитывающие особенности передачи внецентренных ударных импульсов и разрушения горных пород ими.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, индексирующихся в международных базах данных Web of Science/Scopus:

1. Нескоромных В.В., Головченко А.Е. Экспериментальное исследование процесса разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами при ударно-вращательном бурении // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т.331. – №1. – С. 135-147.

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

2. Нескоромных В.В., Головченко А.Е., Попова М.С. Модернизация породоразрушающего инструмента для ударно-вращательного бурения, реализующего внецентренное приложение ударных импульсов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2019. – №5. – С. 64-69.

3. Нескоромных В.В., Головченко А.Е. Анализ работоспособности и модернизация отклоняющего комплекса на базе забойной ударной машины // Известия вузов. Горный журнал. – 2020. – №2. – С. 5-16.

4. Нескоромных В.В., Попова М.С., Головченко А.Е. Применение материалов нового поколения в качестве элементов современного породоразрушающего инструмента // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2019. – № 10. – С. 15–20.

Патенты:

5. Патент на изобретение № 2682824 Российская Федерация, МПК E21B 10/36 (2006.01). Буровое долото для ударно-вращательного бурения : № 2018118680 : заявл. 21.05.2018 : опубл. 21.03.2019 / Нескоромных В. В., Головченко А. Е. ; заявитель СФУ. – 6 с. : ил.

6. Патент на полезную модель № 172743 Российская Федерация, МПК E21B 7/06 (2006.01), E21B 7/00 (2006.01), E21B 4/14 (2006.01). Устройство для направленного ударно-вращательного бурения : № 2017110940 : заявл. 31.03.2017 : опубл. 21.07.2017 / Нескоромных В. В., Головченко А. Е. ; заявитель СФУ. – 5 с. : ил.

7. Патент на полезную модель № 191770 Российская Федерация, МПК E21B 10/6 (2006.01). Буровое долото для ударно-вращательного бурения : № 2019115771 : заявл. 22.05.2019 : опубл. 21.08.2019 / Нескоромных В. В., Головченко А. Е. ; заявитель СФУ. – 6 с. : ил.