

На правах рукописи

Реготунов Андрей Сергеевич

**ВЫЯВЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ СКАЛЬНЫХ ГОРНЫХ
ПОРОД БУРОВЫМИ КОРОНКАМИ ШТЫРЕВОГО ТИПА**

Специальность 25.00.20 – Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Екатеринбург – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук» (ИГД УрО РАН)

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор

КОРНИЛКОВ Михаил Викторович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», кафедра
«Технология и техника разведки месторождений полезных
ископаемых», заведующий кафедрой

НЕСКОРОМНЫХ Вячеслав Васильевич

кандидат технических наук
старший научный сотрудник, ФГБУН ИПКОН РАН, отдел проблем
геомеханики и разрушения горных пород №5

ЕФРЕМОВЦЕВ Никита Николаевич

Ведущая организация –

ФГБУН «Институт горного дела Сибирского отделения Российской академии наук» (г. Новосибирск)

Защита состоится «21» декабря 2016 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 004.010.02 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук» (ИГД УрО РАН) по адресу: 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИГД УрО РАН и на сайте www.diss.igduran.ru

Автореферат диссертации разослан «___» октября 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н.

Панжин А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Для бурения шпуров и скважин в скальных горных породах на горнодобывающих предприятиях применяется ударно-поворотный способ бурения. Прогрессивным при этом способе бурения является коронка штыревого типа, разрушающая породу забоя воздействием твердосплавных штырей (инденторов), размещенных на рабочей поверхности.

Буровая техника и инструмент постоянно совершенствуются – применяются новые более прочные конструкционные материалы, улучшается качество твердого сплава, возрастает энергия единичного удара. Однако анализ применения современного отечественного бурового инструмента в скальных горных породах свидетельствует о его недостаточной эффективности, выражающейся в необоснованно завышенном потреблении энергии удара на единицу объема разрушаемой породы. Снижение доли разрушаемой породы за счет действия деформации сжатия является одним из важных резервов повышения эффективности проходки шпуров и скважин в скальных горных породах. Создание условий, при которых повышается доля породы, разрушенной сколом, гарантирует уменьшение энергоемкости бурения, так как предел прочности породы при скалывании на порядок меньше предела прочности породы при сжатии. В связи с этим исследования закономерностей процесса разрушения скальных горных пород буровыми коронками штыревого типа являются актуальными.

В основу диссертационной работы положены результаты исследований, выполненных в ИГД УрО РАН в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России (госконтракт №02-740.11.0317).

Объект исследований. Скальные горные породы, разрушаемые буровыми коронками штыревого типа при ударно-поворотном способе бурения.

Предмет исследования. Пространственные и энергетические параметры разрушения скальной горной породы ударом и их взаимосвязи.

Цель работы. Выявить экспериментальные закономерности разрушения скальных горных пород ударом инденторами и на этой основе установить их рациональное расположение и энергию удара, позволяющие повысить объем разрушения и снизить энергоемкость ударно-поворотного способа бурения.

Идея работы. На основе обобщения и анализа экспериментальных данных методом нелинейной функционально-факторной регрессии проводится с повышенной достоверностью выявление закономерностей распределения напряжений и объема разрушений скальной горной породы.

Защищаемые научные положения:

1 Относительные касательные напряжения в скальной горной породе при ударах инденторами в области между ними и в области, прилегающей к поверхности скола, по мере удаления от них инденторов уменьшаются согласно экспериментально установленным экспоненциальным зависимостям с коэффициентом детерминации 0,99 и соответствующими длинами релаксации 0,85 и 9,17, выраженными с учетом положения асимптот напряжений в относительных долях диаметра индентора.

2 Установлено, что наибольший объем разрушений под инденторами, обусловленный вертикальной ударной нагрузкой в положениях точек удара одного индентора вблизи от поверхности скола, составляет 61 %, а двух инденторов в удалении от нее 85 %, зависит от энергии удара и в интервале ее изменения от 16 до 80 Дж выражается степенной функцией с показателями 1,8 и 1,33. Остальной объем разрушений, находящийся вблизи от поверхности скола и в пространстве горной породы между инденторами, происходит сколом под воздействием боковых нагрузок и выражается функцией гауссовой формы с локальным максимумом.

Новизна работы состоит в следующем:

1 Установлены закономерности изменения относительных касательных напряжений в скальной горной породе для области пространства между инденторами, а также для области, прилегающей к краю свободной поверхности скола в зависимости от расстояния до инденторов.

2 Впервые установлены закономерности изменения объема разрушенной скальной горной породы для положения точек удара двух инденторов в удалении от свободной поверхности скола и одиночным индентором вблизи от нее в зависимости от относительного расстояния и энергии удара для первого положения точек удара, от расстояния от индентора до поверхности скола и энергии удара для второго положения точек удара. Это позволяет установить по критерию минимальной энергоемкости рациональные режимы ударного нагружения в процессе ударно-поворотного способа бурения шпуров (скважин) в скальных горных породах.

3 Научно обоснована методика расчета точек размещения инденторов на рабочей поверхности буровой коронки и определения основных параметров режима бурения, совместно обеспечивающих снижение энергоемкости при ударно-поворотном бурении шпуров и скважин в скальных горных породах.

Практическое значение работы заключается в разработке методики определения рационального размещения инденторов на рабочей поверхности буровой коронки штыревого типа, учитывающей возможность создания

дополнительных напряжений и объемов разрушения скальной горной породы при создании рациональной ударной нагрузки по забой шпура (скважины). Установленные результаты могут быть применены при разработке новых и совершенствовании применяемых конструкций бурового инструмента штыревого типа.

Задачи диссертационной работы:

1 Анализ результатов исследования механизма разрушения скальных горных пород при ударно-поворотном бурении шпуров и скважин коронкой штыревого типа.

2 Разработка последовательности экспериментов по измерению и оценке пространственного распределения напряжений и объемов разрушений в зависимости от различных режимов ударного нагружения скальных горных пород.

3 Моделирование пространственного распределения напряжений, объемов разрушений скальных горных пород и выявление закономерностей их изменения.

4 Разработка методики расчета точек рационального размещения инденторов на рабочей поверхности буровой коронки штыревого типа и определения основных параметров режима бурения, обеспечивающих эффективное разрушение забоя в процессе бурения шпура (скважины) в скальных горных породах.

Методы исследования включают анализ научно-технической литературы, физическое моделирование, натурные эксперименты, методы математической статистики.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждена корректностью постановки задач, сходимостью экспериментальных данных и результатов физического моделирования, экспериментальными исследованиями, выполненными в достаточном объеме с оценкой полученных результатов методами математической статистики.

Личный вклад автора состоит в постановке задач исследования, разработке схемы и проведении экспериментальных исследований, выполнении аналитических исследований, обосновании научных положений, формулировании выводов и рекомендаций по работе.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных научных конференциях «Неделя горняка», МГГУ, г. Москва (2007, 2010, 2012 гг.), на молодежных научно-практических конференциях ИГД УрО РАН (2009, 2010, 2012 гг.), Уральском горнопромышленном форуме (г. Екатеринбург 2009, 2011, 2015 гг.), научно-технических конференциях по буровзрывным работам (2012, 2013, 2014, 2015 гг.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 12 печатных

работах, в т.ч. 4 в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Объем и структура работы. Диссертация изложена на 160 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 121 наименования, 2 приложений; включает 71 рисунок и 17 таблиц.

Практическая реализация работы заключается в использовании методики определения точек рационального размещения инденторов на рабочей поверхности бурового инструмента штыревого типа в АО «Кировградский завод твердых сплавов» для создания бурового инструмента штыревого типа.

Автор выражает благодарность научному руководителю доктору технических наук, профессору М.В. Корнилкову, сотрудникам ИГД УрО РАН, лично кандидату технических наук Р.И. Сухову, коллективам инженерно-технических работников ОАО «Ураласбест», ОАО «Сибирский гранитный карьер», ОАО «Шабровский тальковый комбинат», своим родителям за оказанную поддержку при проведении диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрено современное состояние техники и инструмента для ударно-поворотного способа бурения шпуров и скважин. Выполнен анализ закономерностей разрушения скальных горных пород буровым инструментом и анализ факторов, влияющих на эффективность ударных способов бурения, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

В настоящее время известно свыше 50 способов бурения шпуров и скважин, однако более 90% горной массы бурится механическими способами. В скальных горных породах для проходки шпуров и скважин широко применяется ударно-поворотный способ. При этом способе в скальных горных породах наиболее эффективны буровые коронки штыревого типа, позволяющие передавать значительные ударные нагрузки на забой шпура или скважины.

Основы теории механических способов бурения были разработаны Е.В. Александровым, В.Д. Андреевым, Г.В. Арцимовичем, Л.И. Бароном, В.Д. Буткиным, В.С. Владиславлевым, Л.Б. Глатманом, Г.М. Крюковым, Б.Н. Кутузовым, М.Р. Мавлютовым, Р.Ю. Подэрни, И.С. Покровским, Ю.И. Протасовым, Н.С. Успенским, В. Lawn, Т. R. Wilshaw и другими исследователями.

Влияние параметров размещения инденторов на рабочей поверхности бурового инструмента, их формы и размеров на распределение напряжений и эффективность разрушения горной породы рассмотрено в трудах Б.В. Байдюк, О.Н.

Голубинцева, Н.Н. Павловой, А.И. Спивака, Н.А. Чинакала, Л.А. Шрейнера, Р.М. Эйгелеса, Н. Е. Wagner, Н. R.Schumann, М. Hood, N.G.W. Cook и других.

Вопросам разрушения горной породы различными видами ударного способа бурения и определению рациональных параметров инструмента и режима бурения посвящены работы О.Д. Алимова, К.И. Иванова, А.А. Липина, Э.О. Миндели, В.В. Ржевского, Б.А. Симкина, В.Б. Соколинского, А.Ф. Суханова, В.С. Фёдорова, В.В. Царицына, Р. А. Lindqvist, сотрудников Института горного дела УрО РАН (ИГД МЧМ СССР) В.С. Блохина, А.В. Казанцева, В.Г. Кузнецова, Р.И. Сухова и других.

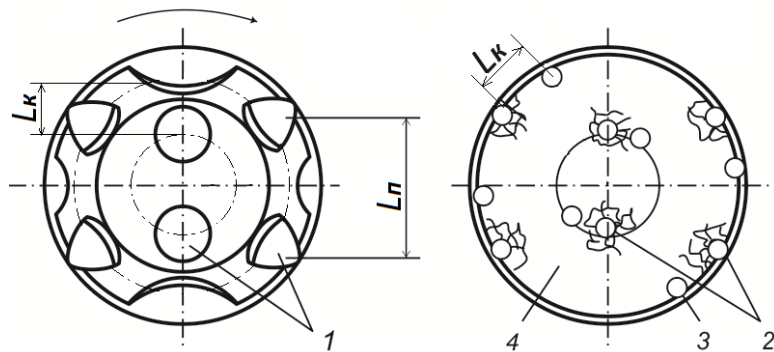
Наибольшее количество работ посвящено выявлению качественного и количественного влияния отдельных факторов в процессе разрушения породы одиночным индентором (лезвие, зуб, штырь), в результате внедрения которого образуется лунка весьма энергоемким механизмом выкола. Однако полученные результаты этих работ недостаточны для обоснования геометрических параметров современных коронок штыревого типа и режима бурения. Такие коронки реализуют одновременный контакт с породой группы одиночных сближенных инденторов в условиях наличия свободных поверхностей скола в забое скважины от предыдущих ударов. Исследования Р.М. Эйгелеса, Г.М. Арцимовича, М.Р. Мавлютова показали, что сближение одиночных инденторов на определенное расстояние создает возможность разрушения породы не только выколом лунок, но и промежуточным сколом в пространстве между внедряемыми инденторами. Согласно Ю.И. Протасову, размещая инденторы на некотором рациональном расстоянии до образующихся свободных поверхностей скола, возможно обеспечить помимо разрушений породы в лунках также ее скол вблизи от края свободной поверхности. Критический анализ ранее выполненных исследований показал, что теория разрушения с достаточной детальностью до сих пор не развита, а экспериментальные исследования фрагментарны и не дают целостного представления о закономерностях разрушения скальных горных пород ударом. Поэтому установить горизонтальные расстояния и энергию удара, гарантирующие повышение объема разрушения скальной горной породы при воздействии буровой коронки в процессе ударно-поворотного бурения, в настоящее время затруднительно.

Эти недостатки препятствуют раскрытию и использованию резерва для дальнейшего повышения производительности и снижения энергоемкости бурения коронками штыревого типа. В связи со сказанным, основное направление исследований – выявление закономерностей изменения объема разрушения скальной горной породы ударом сближенных между собой инденторов, а также ударом индентора вблизи от края свободной поверхности скола. На основании

проведенного анализа сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе предложен и обоснован теоретический механизм разрушения скальных горных пород при ударно-поворотном способе бурения коронкой штыревого типа, приведена схема экспериментов по измерению и оценке пространственного распределения напряжений и объемов разрушения скальной горной породы при различных положениях точек удара.

При ударно-поворотном способе бурения штыревым инструментом основной объем породы разрушается в результате ударов группы инденторов 1, размещенных на рабочей поверхности бурового инструмента (рис. 1). Вращающий момент и осевое усилие создают незначительное разрушение. Удары инденторов по забою шпура (скважины) могут приходиться на участки, удаленные от свободной поверхности скола, а также на участки, находящиеся вблизи от нее.



1 – инденторы; 2 – свободные поверхности скола; 3 – место следующего удара по забою; 4 – забой шпура (скважины)

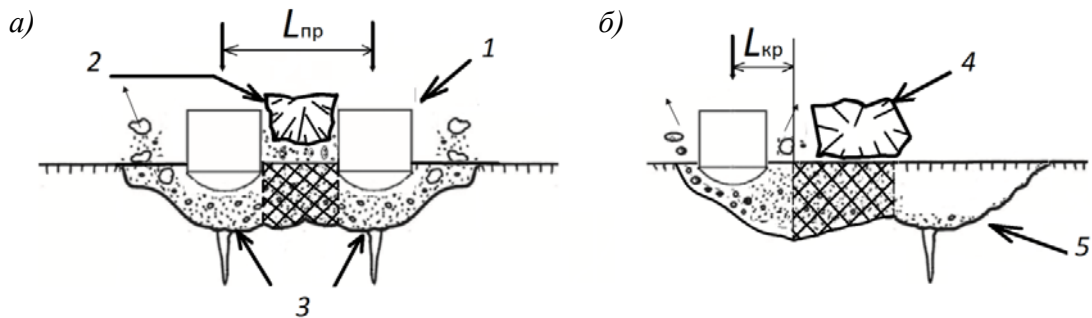
Рисунок 1 – Рабочая поверхность буровой коронки штыревого типа и вид образуемого забоя шпура (скважины)

Поскольку каждый расположенный на рабочей поверхности индентор образует как минимум две пары с соседними инденторами, то выявив закономерности разрушения скальной горной породы ударом двумя инденторами на участках забоя, удаленных от свободной поверхности, возможно установить рациональное размещение и необходимую энергию удара для всей совокупности инденторов на рабочей поверхности коронки в целях обеспечения промежуточного скола породы в процессе бурения шпура (скважины).

После каждого удара буровой инструмент поворачивается на определенный угол, в результате чего каждый размещенный на его рабочей поверхности индентор оказывается на некотором расстоянии до свободной поверхности скола в забое шпура (скважины), образованной предыдущим ударом. Следовательно,

закономерности разрушения, установленные для случая удара одиночного индентора вблизи от края свободной поверхности, позволят определить необходимые для обеспечения краевого скола в процессе бурения рациональные значения энергии удара и угла поворота для всей группы инденторов бурового инструмента, контактирующих с участками забоя шпура (скважины), находящимися вблизи от свободных поверхностей скола.

Варьируя расстояние между сближенными инденторами $L_{п}$ (рис. 1) при соответствующей энергии удара, можно обеспечить не только разрушение породы забоя в лунках, но и между ними за счет ее промежуточного скола (рис. 2, а). Эта возможность для каждого конкретного типа породы реализуется только при определенной величине расстояния между инденторами $L_{пр}$. Располагая инденторы при последующих ударах с необходимой энергией на определенном расстоянии до свободной поверхности скола $L_{кр}$, связанном с углом поворота между ударами, и (или) соблюдая такое же расстояние между рядами инденторов на рабочей поверхности инструмента, возможно гарантировать краевой ее скол в области, прилегающей к свободной поверхности (рис. 2, б), в дополнение к возникающим под инденторами луночным разрушениям.



1 – индентор; 2 – промежуточный скол породы между инденторами; 3 – луночные разрушения; 4 – краевой скол породы вблизи от свободной поверхности; 5 – свободная поверхность в забое шпура (скважины)

Рисунок 2 – Схемы удара забоя шпура (скважины) и основные механизмы разрушения породы буровой коронкой штыревого типа

Для оценки пространственного распределения напряжений, возникающих в скальной горной породе при ударе двумя инденторами в удалении от свободной поверхности скола и одним индентором вблизи от нее проведено фотоупругое моделирование. Модель забоя представляла собой участок массива породы с изотропными свойствами и была выполнена из оптически активного материала (вода-глицерино-желатиновая композиция).

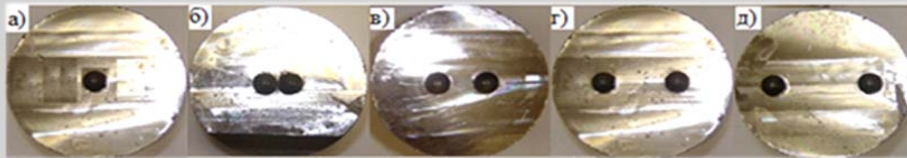
В ходе нагружения модели фиксировались цветные полосы, различающиеся

порядком. Порядок полосы n линейно пропорционален значению максимальных касательных напряжений в точках полосы. Изменение напряжений в модели оценивали безразмерным коэффициентом распределения напряжений k , представляющим собой отношение максимальных касательных напряжений $\tau_{\max n}$ в точках полосы с порядком n к величине максимальных касательных напряжений $\tau_{\max 1}$ в точках полосы первого порядка

$$k = \frac{\tau_{\max n}}{\tau_{\max 1}} \quad (1)$$

Для выявления закономерностей изменения объема разрушений скальной горной породы в зависимости от различных режимов ударного нагружения разработана схема экспериментов на образцах равномернозернистого гранита, являющегося типичным представителем скальных горных пород. Предел прочности породы на сжатие по данным испытаний составил $187,2 \pm 27$ МПа.

Для создания ударной нагрузки применены модели инструмента (рис. 3), представленные цельнометаллическими цилиндрами, в каждом из которых закреплены штыри (инденторы). Диаметр индентора $d=8$ мм.



a – модель с одиночным индентором; *б*, *в*, *г*, *д* – модели с двумя инденторами, расстояние между которыми L_n равно, соответственно, d ; $2d$; $3d$; $4d$

Рисунок 3 – Модели инденторов для экспериментального исследования на образцах гранита

Образцы гранита представлены кубами с плоскопараллельными гранями размером $90 \times 90 \times 90$ мм. Для нанесения ударов по образцам применялся стандартный копер Л.И. Барона, Р.В. Орлова, В.М. Курбатова.

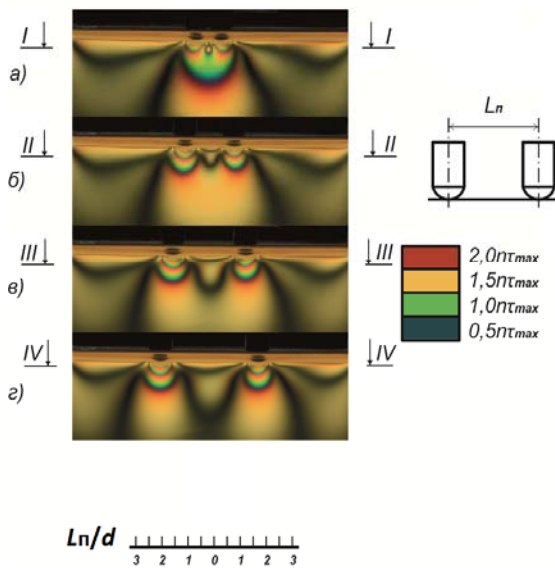
Эксперимент проводился в два этапа. На первом этапе производилось одновременное внедрение инденторов, сближенных на относительное расстояние L_n/d , равное 1, 2, 3, 4. На втором этапе производилось внедрение одиночного индентора вблизи от края углубления, имитирующего свободную поверхность скола, на относительном расстоянии L_k/d от нее 0,5; 1; 1,5; 2.

Величина энергии единичного удара для каждой серии эксперимента изменялась в диапазоне от 16 до 80 Дж. В каждой серии принят пятикратный повтор единичного сбрасывания. После динамического нагружения образца породы

производился замер объемов разрушения с помощью пластичного материала. Определялась энергия удара E , потраченная на образование объема разрушений, с учетом КПД передачи ударной нагрузки η . Результаты, полученные в ходе экспериментального исследования, проходили статистическую обработку.

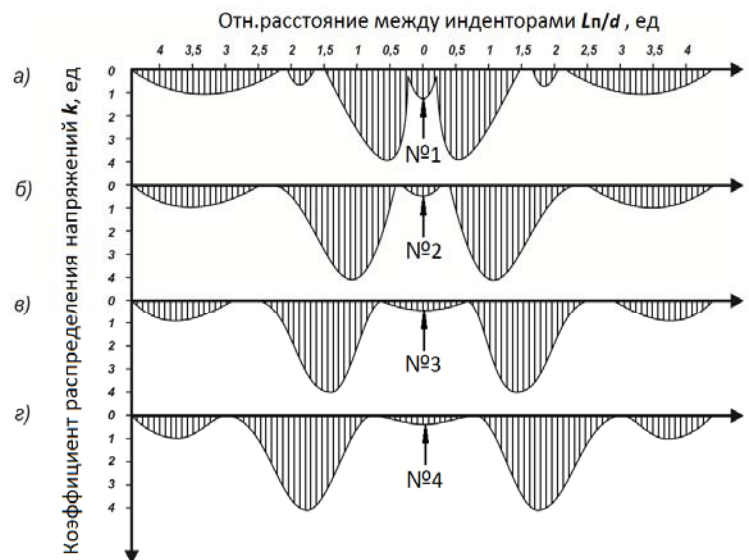
В третьей главе представлены результаты обобщения и анализа данных экспериментальных исследований пространственного распределения напряжений и объемов разрушения при ударах сближенных инденторов на значительном удалении и вблизи от свободной поверхности скола.

На рис. 4 приведены результаты исследования закономерности пространственного распределения максимальных касательных напряжений при одновременном внедрении инденторов на относительном межосевом расстоянии L_n/d от 1 до 4. Для каждого варианта размещения инденторов проведены горизонтальные сечения I-I, II-II, III-III, IV-IV на одинаковой глубине от поверхности модели. Графики изменения коэффициента распределения напряжений k в горизонтальных сечениях модели показаны на рис. 5. Из анализа графиков следует,



L_n/d : а – 1; б – 2; в – 3; г – 4

Рисунок 4 – Оптическая картина распределения максимальных касательных напряжений при различном относительном расстоянии между инденторами L_n/d



а – I-I; б – II-II; в – III-III; г – IV-IV

Рисунок 5 – Графики изменения коэффициента распределения напряжений k в горизонтальных сечениях модели

что в результате действия ударной волны максимальные касательные напряжения при любом относительном расстоянии L_n/d между ними из диапазона 1 – 4 принимают наибольшую величину в области породы, находящейся непосредственно под инденторами. По мере удаления инденторов друг от друга, в точках №1 – 4,

принадлежащих области пространства между ними, касательные напряжения снижаются согласно экспоненциальной зависимости с длиной релаксации 0,85, выраженной в относительных долях диаметра индентора (рис. 6). При относительном расстоянии между инденторами, превышающем 4, распределение напряжений приобретает независимый характер (рис. 4, з).

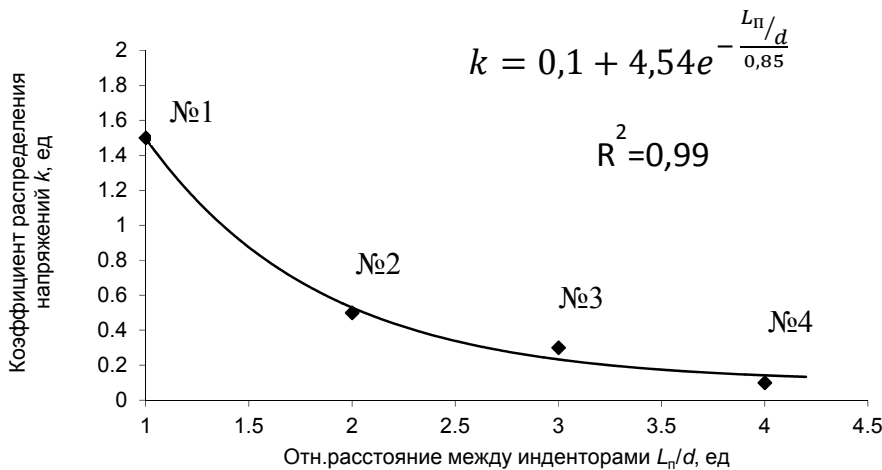
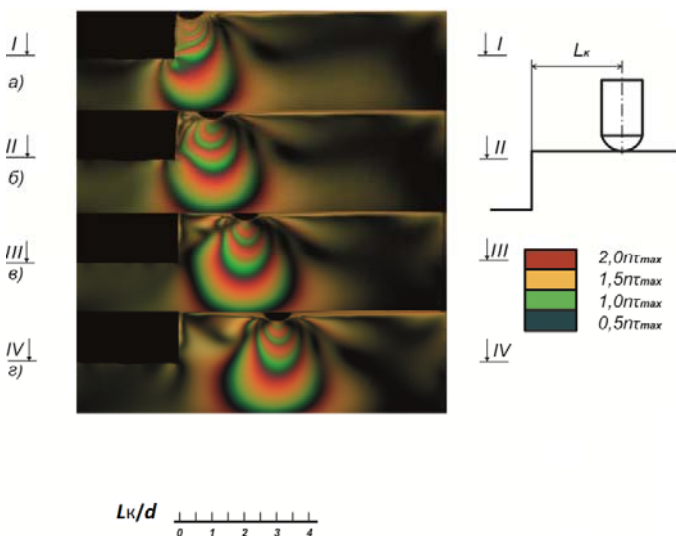


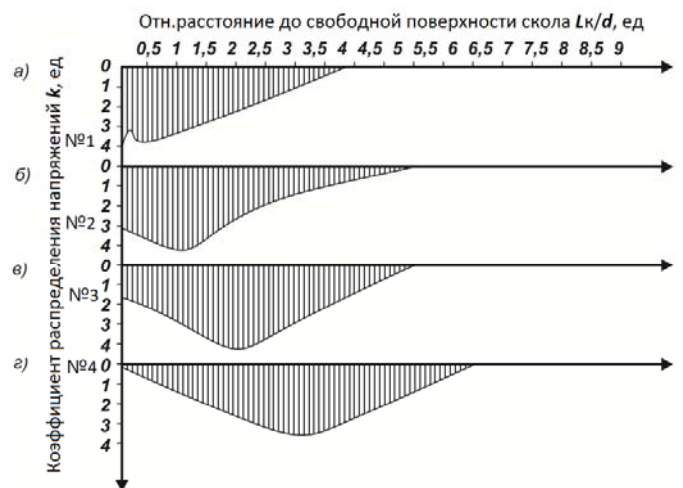
Рисунок 6 – Зависимость коэффициента распределения напряжений k от относительного расстояния между инденторами L_n/d

На рис. 7 приведены результаты исследования закономерности пространственного распределения максимальных касательных напряжений при внедрении индентора на различном удалении от свободной поверхности скола. Для каждого варианта размещения инденторов проведены горизонтальные сечения I-I, II-II, III-III, IV-IV на одинаковой глубине от поверхности модели. Графики изменения коэффициента распределения напряжений k в горизонтальных сечениях модели представлены на рис. 8.



L_k/d : а – 0,5; б – 1; в – 2; г – 3

Рисунок 7 – Оптическая картина распределения максимальных касательных напряжений при различном расстоянии L_k/d от индентора до свободной поверхности



а – I-I; б – II-II; в – III-III; г – IV-IV

Рисунок 8 – Графики изменения коэффициента распределения напряжений k в горизонтальных сечениях модели

Анализ графиков изменения коэффициента распределения напряжений k (рис. 8) в горизонтальных сечениях показывает, что при размещении инденторов на относительном расстоянии L_k/d в диапазоне от 0,5 до 3 касательные напряжения принимают наибольшую величину в области породы, находящейся под индентором. При увеличении расстояния от индентора до свободной поверхности относительные касательные напряжения в точках №1 – 4, расположенных в области, прилегающей к свободной поверхности, уменьшаются согласно установленной экспоненциальной зависимости (рис. 9) с длиной релаксации 9,17, выраженной в относительных долях диаметра индентора.

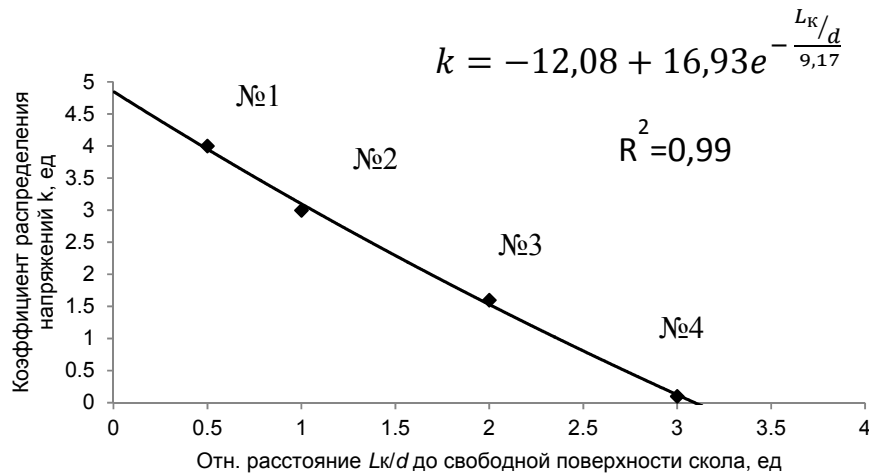


Рисунок 9 –
Зависимость
коэффициента k от
относительного
расстояния до
свободной
поверхности L_k/d

Влияние свободной поверхности прекращается при относительном расстоянии до нее, равном и более 3 (рис. 7, г), значение коэффициента k становится равным и меньше 0,1 (рис.9).

Эксперименты на оптически активных моделях позволили перейти к экспериментам на натуральных образцах.

В результате анализа данных, полученных в процессе экспериментального разрушения скальной горной породы (гранита) ударами одного и двух инденторов, впервые установлены закономерности изменения объема разрушений в зависимости от энергии удара E и относительных расстояний. Закономерности с достаточной достоверностью графически описываются моделями нелинейной функционально-факторной регрессии (рис. 10,11), методология построения которых разработана сотрудником ИГД УрО РАН д.т.н. В.А. Антоновым. Коэффициент детерминации для модели объема разрушений ударом сближенных инденторов $R^2=0,970$ (рис. 10), для модели объема разрушений при ударе индентором вблизи от поверхности скола составляет $R^2=0,928$ (рис. 11).

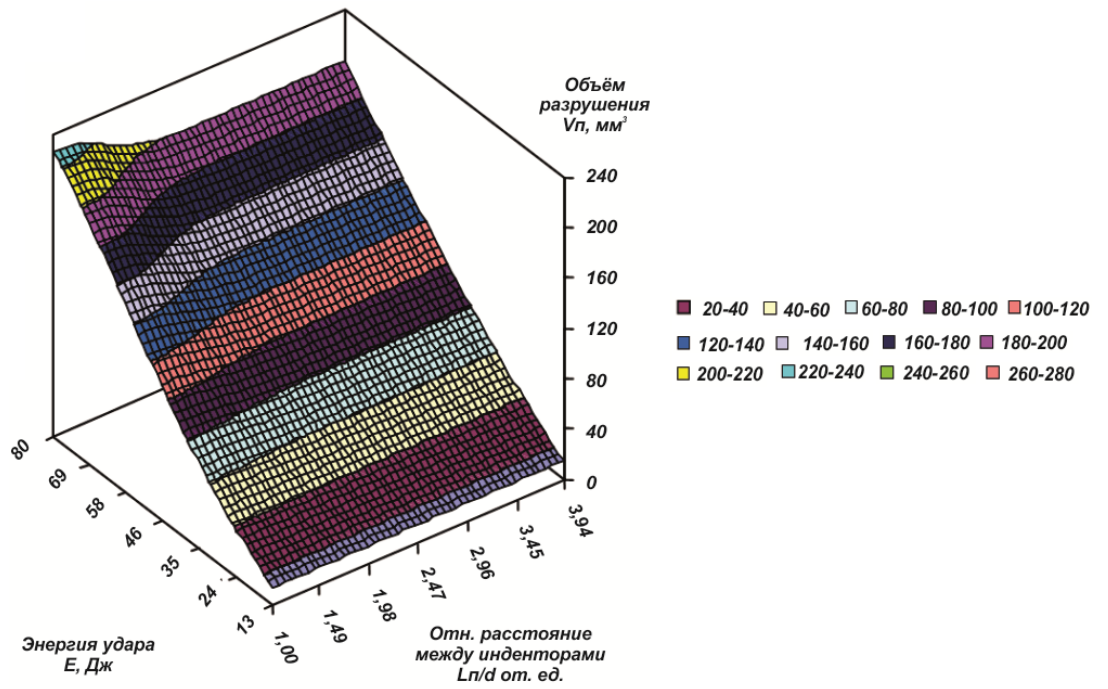


Рисунок 10 – Модель объема разрушений при ударе сближенных инденторов (промежуточный скол)

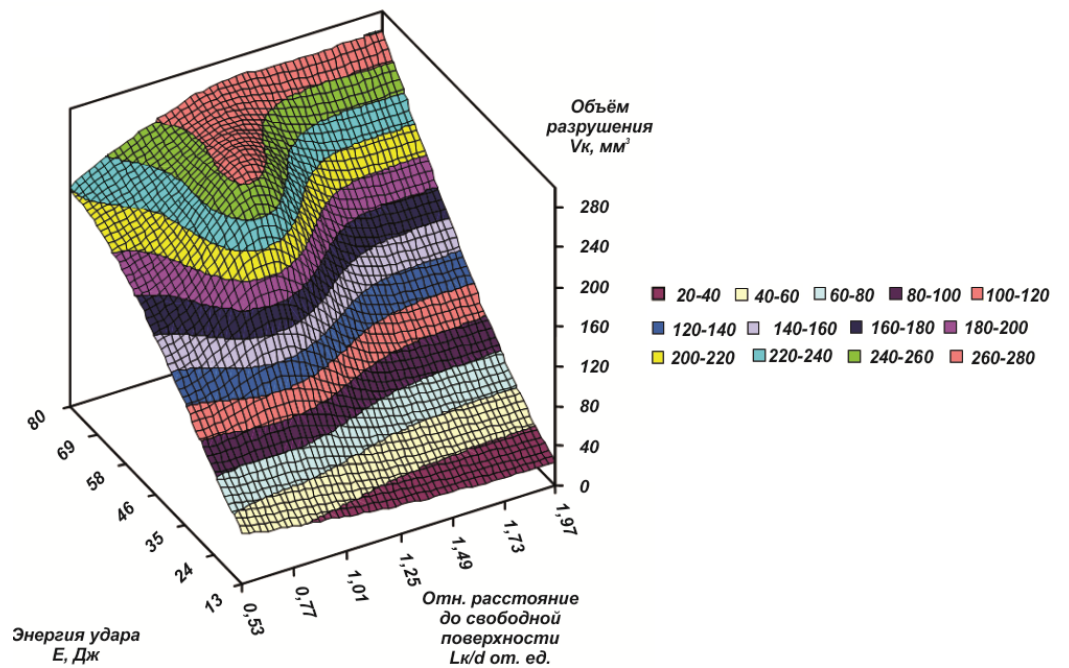


Рисунок 11 – Модель объема разрушений при ударе одним индентором вблизи от свободной поверхности скола (краевой скол)

Модель объема разрушений скальной горной породы ударом сближенных инденторов имеет математическое выражение

$$V_{\Pi} \left(L_{\Pi}/d; E \right) = 0,58E^{1,33} + 30,3e^{-\frac{[(L_{\Pi}/d-1,06)]^2}{0,635^2}} \frac{[(E'-73,2)]^2}{27,3^2}. \quad (2)$$

Модель объема разрушений скальной горной породы ударом одного индентора вблизи от свободной поверхности скола математически выражена следующим образом:

$$V_{\kappa} \left(L_{\kappa}/d; E \right) = 11,08 \left(L_{\kappa}/d \right)^{-1,01} + 0,12E^{1,80} + 3,15 \left(L_{\kappa}/d \right)^{-0,66} E^{0,57} + 3,41 \times \\ \times 10^{-5} \left(L_{\kappa}/d \right)^{-0,79} E^{3,41} + \\ + 98,98e^{-\frac{[(L_{\kappa}/d-1,02)\cos 0,005 + (E'-50,2)\sin 0,005]^2}{0,315^2}} - \frac{[(L_{\kappa}/d-1,02)\sin 0,005 - (E'-50,2)\cos 0,005]^2}{20,8^2}}, \quad (3)$$

где E' – параметр энергии, Дж/Дж.

$$E' = E/1,$$

где E – энергия удара, Дж.

Анализ математических выражений (2) и (3) показывает, что объем луночных разрушений в значительной степени зависит от энергии удара и выражается степенной функцией во всем диапазоне аргументов с показателем степени для промежуточного скола 1,33 согласно (2), для краевого скола 1,80 согласно (3), а в локальной области аргументов образуются некоторые аномальные области повышенного объема за счет добавления к объему луночных разрушений под инденторами объемов скола породы, расположенных в пространстве между ними и области, прилегающей к свободной поверхности, и описываются функцией гауссовой формы. По моделям определено, что наибольший объем луночных разрушений при ударе сближенных инденторов составляет 85 %, при ударе индентором вблизи от свободной поверхности скола – 61%.

Практический интерес для создания бурового инструмента штыревого типа и обоснования режима ударно-поворотного способа бурения представляют модели, описывающие изменение энергоемкости разрушения в зависимости от энергии удара и относительных расстояний. Математические выражения для моделей, описывающих изменение энергоемкости разрушения при ударе сближенных

инденторов e_{Π} и вблизи от свободной поверхности скола e_{κ} , получены согласно выражениям

$$e_{\Pi} = \frac{E}{V_{\Pi}(L_{\Pi}/d, E)}, \quad e_{\kappa} = \frac{E}{V_{\kappa}(L_{\kappa}/d, E)}, \quad (4)$$

где $V_{\Pi}(L_{\Pi}/d; E)$ – функциональное выражение зависимости объема разрушений ударом сближенных инденторов от относительного расстояния между ними L_{Π}/d и энергии удара E ; $V_{\kappa}(L_{\kappa}/d; E)$ – функциональное выражение зависимости объема разрушений ударом одного индентора от относительного расстояния между ним и свободной поверхностью скола L_{κ}/d , энергии удара E .

В результате интерпретации полученных моделей изменения энергоемкости разрушений при ударе сближенных инденторов e_{Π} установлено (рис. 12), что в эксперименте, в котором наблюдался промежуточный скол породы, ее минимум имеет значение $e_{\Pi \text{ пр}} = 0,352$ Дж/мм³ (рис. 13). Его положение достигается при относительном рациональном расстоянии $L_{\Pi \text{ пр}}/d$ между инденторами, равном 1,06, и энергии удара $E_{\Pi \text{ пр}} = 78,6$ Дж.

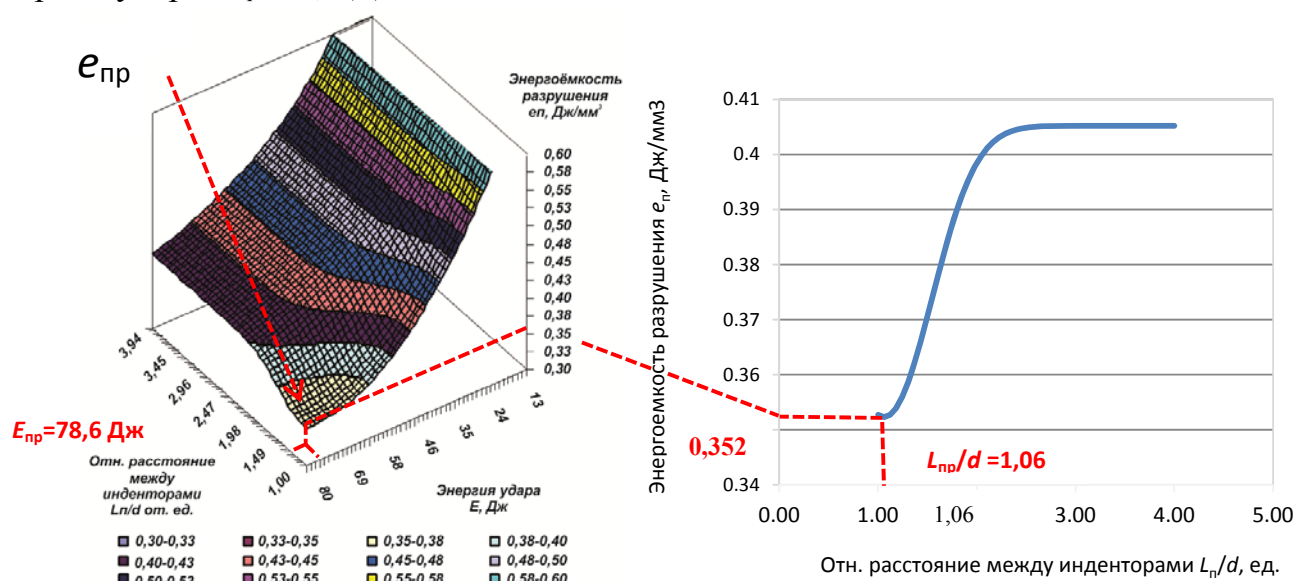


Рисунок 12 – Модель энергоемкости разрушений ударом сближенных инденторов

Рисунок 13 – Закономерность изменения энергоемкости от отн. расстояния между инденторами L_{Π}/d при энергии удара 78,6 Дж

Анализ модели энергоемкости разрушений ударом одного индентора вблизи от свободной поверхности e_{κ} (рис. 14) показал, что при относительном расстоянии $L_{\kappa \text{ пр}}/d$ от индентора до свободной поверхности, равном 1,02, и энергии удара $E_{\kappa \text{ пр}}$, равной 46,1 Дж, достигается минимум энергоемкости краевого скола $e_{\kappa \text{ пр}} = 0,198$ Дж/мм³ (рис. 15).

$e_{\kappa \text{ пр}}$

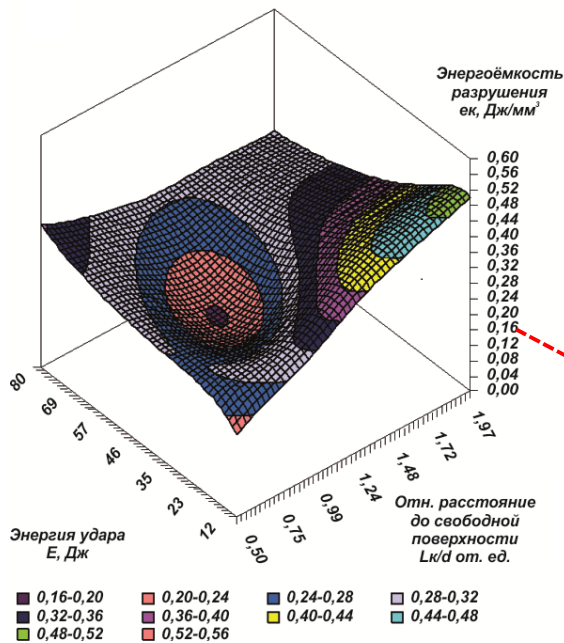


Рисунок 14 - Модель энергоёмкости разрушений ударом одного индентора вблизи от поверхности скола

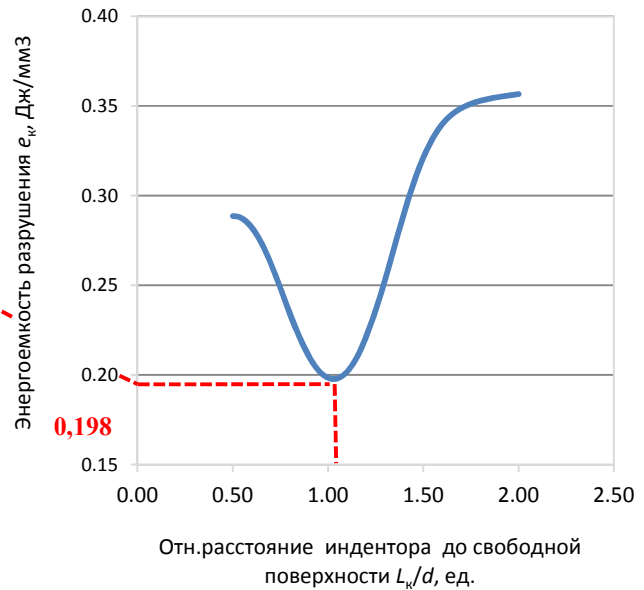


Рисунок 15 – Закономерность изменения энергоёмкости от отн. расстояния до свободной поверхности скола L_k/d при энергии удара 46,1 Дж

Таким образом, установленные модели закономерностей (см. рис.12,14) позволяют определить рациональное сочетание энергии удара и геометрических параметров бурового инструмента. Возникающий при таком сочетании выкол лунок совместно с промежуточным и краевым сколами обеспечивает гарантированное снижение энергоёмкости ударно-поворотного способа бурения коронкой штыревого типа шпуров (скважин) в скальных горных породах.

В четвертой главе представлена методика расчета рационального размещения штырей (инденторов) на рабочей поверхности коронки и определения основных параметров режима бурения ударно-поворотным способом. Основные этапы методики показаны на рис. 16.

Методика для скальной горной породы с конкретными физико-механическими свойствами предусматривает возможность определить, в отличие от существующих методик, точки рационального размещения инденторов на рабочей поверхности, позволяющего в процессе бурения создавать усовершенствованный механизм разрушения, включающий выкол с совместными промежуточным и краевым сколами. Для ее использования необходимо наличие следующих основных входных данных: диаметра скважины D , диаметра индентора d , угла их наклона α , установленных рациональных значений расстояния между инденторами $L_{пр}$ и до свободной поверхности $L_{кр}$ и соответствующих значений энергии удара $E_{пр}$ и $E_{кр}$.

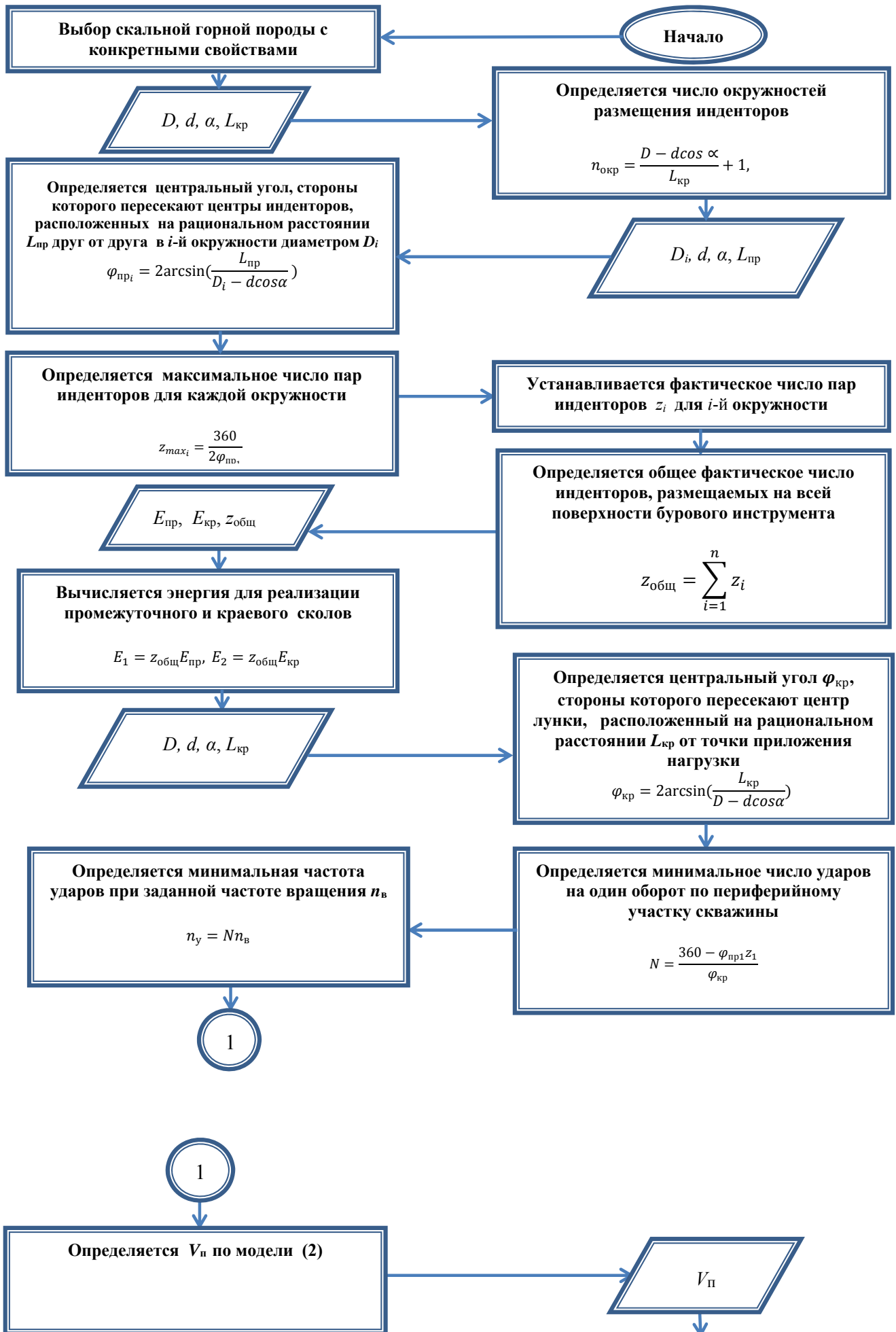
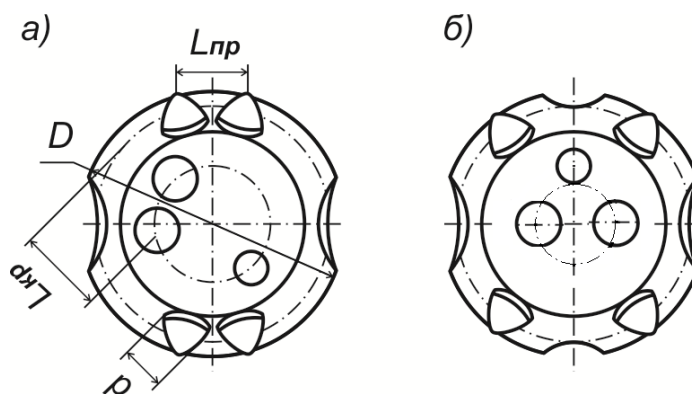


Рисунок 16 – Блок-схема расчета точек рационального размещения инденторов на рабочей поверхности бурового инструмента и определения основных параметров режима бурения

На рис. 17, *а* показан буровой инструмент, точки размещения инденторов на рабочей поверхности которого определены по предложенной методике. Применение в гранитах бурового инструмента с рациональным размещением инденторов (рис. 17, *а*) в режиме, обеспечивающем переменную энергию ударов с необходимой частотой, гарантирует возникновение в процессе бурения краевого и промежуточного скалывания породы, что способствует снижению величины энергоемкости в среднем почти на 12 % в сравнении с величиной энергоемкости, наблюдаемой при использовании современного гидроперфоратора и бурового инструмента с распространенным размещением инденторов (рис. 17, *б*).



a – рациональное размещение; *б* – распространенное размещение
 $D=40$ мм; $d=8$ мм

Рисунок 17 – Буровые коронки штыревого типа

Таким образом, предложенная методика позволяет определить рациональное размещение инденторов на рабочей поверхности коронки штыревого типа и основные параметры режима бурения. Расчетные геометрические параметры размещения инденторов на рабочей поверхности коронки, энергия и частота ударов обеспечивают перераспределение ударной нагрузки по забою шпура (скважины), что отражается на повышении производительности и снижении энергоемкости бурения скальных горных пород ударно-поворотным способом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой дается новое решение актуальной научной задачи по выявлению закономерностей разрушения скальных горных пород, позволяющих усовершенствовать механизм разрушения пород коронкой штыревого типа при ударно-поворотном способе бурения шпуров и скважин.

Основные научные и практические результаты работы:

1 Предложен и обоснован эффективный механизм разрушения породы ударно-поворотным способом бурения шпуров и скважин в скальных горных породах буровой коронкой штыревого типа, включающий в себя механизм выкола совместно с промежуточным и краевым сколами породы.

2 Для реализации промежуточного скола с минимальной энергоемкостью доказана необходимость варьировать расстояние между инденторами, размещаемыми на рабочей поверхности буровой коронки, достигая его рационального значения ($L_{пр}$). В процессе бурения для обеспечения механизма краевого скола необходимо с помощью изменения угла поворота между ударами и

(или) взаимного расположения инденторов на рабочей поверхности коронки обеспечить рациональное расстояние ($L_{кр}$) от места следующего удара до свободной поверхности скола в забое шпура (скважины).

3 В результате фотоупругого моделирования распределения напряжений в скальных горных породах от воздействия стоящих рядом инденторов на значительном удалении от свободной поверхности скола и вблизи от нее экспериментально выявлены закономерности изменения относительных максимальных касательных напряжений в точках пространства между инденторами (для случая удара двух инденторов) и в точках области, прилегающей к свободной поверхности скола (при ударе одиночного индентора вблизи от свободной поверхности). Относительные касательные напряжения в точках области между инденторами и области, прилегающей к поверхности скола по мере удаления от инденторов уменьшаются согласно экспоненциальным зависимостям с коэффициентом детерминации 0,99 и соответствующими длинами релаксации 0,85 и 9,17, выраженными с учетом положения асимптот напряжений в относительных долях диаметра индентора.

4 Впервые установлены нелинейные функционально-факторные регрессионные модели изменения объема и энергоемкости разрушения скальной горной породы в зависимости от энергии удара, расстояния между инденторами (при ударе сближенных инденторов), расстояния до поверхности скола (при ударе индентора вблизи от свободной поверхности скола). Анализ установленных моделей позволил определить для гранитов рациональные по критерию минимальной энергоемкости расстояния между инденторами ($L_{пр}$) и до свободной поверхности скола в забое скважины ($L_{кр}$): $L_{пр}=1,06d$, $L_{кр}=1,02d$, а также соответствующие этим расстояниям значения энергии удара 78,6 и 46,1 Дж.

5 На основании проведенных исследований разработана методика расчета точек рационального размещения штырей (инденторов) на рабочей поверхности буровой коронки штыревого типа и основных параметров режима бурения – энергии единичного удара, частоты ударов, позволяющих создавать усовершенствованный механизм разрушения скальной горной породы, включающий выкол с промежуточным и краевым сколами.

6 Расчеты показали, что в перспективе применение буровой коронки с рациональным размещением инденторов на рабочей поверхности совместно с перфоратором, передающим на забой переменную энергию удара при бурении шпуров (скважин) на участках массива, сложенных гранитами, позволит снизить энергоемкость бурения в среднем почти на 12% в сравнении с величиной энергоемкости, наблюдаемой при использовании современного гидроперфоратора с

инструментом, имеющим распространенное (нерациональное) расположение инденторов.

7 Результаты работы указывают на целесообразность проведения в дальнейшем ряда научно-исследовательских и конструкторских работ, которые заключаются в разработке бурового инструмента и перфораторов (ударников) для ударно-поворотного способа проходки шпуров (скважин) в скальных горных породах, позволяющих создавать механизм выкола с дополнительными промежуточным и краевым сколами.

8 Результаты работы приняты к использованию на АО "Кировградский завод твердых сплавов" в качестве методических положений при проектировании бурового инструмента.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:
Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1 Реготунов А.С. Формирование энергозатрат при ударном разрушении штыревым инструментом при бурении взрывных скважин / А. С. Реготунов // Горный информационно-аналитический бюллетень. Отд. вып. № 11. Проблемы недропользования. - 2011. – С. 187 – 198.

2 Реготунов А.С. К вопросу о разработке рациональных параметров инструмента штыревого типа и его воздействия на породу при бурении взрывных скважин / А. С. Реготунов // Горное оборудование и электромеханика. – 2014. - №5. – С. 37 – 42.

3 Реготунов А.С. Экспериментальное исследование режимов ударного бурения горных пород / А.С. Реготунов, В.А. Антонов // Изв. вузов. Горный журнал. – 2015. – №8. – С.61 – 69.

4 Реготунов А.С. Экспериментальное обоснование рациональных геометрических параметров коронок штыревого типа для повышения сколообразования в процессе бурения ударно-поворотным способом / А. С. Реготунов // Бюллетень научно-технической и экономической информации Черная металлургия. – 2016. - № 9. – С. 22-30.

Статьи, опубликованные в других изданиях

5 Реготунов А.С. Анализ факторов, влияющих на скорость ударно-вращательного бурения /А.С. Реготунов, С.Н. Жариков // Проблемы недропользования: материалы III Всероссийской молодёжной научно-практической конференции, 10-13 февраля 2009 г. – г. Екатеринбург: ИГД УрО РАН. – 2009. – С. 320 – 327.

6 Корнилков М.В. Влияние конструктивных параметров бурового инструмента на

производительность ударно-вращательного бурения / М.В. Корнилков, А.С. Реготунов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. трудов VII международной научно-технической конференции. Чтения памяти В.Р. Кубачека. – Екатеринбург, УГГУ, 2009. – С. 216 – 219.

7 Реготунов А.С. Исследование основных факторов, влияющих на эффективность контактного разрушения пород при ударно-вращательном бурении взрывных скважин / А. С. Реготунов // Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле: доклады всероссийской науч. конф. / ИГД УрО РАН. - Екатеринбург: УрО РАН. - 2009. – С. 58 – 64.

8 Реготунов А.С. Ресурсосбережение путем подбора параметров бурового инструмента / А. С. Реготунов, Е. В. Болкисева // Технология и безопасность взрывных работ: материалы научно-технических семинаров 22 – 23 апр. 2010 г. / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург: УрО РАН. – 2011. – С. 34 – 37.

9 Реготунов А.С. Влияние расстояния между инденторами бурового инструмента на энергоемкость ударного разрушения крепких пород / А. С. Реготунов // Технология и безопасность взрывных работ: материалы научно-техн. конф. "Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле", 2011 г. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН. – 2012. – С. 17 – 23.

10 Реготунов А.С. Механизм разрушения крепких горных пород при бурении шпуров и скважин ударно-поворотным и ударно-вращательным способами / А. С. Реготунов // Технология и безопасность взрывных работ: материалы научно-технических семинаров 24 апр., 11 окт. 2012 г. / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург: УрО РАН. – 2013. – С. 38 – 44.

11 Реготунов А.С. Регрессионное моделирование экспериментального разрушения кристаллических горных пород ударом / А.С. Реготунов, В.А. Антонов // Проблемы недропользования [Электронный ресурс] – №5: рецензируемый сборник научных статей. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН. – 2015. – С.37-45 – Режим доступа: // trud.igduran.ru/edition/5

12 Реготунов А.С. О закономерностях распределения напряжений в скальных горных породах при ударно-поворотном бурении коронкой штыревого типа // Технология и безопасность взрывных работ: материалы научно-технических конференций, 2015 г. / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург: УрО РАН. – 2016. – С. 82 – 86.