

Жуков Иван Алексеевич

Разработка научно-методических основ исследования и совершенствования ударных систем (на примере машин, применяемых при разрушении хрупких сред)

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк.

Научный консультант: Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Дворников Леонид Трофимович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Манжосов Владимир Кузьмич

доктор технических наук, профессор
Крауиньш Петр Янович

доктор технических наук, доцент
Рындин Владимир Прокопьевич

Ведущая организация: Институт горного дела
Сибирского отделения
Российской академии наук
(ИГД СО РАН), г. Новосибирск

Защита состоится 07 апреля 2010г. в 15⁰⁰ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.01 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 53-а.

Автореферат разослан 03 марта 2010г.

Ученый секретарь совета
по защите докторских
и кандидатских диссертаций
Д 212.269.01

Костюченко Т.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Приоритетными направлениями развития Кемеровской области считаются разработка новых месторождений полезных ископаемых, строительство высокотехнологичных шахт и разрезов, создание предприятий по глубокой переработке угля, участие в техническом перевооружении предприятий металлургии, химии и машиностроения, развитие лесоперерабатывающей промышленности, производство потребительских товаров и строительных материалов с использованием местного сырья.

Актуальность разработки научно-методических основ исследования и совершенствования ударных систем технологического назначения связана со значительными экономическими выгодами, заключающимися в увеличении производительности и уменьшении энергозатрат на работы по разрушению хрупких сред за счет создания высокотехнологичного оборудования.

В настоящем исследовании формулируются и решаются проблемы, связанные с созданием и совершенствованием ударных систем технологического назначения, в частности машин, применяемых при разрушении хрупких сред без поворота инструмента вокруг его оси. В работе ставятся задачи об исследовании механизма разрушения хрупких сред ударом, задачи анализа и синтеза деталей ударных узлов, преобразования волновой теории продольного соударения стержней. Обосновываются рациональные конструкции новых бойков, породоразрушающего инструмента, защищенные патентами Российской Федерации. Теоретические выводы проверяются физическим экспериментом.

Целью работы является создание научно-методических основ исследования и совершенствования ударных систем, применяемых при разрушении хрупких сред, в том числе без поворота инструмента вокруг его оси.

Идея работы заключается в управлении запасенной энергией удара при продвижении её от бойка до породоразрушающего инструмента и в разработке теории, позволяющий создавать буровой инструмент для разрушения хрупких сред ударными воздействиями.

Методы исследования основаны на использовании

- известных положений теории удара;
- одномерной волновой теории Сен-Венана и графоаналитического метода решения задач о продольном соударении стержней;
- математических принципов метода операционного исчисления;
- приемов конструирования деталей машин.

Научные положения, выносимые на защиту:

- Аналитическое решение задачи о соударении стержней сложной формы с достаточной степенью точности достигается посредством применения теории Сен-Венана, преобразованной с учетом поперечных колебаний.
- Обоснование возможности существенного повышения эффективности разрушения горных пород ударными системами за счет использования рациональных форм бойков ударных механизмов.

- Алгоритм компьютерной программы, разработанный на основе графоаналитического метода, позволяет производить расчет и анализ форм ударных импульсов, генерируемых в стержнях бойками сложных геометрических форм.
- Аналитическое решение задачи об ударе по волноводам полукатеноидальными бойками с использованием теории Сен-Венана, интегрального преобразования Лапласа и графоаналитического метода.
- Результаты экспериментального исследования по установлению форм ударных импульсов, генерируемых в волноводе полукатеноидальными бойками.
- Математическая модель зависимости «сила – внедрение», характеризующая физико-механические свойства горных пород, как часть модели ударной системы «боек – волновод – инструмент – разрушаемая среда», позволяет идентифицировать различные этапы процесса внедрения инструмента в хрупкую среду.
- Математическая модель, связывающая напряжения в массиве горных пород с геометрическими размерами инструмента, является основанием к выбору различных форм инденторов.
- Результаты экспериментального исследования разрушения хрупких сред посредством внедрения безлезвийного инструмента.
- Теория синтеза геометрии бойков ударных систем, позволяющая производить расчеты параметров деталей ударных узлов в зависимости от характеристик разрушаемого объекта.

Достоверность и обоснованность научных положений и результатов обеспечена тем, что выполненные аналитические исследования основываются на классических положениях волновой теории удара, на известных законах механики и теории упругости. При решении поставленных задач в работе используются методы операционного исчисления, графоаналитический метод теории удара и обоснованные физические эксперименты.

Научная новизна работы заключается в

- преобразовании волновой теории продольного удара с учетом трехмерности распространения упругих волн деформаций;
- разработке универсальной конструкции бойка ударной системы;
- разработке научно-методических основ установления условий и законов формирования упругих волн в волноводах при ударе по ним бойками сложной геометрической формы;
- разработке алгоритма компьютерной программы, позволяющего с высокой степенью точности решать задачу о генерировании волновых ударных импульсов в стержневой системе;
- обосновании возможности разрушения хрупких сред ударом без поворота инструмента вокруг собственной геометрической оси;
- разработке методических основ проектирования принципиально новых конструкций бурового инструмента, применяемого для разрушения хрупких сред ударом;

- разработке теории синтеза геометрических параметров ударных систем в зависимости от механических свойств разрушаемой среды.

Практическая полезность. На разработанные способ образования видов полукатеноидальных бойков ударных механизмов, новую конструкцию бойка ударного механизма, твердосплавную вставку – катенид получены патенты РФ на изобретения. Разработанный способ образования полукатеноидальных бойков ударных механизмов внедрен в производство гидравлических молотов в ОАО «Завод Универсал» г. Новокузнецка. Разработанный способ создания буровых коронок с рациональным размещением инденторов принят к внедрению в ООО «Беккер Майнинг Системс – Сибирь». Разработанная методика синтеза геометрических параметров ударных систем технологического назначения принята к использованию в ЗАО «Промуглепроект».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на VIII-XIII студенческих конференциях по секции теории механизмов, динамики и прочности машин, СибГИУ, г. Новокузнецк, 1999-2004гг.; Юбилейной научно-практической конференции молодых исследователей Кузбасса «Шаг в будущее – 50 лет КузГТУ», Кемерово, 2000г.; 9, 13-15 Международных научно-практических конференциях «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-2003, 2007-2009)», Улан-Удэ, Кемерово, Омск, Иркутск.; XXIV Российской школе по проблемам науки и технологий, Государственный ракетный центр «КБ им. академика В.П. Макеева», Межрегиональный совет по науке и технологиям, Миасс, 2004г.; 15, 17-20 научно-практических конференциях по проблемам механики и машиностроения, СибГИУ, Новокузнецк, 2004, 2006-2009гг.; встрече руководителей и специалистов промышленных предприятий с рационализаторами и изобретателями, Администрация Кемеровской области, Клуб директоров машиностроительных предприятий, Кузбасская торгово-промышленная палата, КузбассРИЦ, Кемерово, 2005г.; на Международной научной конференции «Проблемы теоретической и прикладной механики», Алматы, Казахстан, 2006г.; Международной научно-практической конференции «Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов», 2006-2009гг.; на конференции «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды», Новосибирск, 2006г.; Международной конференции «Дифференциальные уравнения, теория функций и приложения», Новосибирск, 2007г.; на Научном симпозиуме «Неделя горняка 2008», г. Москва; V Международной научной конференции «Прочность и разрушение материалов конструкций», Оренбург, 2008г.; на Международном форуме «Проблемы и перспективы инновационного развития экономики Кузбасса», Кемерово, 2008г.; на Международной научной конференции «Актуальные проблемы механики и горного машиноведения, развития интеграции и науки ВУЗов», Кыргызско-Узбекский университет, Ош, 2009г.

Публикации. По теме диссертации опубликована 41 научная статья, в том числе 8 публикаций в журналах, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК России, 1 монография.

Получено 3 патента РФ на изобретения, 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, включающего 249 наименований, 3 приложений. Основной текст изложен на 238 машинописных листах и поясняется 71 рисунком и 3 таблицами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность постановки проблем и задач исследования; определено содержание решаемых проблем; приведены основные результаты, выносимые на защиту; кратко изложено содержание работы.

В первой главе приводится описание ударных систем технологического назначения, излагается история теории удара, показываются основы разрушения хрупких сред и приводится анализ известных работ по моделированию зависимости «сила – внедрение», формулируются задачи исследования.

Принцип действия ударной системы технологического назначения (рисунок 1) заключается в следующем. Энергия привода преобразуется в кинетическую энергию возвратно-поступательного движения бойка 1, который в конце своего хода соударяется с хвостовиком волновода 2, представляющего собой стержень. В результате, кинетическая энергия бойка частично преобразуется в полезную энергию продольных колебаний волновода и частично может переходить в другие виды энергии. Генерируемые бойком продольные колебания в виде падающего ударного импульса 4 перемещаются по волноводу, оканчивающемуся инструментом 3. Под действием импульса инструмент перемещается, создавая тем самым условия для разрушения обрабатываемой среды 6, и проникает в эту среду на некоторую глубину. При этом достаточно заметная часть энергии возвращается в ударную систему в виде отраженного импульса 5, который, как правило, гасится самой системой.

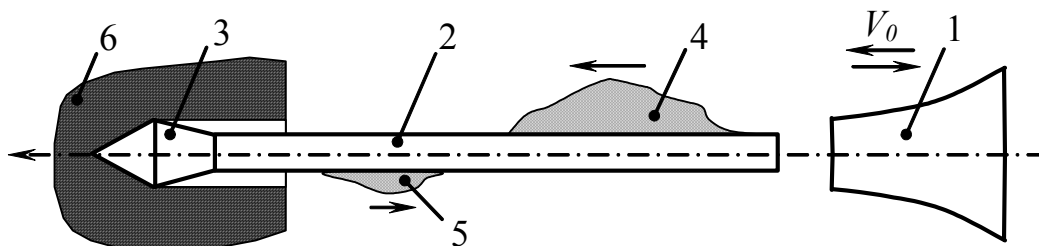


Рисунок 1 – Схема ударной системы технологического назначения

Изучение ударных процессов относится к числу наиболее актуальных проблем механики, связанных с оценкой поведения различных конструкций в условиях воздействия интенсивных импульсных нагрузок, которые возникают при эксплуатации многих современных сооружений, механизмов и приборов.

Теория удара насчитывает в своем развитии около четырех столетий. К одним из первых работ в области теории удара можно отнести исследования,

выполненные еще в XVII веке Галилеем, Декартом, Марци, Гюйгенсом, Вреном, Валлисом, Ньютоном. В XX веке исследования продольного удара стержней получили значительное развитие. Следует отметить работы Тимошенко С.П., Николаи Е.И., Бержерона Л., Динника А.Н., Бидермана В.Л., Кильчевского Н.А., Гольдсмита В., Пановко Я.Г. и других.

Продольные колебания технологически необходимы при разрушении горных пород ударными воздействиями. В этом направлении известны работы: Алабужева П.М., Александрова Е.В., Алимова О.Д., Андреева В.Д., Дворникова Л.Т., Еремьянца В.Э., Иванова К.И., Крюкова Г.М., Лисовского А.В., Манжосова В.К., Саруева Л.А., Сердечного А.С., Серпенинова Б.Н., Стихановского Б.Н., Тагаева Б.Т., Федотова Г.В., Шапошникова И.Д. Из зарубежных исследователей необходимо назвать: Саймона Р., Fisher Н.С., Grantmyre I., Havkes I. Середину 60-х годов прошлого века можно считать зарождением целого научного направления по изучению продольных колебаний в машинах ударного действия, в частности предназначенных для бурения шпуров.

Основные стадии процесса разрушения хрупкой среды ударом представлены на рисунке 2. В качестве основных выводов отмечены следующие:

- на всех стадиях разрушения ведущую роль играет трещинообразование;
- трещины появляются там, где возникают растягивающие напряжения;
- учитывая, что трещины частично закрываются после снятия нагрузки, желательно, чтобы нагрузка в соседних точках прикладывалась одновременно;
- в зависимости от физико-механических свойств среды и параметров воздействия эффективность ее разрушения разными по форме инструментами различна.
- объем лунки выкола существенно больше внедрившейся части инструмента.

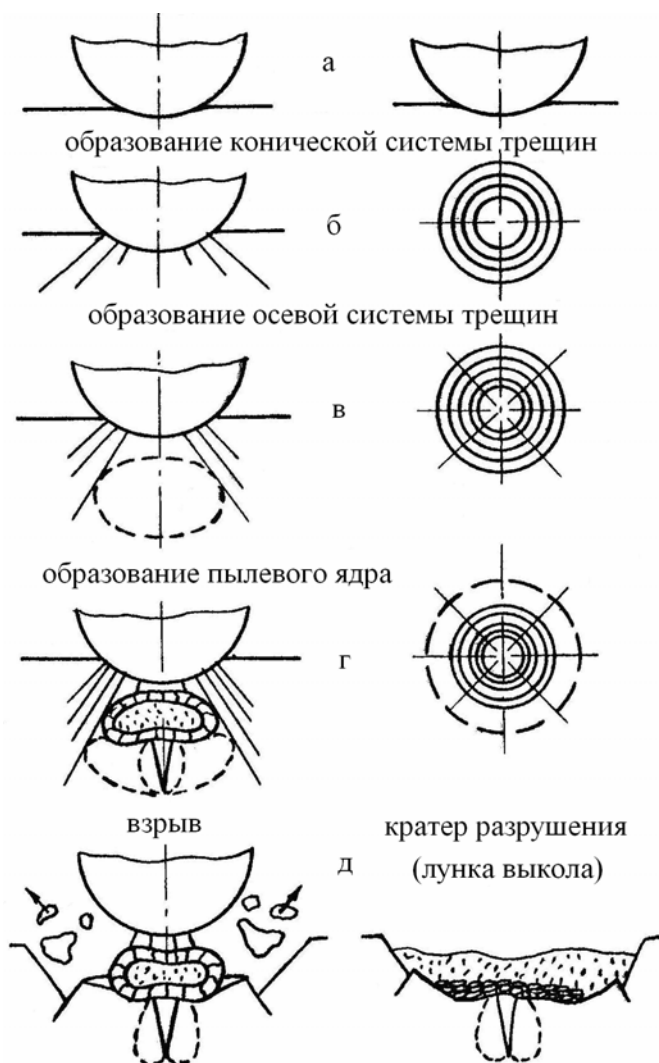


Рисунок 2 – Механизм разрушения хрупких сред

Важнейшей качественной и количественной иллюстрацией механизма разрушения хрупкой среды является диаграмма «сила – внедрение», позволяющая идентифицировать различные этапы процесса внедрения инструмента в среду. По диаграмме можно определить такие параметры внедрения, как глубину и максимальное усилие на границе инструмента с породой, проследить за текущим значением контактной силы и выделить на диаграмме участки, соответствующие стадиям упругой деформации, началу трещинообразования и хрупкого разрушения, пластической деформации и т.д. Запись диаграммы «сила – внедрение» в виде некоторой математической зависимости необходима для составления и решения математической модели ударной системы «боек – волновод – инструмент – разрушаемая среда».

Во второй главе показано преобразование волновой теории продольного удара с учетом трехмерного распространения упругих волн деформаций.

Решение проблемы эффективности работы ударных машин требует управления полезной энергией в течение всего процесса ее преобразования от разгона бойка до непосредственного разрушения среды. Математическое описание процесса удара в общем виде оказывается весьма сложным и потому для решения частных, прикладных вопросов теории удара принимаются некоторые упрощения и допущения, которые иногда приводят к недопустимым ошибкам количественного и качественного характера и, следовательно, к неправильному выбору направления решения тех или иных проблем, связанных с ударом.

Наиболее широкое применение при исследовании ударных систем получила одномерная волновая теория удара, сформулированная Барре де Сен-Венаном, нашедшего общее решение задачи о соударении стержней в форме, допускающей практические приложения. Теория Сен-Венана построена для тонких стержней с плоскими торцами на тех допущениях, что: 1) плоские, поперечные к оси стержня сечения остаются плоскими в процессе распространения волн продольной деформации; 2) материал стержня подчиняется закону Гука, т.е. деформации остаются в пределах упругости; 3) соприкосновение соударяющихся тел происходит в один и тот же момент времени по всей площади ударного торца.

По теории Сен-Венана процесс продольного соударения стержней полностью определяется функцией смещения $u(x,t)$ поперечного сечения стержня с координатой x в момент времени t . Ось координат поперечных сечений x совпадает с прямой, проходящей через центры сечений. Процесс распространения волн продольных колебаний в стержне описывается дифференциальным уравнением гиперболического типа

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где $a = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ – скорость распространения упругих волн продольной деформации в стержне с плотностью материала ρ и модулем упругости E .

Для исследования продольных колебаний в стержнях переменного поперечного сечения используется волновое уравнение в следующем виде

$$a^2 \cdot \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} + a^2 \cdot \frac{1}{S(x)} \cdot \frac{dS(x)}{dx} \cdot \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} - \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = 0, \quad (2)$$

где $S(x)$ – функция площади поперечного сечения стержня.

Такая модификация волнового уравнения позволяет учитывать сложную геометрическую форму деталей ударных узлов, имеющих криволинейные образующие боковой поверхности, различные отверстия или полости.

Однако экспериментальные опыты свидетельствуют о некорректности допущений, принятых в одномерной волновой теории удара, и невозможности их обеспечения на практике. Принцип одномерности обеспечивает сравнительно простое описание волновых процессов при продольных колебаниях, поэтому была поставлена и решена задача о преобразовании дифференциального уравнения Сен-Венана с учетом поперечных колебаний. Сущность решения заключается во введении поправки Релея, согласно которой предполагается, что после энергии продольного движения частиц стержня следующей по значению является кинетическая энергия радиального движения динамически сжимаемого тела. Задача вывода уравнения продольных колебаний стержней сводится к исследованию функционала действия на экстремум согласно энергетическому подходу Гамильтона-Остроградского.

С учетом поправки Релея волновое уравнение принимает вид

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(ES(x) \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho S(x) \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \right) + \frac{\partial^2}{\partial x \partial t} \left(\rho \mu^2 J_\rho(x) \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x \partial t} \right) = 0. \quad (3)$$

Приведенная модификация свидетельствует о том, что поправка Релея приводит к появлению члена более высокого порядка малости. Поскольку появляется зависимость от коэффициента Пуассона μ и полярного момента инерции $J_\rho(x)$, можно сделать вывод, что решение зависит от большего числа механических констант материала и особенностей геометрии стержней, чем по одномерной теории Сен-Венана. Таким образом, изложенная модификация может стать фундаментальной основой при решении проблем, связанных с продольным ударом.

Если механические характеристики материала: ρ, μ, E не зависят от координаты x и времени t , площадь поперечного сечения $S(x)$ и полярный момент инерции $J_\rho(x)$ не зависят от времени, то уравнение (3) преобразуется к виду

$$E \frac{\partial}{\partial x} \left(S(x) \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right) - \rho S(x) \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + \rho \mu^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(J_\rho(x) \frac{\partial^3 u(x,t)}{\partial x \partial t^2} \right) = 0. \quad (4)$$

Если пренебречь деформацией в радиальном направлении, например, приняв $\mu=0$, то получается уравнение (2), которое применяется при решении частных задач о соударении бойка сложной геометрической формы с волноводом для описания движения сечений в бойке.

В случае стержня постоянного поперечного сечения ($S(x) = \text{const}$) уравнение (3) принимает вид

$$E \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} - \rho \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + \rho \mu^2 \frac{J_\rho(x)}{S(x)} \frac{\partial^4 u(x,t)}{\partial x^2 \partial t^2} = 0. \quad (5)$$

Если пренебречь деформацией в радиальном направлении, приняв $\mu=0$, то уравнение (5) преобразуется к уравнению (1), которое используется при решении частных задач о соударении бойка сложной геометрической формы с волноводом для описания движения сечений волновода.

В третьей главе изложены теоретические основы формирования упругих волн в стержнях при ударе по ним бойками различных форм.

После соударения бойка и волновода кинетическая энергия бойка преобразуется в энергию ударного импульса E_1 , которая частично в виде E_2 отражается от среды и движется к ударному торцу бойка, при этом основная часть энергии расходуется на разрушение среды, а часть энергии уходит в среду и рассеивается. Для оценки эффективности процесса используют коэффициент передачи энергии (КПЭ) импульса

$$\eta = \frac{E_1 - E_2}{E_1}. \quad (6)$$

В 1964г. одним из известных ученых-исследователей теории удара Александровым Е.В. было сделано открытие, заключающееся в том, что коэффициент передачи энергии зависит не только от массы бойка m и его предударной скорости V_0 , но и от форм соударяющихся тел. На этом основании подбор рациональных форм бойков является одним из наиболее действенных методов проектирования ударных систем, приводящий к увеличению значения коэффициента передачи энергии.

Для сравнительной оценки применения бойков различных форм необходимо знание условий и законов формирования ими ударных импульсов в стержнях. Решение этой задачи осуществляется с применением теории Сен-Венана. Для этого составляются уравнения движений сечений при продольном ударе для бойка – (2) и для стержня – (1). При этом стержень считается полубесконечным, а система координат принимается таким образом, что ее начало совпадает с местом соударения бойка и стержня, т.е. неударный торец бойка имеет координату $x = l$, где l – длина бойка.

Начальные условия следующие:

– в момент начала взаимодействия смещения сечений стержня $w(x,t)$ и бойка $u(x,t)$ равны нулю

$$w(x,0) = 0, \quad u(x,0) = 0; \quad (7)$$

– скорость смещения, определяемая частной производной по времени, для бойка равна его предударной скорости V_0 , а для стержня равна нулю

$$\frac{\partial w(x,0)}{\partial t} = V_0, \quad \frac{\partial u(x,0)}{\partial t} = 0. \quad (8)$$

Граничные условия, определяющие состояние концов бойка и стержня, следующие:

– в процессе взаимодействия смещения на границе бойка и стержня равны

$$w(0,t)=u(0,t); \quad (9)$$

– в процессе взаимодействия силы взаимодействия на границе бойка и стержня равны

$$S(0)\frac{\partial w(0,t)}{\partial x}=S_0\frac{\partial u(0,t)}{\partial x}, \quad (10)$$

где S_0 – площадь поперечного сечения стержня (принимается постоянной);

– неударный торец бойка свободен от деформаций

$$\frac{\partial w(l,t)}{\partial x}=0; \quad (11)$$

– т.к. стержень полубесконечный, то в удаленных от ударного сечениях стержня деформации отсутствуют

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{\partial u(x,t)}{\partial x}=0. \quad (12)$$

Из системы дифференциальных уравнений (1) и (2) с учетом начальных и граничных условий возможно определение ударного импульса, который связан с функцией смещения сечений стержня зависимостью

$$F(x,t)=ES_0\frac{\partial w(x,t)}{\partial x}. \quad (13)$$

Для рационального использования энергии удара необходимо обеспечение формирования в волноводе импульса такой формы, при которой его амплитуда начинается с некоторого определенного значения и возрастает с интенсивностью, соответствующей интенсивности роста сопротивляемости обрабатываемой среды внедрению. Установлено, что боек, формирующий ударный импульс оптимальной формы, должен быть переменного поперечного сечения, площадь которого должна нарастать от ударного торца, при этом образующая бойка должна находиться в области между образующими боковой поверхности ступенчатого и конического бойков, т.е. быть вогнутой в сторону продольной оси бойка. На форму ударного импульса оказывает значительное влияние кривизна образующей боковой поверхности бойка, а, следовательно, и распределение объема в бойке по мере продвижения от ударного торца к неударному. Поэтому в качестве бойка, генерирующего оптимальный по форме ударный импульс, рационально принять полукатеноид вращения (рисунок 3), который, благодаря следующему своему свойству, является уникальным в своем роде: любой кусок поверхности катеноида по площади меньше, чем всякая другая поверхность, ограниченная тем же контуром.

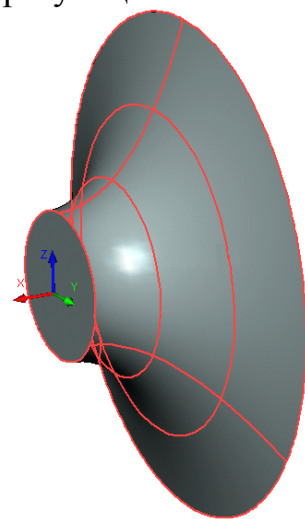


Рисунок 3 – Полукатеноид

В таком бойке образующей является цепная линия – катена, описываемая в прямоугольной системе координат уравнением

$$y = \frac{a_k}{2} \left(e^{\frac{x}{a_k}} + e^{-\frac{x}{a_k}} \right) = a_k \cdot \operatorname{ch} \frac{x}{a_k}, \quad (14)$$

где a_k – параметр катены.

Создание полукатеноидальных бойков заключается в выполнении из твердых материалов тел вращения, образующей которых является кривая, описываемая уравнением (14). Однако при этом в получаемых бойках наблюдается весьма быстрое нарастание их радиального размера, что приводит к габаритам, непригодным для применения в практике.

Несмотря на описанную ситуацию, использование катены в качестве образующей боковой поверхности бойков вполне возможно. Реализация этой идеи достигается тем, что предлагается принципиально новый способ образования полукатеноидальных бойков ударных механизмов (рисунок 4), заключающийся в выполнении из твердых материалов тел вращения, в качестве образующей которых используются различные участки катены, а торцы бойков обрабатываются по плоскостям, перпендикулярным их геометрической оси, при этом расстояние между торцами выбирается из условия заданной массы бойков. Получаемые таким образом бойки, в частности при заданной их одинаковой массе и при условии, что все их образующие есть участки катены, отличаются тем, что из-за различия форм и длин, они генерируют в волноводах различные по форме упругие ударные импульсы, каждый из которых может являться оптимальным для разрушения какой-либо из различающихся по крепости сред.

На рисунке 5 показана возможная практическая реализация полукатеноидальных бойков.

Представленный боек ударного механизма содержит цилиндрическую поршневую часть, обеспечивающую ему устойчивое положение в корпусе механизма, и цилиндрическую ударную часть. В основном материале бойка выполнена внутренняя полость, заполненная материалом с удельным весом, отличным от удельного веса основного материала бойка. Форма внутренней полости представляет собой тело вращения, радиус наружной окружности которой в поперечном сечении любого вырезанного элементарного слоя определяется по формуле

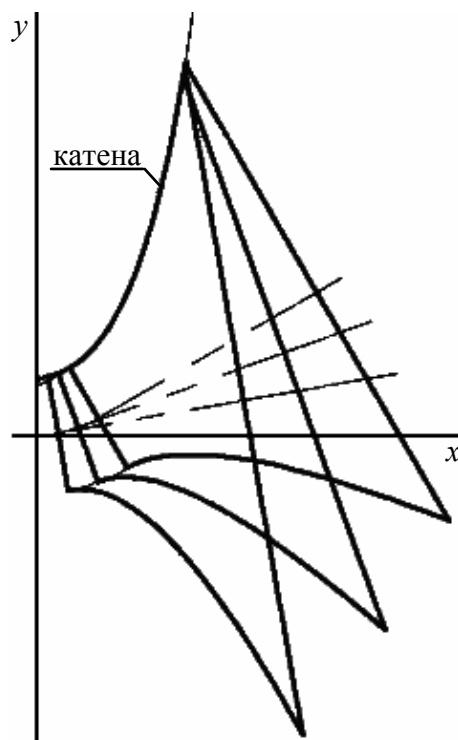


Рисунок 4 – Способ образования видов полукатеноидальных бойков

$$r = \sqrt{\frac{(R^2 - \rho^2)\lambda}{\lambda - 1}}, \quad (15)$$

где R – внешний радиус поперечного сечения основного материала бойка,
 ρ – приведенный радиус поперечного сечения бойка,
 λ – параметр, определяющий отношение удельных весов основного материала и материала внутренней полости бойка.

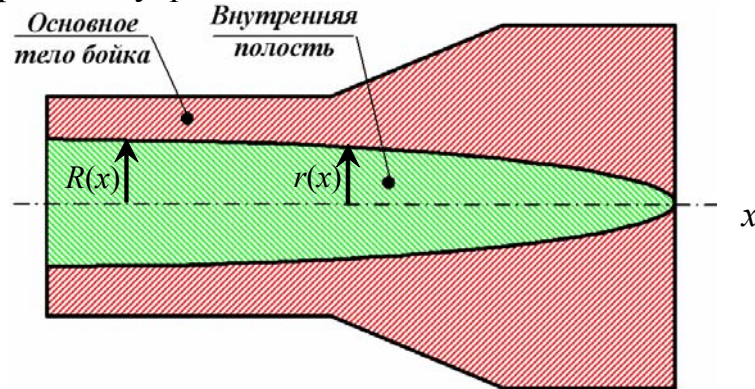


Рисунок 5 – Практическая реализация полукатеноидальных бойков

При таких условиях боек по приведенному удельному весу будет идентичен полукатеноидальному по генерируемому импульсу.

Задача о формировании ударного импульса в полубесконечном стержне постоянного поперечного сечения бойком, имеющим полукатеноидальную форму (рисунок 6), решена с учетом всех допущений, принятых в одномерной волновой теории удара.

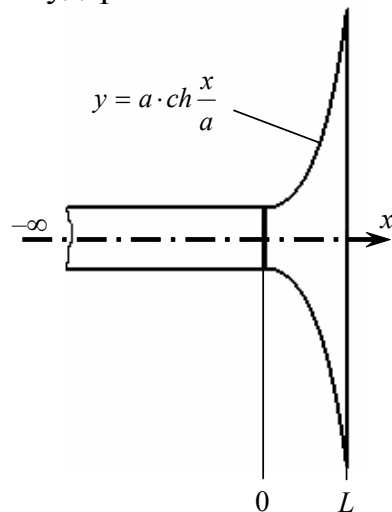


Рисунок 6 – Удар бойком полукатеноидальной формы по полубесконечному стержню

Согласно этой теории из системы дифференциальных уравнений движения сечений бойка и стержня в соответствии с начальными и граничными условиями, посредством применения интегрального преобразования Лапласа по времени найдена функция-оригинал, описывающая первую волну ударного импульса, генерируемого полукатеноидальным бойком

$$F_{K1} = \frac{ES_0V_0}{a} \left[1 - \frac{1}{2} cth \frac{L}{a_k} \cdot J_1 \left(\frac{at}{a_k} \right) + \frac{J_0 \left(\frac{at}{a_k} \right)}{4sh^2 \frac{L}{a_k}} - \frac{cth^2 \frac{2L}{a_k}}{2a_k \cdot th \frac{L}{a_k}} \cdot \int_0^{at} \left(-J_0 \left(\frac{U}{a_k} \right) e^{\frac{at-U}{a_k \cdot sh \frac{2L}{a_k}}} \right) dU - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{2sh^2 \frac{L}{a_k}} \right) e^{\frac{at}{a_k \cdot sh \frac{2L}{a_k}}} \right], \quad (16)$$

где J_0 – функция Бесселя 1-го рода нулевого порядка,

J_1 – функция Бесселя 1-го рода 1-го порядка,

при условии, что $0 \leq t \leq \frac{2L}{a}$.

Решить задачу о формировании и распространении импульсов упругой деформации в соударяющихся стержнях позволяет достаточно точно и полно графоаналитический метод, который сводится к рассмотрению прохождения ударных импульсов через стержень с переменным поперечным сечением. При решении прикладных задач, связанных с исследованием ударных систем технологического назначения, графоаналитический метод используется для отыскания ударных импульсов, генерируемых в стержнях цилиндрическими бойками, состоящими из нескольких ступеней.

В настоящей работе графоаналитический метод доработан до возможности его применения к исследованию продольного удара по стержням бойками сложной геометрической формы, а именно представляющими собой тело вращения, образующей которого является какая-либо плоская кривая. На основании графоаналитического метода разработан четкий алгоритм нахождения и анализа ударного импульса, генерируемого бойками различных форм в стержнях постоянного поперечного сечения. Последовательность алгоритма заключается в следующем.

Боек криволинейной формы разбивается на диски сравнительно малой толщины, т.е. представляется в виде ступенчатого цилиндрического, аппроксимирующего некоторую гладкую кривую. Количество ступеней выбирается из условия сохранения качественных свойств исходного бойка. Диаметры d_i , площади поперечных сечений S_i и длина ступеней ℓ_1 вычисляются из условия равенства объемов исходного и ступенчатого бойков

$$d_i = 2 \sqrt{\frac{1}{\ell_1} \int_{t_{i-1}}^{t_i} y^2(t) \cdot \frac{dx(t)}{dt} \cdot dt}; \quad S_i = \frac{\pi d_i^2}{4}; \quad \ell_1 = \frac{\ell}{st}, \quad (17)$$

где $x(t), y(t)$ – функция кривой, описывающей боковую поверхность бойка, в параметрическом виде;

ℓ – общая длина бойка,

st – количество ступеней, на которые разбивается боек.

При ударе бойка по цилиндрическому стержню (рисунок 7) волны продольной деформации будут распространяться в обе стороны от места соударения. При этом для каждого сечения коэффициенты прохождения Q и отражения R определяются по формулам

$$Q_j = \begin{cases} \frac{2S_{j-1}}{S_{j-1} + S_j}, & 1 \leq j \leq st; \\ \frac{2S_{j-st+1}}{S_{j-st+1} + S_{j-st}}, & (st+1) \leq j \leq (2 \cdot st - 1); \end{cases} \quad (18)$$

$$R_j = \begin{cases} \frac{S_{j-1} - S_j}{S_{j-1} + S_j}, & 1 \leq j \leq st; \\ \frac{S_{j-st+1} - S_{j-st}}{S_{j-st+1} + S_{j-st}}, & (st+1) \leq j \leq (2 \cdot st - 1). \end{cases} \quad (19)$$

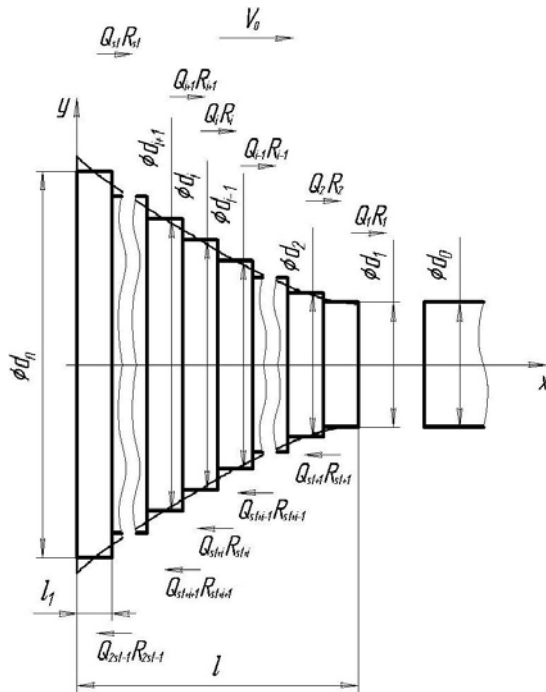


Рисунок 7 – Удар ступенчатого бойка по цилиндрическому стержню

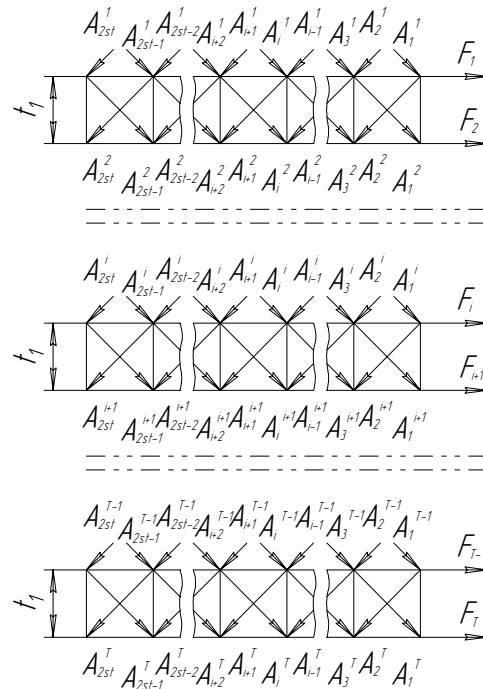


Рисунок 8 – Силы, возникающие в ударнике после соударения

Величины сил, которые возникают после соударения (рисунок 8):

– в бойке

$$\begin{aligned} A_{2k-1}^1 &= \frac{ES_k V_0}{2c}, & 1 \leq k \leq st; \\ A_{2k}^1 &= -\frac{ES_k V_0}{2c}, & 1 \leq k \leq st; \\ A_{2st-1}^{m+1} &= -A_{2st}^m, & 1 \leq m \leq T; \\ A_{2k-1}^{m+1} &= A_{2k}^m R_{st+m} + A_{2k+1}^m Q_{m+1}, & 1 \leq k < st, \quad 1 \leq m \leq T; \\ A_2^{m+1} &= A_1^m R_1, & 1 \leq m \leq T; \\ A_{2k}^{m+1} &= A_{2k-1}^m R_m + A_{2k-2}^m Q_{st+m-1}, & 1 < k \leq st, \quad 1 \leq m \leq T; \end{aligned} \quad (20)$$

– в стержне

$$F_m = A_1^m Q_1, \quad 1 \leq m \leq T, \quad (21)$$

где T – количество расчетных шагов.

По результатам вычислений строится график зависимости силы, возникающей в стержне, от времени, который отразит форму импульса, генерируемого при ударе по нему бойком заданной формы. При этом информация об ударном импульсе может быть получена за любой промежуток времени, определяемый по формуле

$$T_0 = t_1 \cdot T, \quad (22)$$

где $t_1 = \frac{\ell_1}{a}$ – время одного расчетного шага.

Таким образом, задавая конкретное количество расчетных шагов можно получить форму ударного импульса с достаточной для инженерных расчетов степенью точности.

На основе вышеизложенного алгоритма разработана компьютерная программа «Анализ форм бойков ударных механизмов» (свидетельство о регистрации №2007613024 от 11.07.2007г.), которая позволяет численным методом решать задачу о формировании упругих волн деформации в стержнях при ударе по ним бойками сложной геометрической формы. Компьютерная программа существенно сокращает сроки инженерных расчетов ударных систем и позволяет для бойков с любой геометрией определять такие важные характеристики ударного импульса, как максимальную амплитуду, форму и эффективную длительность. Имея количественные параметры импульсов, генерируемых различными бойками, можно их сравнить с целью выявления наиболее рациональных.

В качестве примера на рисунке 9 приведен ударный импульс, генерируемый в стержне полукатеноидальным бойком, полученный посредством составленной компьютерной программы.

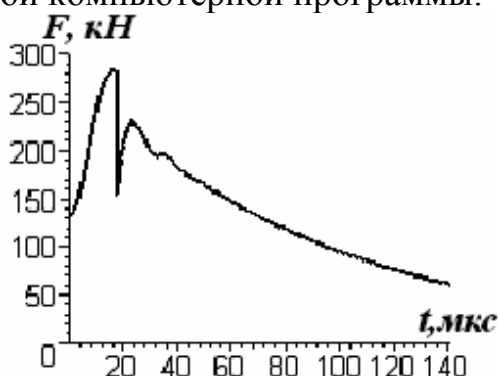


Рисунок 9 – Ударный импульс, генерируемый полукатеноидальным бойком

Для подтверждения состоятельности разработанной компьютерной программы и оценки точности изложенного алгоритма были найдены формы ударных импульсов генерируемых бойками, для которых аналитические решения известны. Сравнительный анализ полученных результатов с аналитическими решениями позволил сделать вывод о том, что составленная компьютерная программа корректна, эффективна и может найти широкое применение при проведении инженерных расчетов различных ударных систем.

Также в третьей главе описан проведенный на модели ударной системы (рисунок 10) эксперимент по определению формы упругой волны, генерируемой в волноводе при ударе по нему полукатеноидальными бойками.

В качестве бойков использовались опытные образцы (рисунок 11), изготовленные в ОАО «Завод Универсал» г. Новокузнецка. Волновод, по которому наносится удар, представляет собой стержень длиной 3,1 м и диаметром 32 мм. Для предохранения стержня от потери устойчивости служат люнеты. Соосность бойка и стержня обеспечивается направляющей, регулируемой установочными болтами. В конце своего хода боек соударяется с хвостовиком волновода, и происходит запуск осциллографа. При этом фиксируется форма падающего импульса.



Рисунок 10 – Экспериментальный стенд



Рисунок 11 –
Опытные образцы

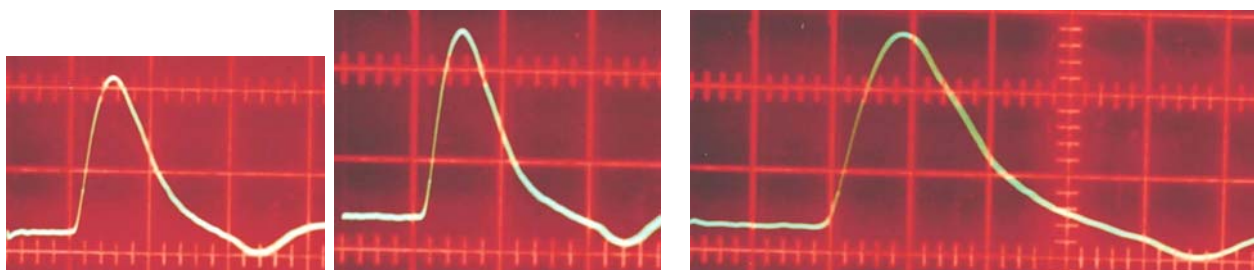


Рисунок 12 – Осциллограммы ударных импульсов,
генерируемых полукатеноидальными бойками

На рисунке 12 показаны полученные в результате эксперимента осциллограммы, по которым определено, что крутизна нарастания переднего фронта импульса до определенного значения соответствует погрешности, вносимой измерительной аппаратурой, затем амплитуда нарастает почти линейно до максимального значения, что полностью подтверждает результаты теоретического исследования формы ударного импульса, генерируемого в волноводе полукатеноидальными бойками.

Изложенные в третьей главе научно-методические основы проведения экспериментального исследования позволяют решать задачу о формировании импульсов упругой деформации в волноводах при ударе по ним бойками различной формы.

Четвертая глава посвящена исследованию взаимодействия инструмента, оснащенного твердосплавными вставками – инденторами, с разрушаемой хрупкой средой.

Эксплуатация мощных бурильных машин сопряжена с необходимостью применения буровых коронок безлезвийного типа (рисунок 13), армированных твердосплавными вставками – инденторами, рабочая поверхность которых выполнена без концентраторов напряжений и предполагает более равномерное их нагружение, а, следовательно, и повышенную стойкость к циклическим ударным нагрузкам по сравнению со вставками лезвийной формы.

Применение твердосплавных вставок для оснащения коронки позволяет простыми средствами (изменяя, например, их диаметр, геометрию, количество и схему размещения) создавать практически неограниченное количество вариантов конструкций коронок и, следовательно, для конкретных горно-технологических условий месторождения выбрать наиболее оптимальную. Вместе с тем следует заметить, что решение проблемы совершенствования бурового инструмента идет преимущественно изобретательским путем, эмпирически. Задача создания безлезвийного инструмента оказалась весьма сложной, в настоящее время отсутствуют обоснованные рекомендации по выбору диаметра, формы, числа вставок, схемы их размещения. В связи с этим задача обоснования конструктивных параметров коронок для конкретных условий эксплуатации является весьма актуальной.

Опыт эксплуатации показал, что коронки подобного типа наиболее эффективны для бурения горных пород средней и высокой крепости, для которых механизм разрушения имеет ярко выраженный упруго-хрупкий характер. При взаимодействии рабочего участка индентора с разрушаемой средой поверхность последней деформируется. Возникающее по площадке контакта давление порождает в поверхностном слое среды напряжения. При достижении внутренними напряжениями предельных значений происходит хрупкое разрушение объема породы под вставкой и образуется лунка выкола. Экспериментальными исследованиями взаимодействия цилиндросферических инденторов с хрупкой средой установлено, что объем лунок выкола существенно превышает объем внедрившейся части индентора (рисунок 14).



Рисунок 13 – Буровой инструмент безлезвийного типа

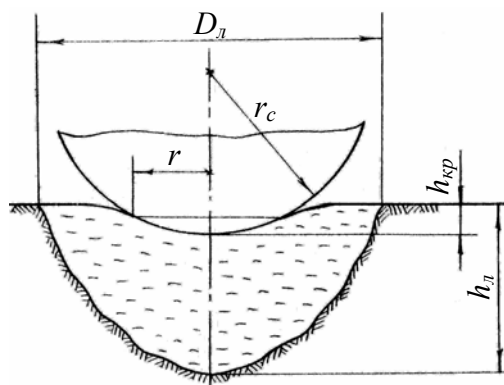


Рисунок 14 – Внедрение индентора

Анализ известных работ по определению и обобщению зависимости «сила – внедрение», характеризующей процесс внедрения инструмента в хрупкую среду при ударном воздействии, позволил сформулировать следующие предположения:

- исходным значением модели является некоторая величина F_0 , равная усилию, с которым инструмент прижат к обрабатываемому объекту непосредственно перед ударом, т.е. характеризующая статическое взаимодействие инструмента и среды в начальный момент времени;

- зависимость «сила – внедрение» близка к линейной, но не может быть представлена только одним участком прямой линии;

- начальный участок модели не является линейным и для более точного описания процесса динамического взаимодействия инструмента со средой пренебрежение им не рационально.

Основываясь на полученных результатах, в целях приближения описания взаимодействия инструмента с хрупкой средой к истинной картине разрушения сделано предположение, что модель зависимости «сила – внедрение» носит экспоненциальный характер и описывается аналитически следующим выражением:

$$F(u) = F_0 \cdot e^{ku}, \quad (23)$$

где k , F_0 – некоторые константы, характеризующие физико-механические свойства среды.

Практический интерес с точки зрения рационального размещения породоразрушающих элементов на ударном торце инструмента представляют теоретические и экспериментальные исследования так называемого эффекта симультанности при одновременном внедрении в хрупкую среду нескольких инденторов. Физическим обоснованием эффекта симультанности является суперпозиция полей напряжений породного массива в пространстве между инденторами.

При разрушении хрупких сред преимущественное применение получил ударный способ. Это обусловлено тем, что при нанесении удара по инструменту можно передать в разрушаемый объект наибольшую энергию в единицу времени. Разрушение хрупкой среды только ударными воздействиями, т.е. путем бурения без поворота инструмента возможно лишь в том случае, когда взаимное расположение твердосплавных вставок на конце инструмента позволит разрушить весь забой шпура, иначе коронка «сядет» участками корпуса между вставками на забой. Недостатком традиционной цилиндросферической вставки является притупленность рабочего участка, вызванная тем, что в сечении плоскостью, проходящей через ось вставки, имеет место полуокружность с одинаковой кривизной по линии взаимодействия с забоем. Причем, величина кривизны у окружности столь мала, что рабочий участок оказывается весьма «тупым». Для внедрения таких вставок потребны значительные контактные воздействия.

В связи с этим, была предпринята разработка твердосплавной вставки, содержащей рабочий участок большей кривизны, применение которой позволит решить проблему повышения производительности бурового инструмента.

Особенность конструкции заключается в том, что в твердосплавной вставке (рисунок 15), содержащей цилиндрический участок 1 и рабочий участок 2, последний выполнен в виде тела вращения цепной линии BAC – катены вокруг оси симметрии Oy – катенида. Слово «катенид» здесь вводится с целью показать его отличие от известного понятия «катеноид», определяющего тело вращения катены вокруг горизонтальной оси Ox . Геометрические элементы рабочего участка вставки задаются такими параметрами, как диаметр цилиндрического участка

$$d = 2a_k \cdot \text{Arch} \frac{l + a_k}{a_k}, \quad (24)$$

и длина рабочего участка

$$l = a_k \cdot \text{ch} \frac{d}{2a_k} - a_k. \quad (25)$$

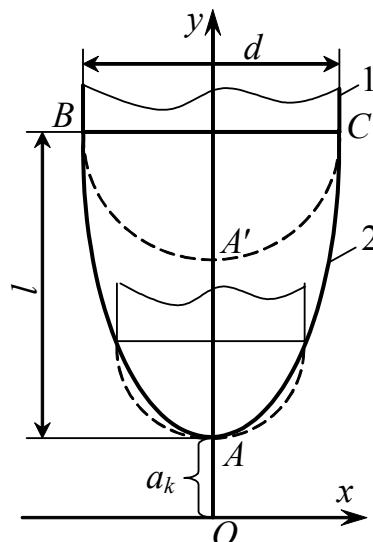


Рисунок 15 – Катенид

При разрушении хрупкой среды вставка с рабочим участком в виде катенида воздействует на забой и, так как катенид имеет участки со значительно меньшими радиусами кривизны по сравнению с цилиндросферической вставкой, обеспечивает большее проникание внутрь забоя и больший объем разрушения при одних и тех же нагрузках. Такая форма поверхности позволяет рационально использовать твердый сплав и повысить стойкость вставки.

Новые виды породоразрушающего инструмента – буровых коронок, армированных инденторами-катенидами, позволяют бурить шпуры некруглого поперечного сечения, когда в острых углах пробуренного шпура создаются концентраторы напряжений и появляются возможности целенаправленного воздействия на массив и существенного снижения объемов бурения. Вершины периферийных вставок в таких коронках расположены с образованием геометрических фигур с прямолинейными сторонами (типа треугольник, ромб, квадрат и т.п.). За один удар по забою коронкой таких типов разрушается вся площадь забоя, и поперечное сечение шпура приобретает форму, соответствующую поперечному сечению коронки. Разрушение хрупкой среды без вращения инструмента позволяет существенно упростить конструкцию бурильной машины исключением механизма вращения, бурить шпуры любой геометрической формы, исключить составляющую абразивного износа инструмента от его вращения.

В пятой главе показаны результаты экспериментального исследования разрушения хрупких сред безлезвийным инструментом.

С целью подтверждения возможности разрушения хрупких сред без вращения инструмента вокруг его оси, а также выявления особенностей внедрения твердосплавных вставок проведен эксперимент на стенде «Машина испытательная универсальная ИК-500.01» (рисунок 16), состоящем из следующих основных элементов: устройства нагружающего; установки насосной; системы управления; пульта управления дистанционного; гидрокommunikаций.

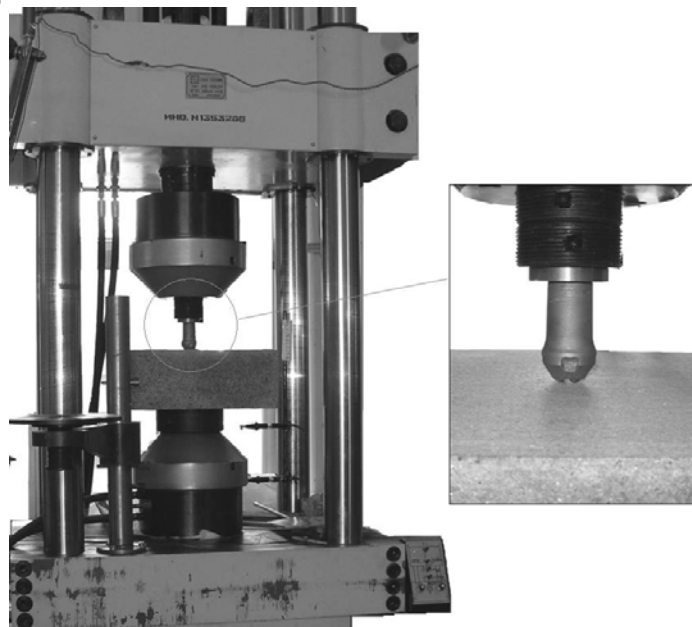


Рисунок 16 – Машина испытательная универсальная ИК-500.01

В качестве опытных образцов использовались армированные цилиндросферическими вставками буровые коронки (рисунок 17). Инденторы размещены по следующим схемам: одиночный индентор (рисунок 17,а); два индентора (рисунок 17,б); три индентора, расположенные в вершинах равностороннего треугольника (рисунок 17,в); четыре индентора, размещенные в вершинах квадрата (рисунок 17,г).

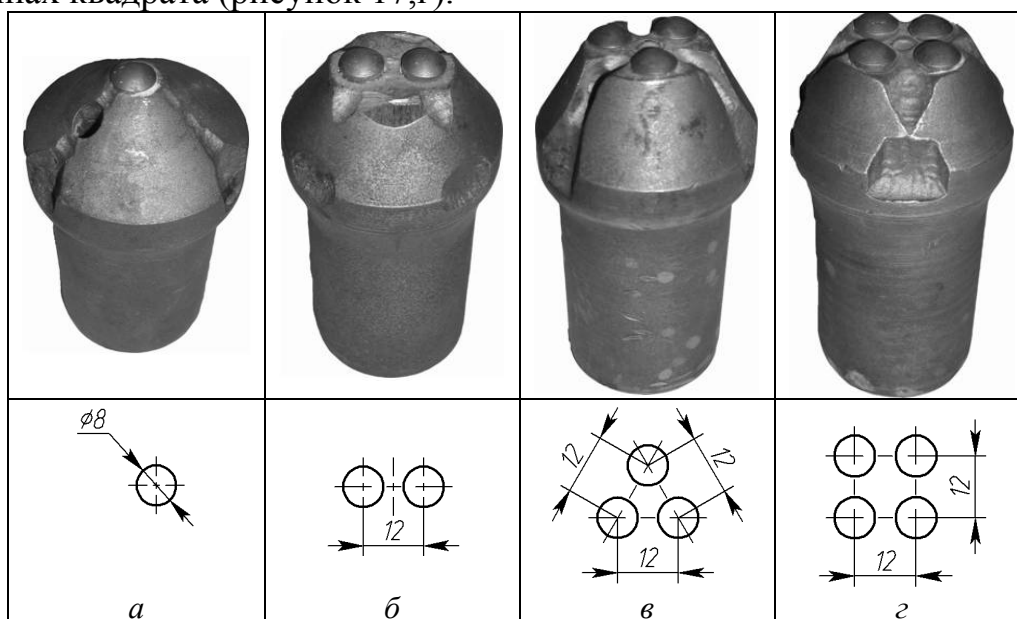


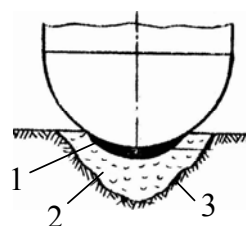
Рисунок 17 – Безлезвийные буровые коронки

В качестве разрушаемого объекта использовались блоки горной породы размером 40x36x15см. Порода представлена гранитом мелкозернистым, плотным, со средним значением коэффициента крепости по шкале проф. М.М. Протодяконова $f=18$. Размеры образцов горной породы выбраны из следующих условий:

- абсолютные размеры и формы образцов не должны влиять на результаты исследования;
- образец должен превосходить объем, в котором на процесс разрушения может оказать влияние взаимодействие упругих волн деформаций с границами образца.

Методика эксперимента заключается в следующем. Блок горной породы устанавливается на нижнюю платформу стенда, вертикально ориентированная буровая коронка закрепляется в верхней части стенда и фиксируется от возможности поворота в процессе испытания. С помощью соответствующей настройки гидравлической станции устанавливается скорость и максимальная величина нагружения. После включения стенда устанавливается контакт между коронкой и гранитным блоком. Затем, на коронку с определенной скоростью подается нагрузка, и компьютерной системой управления производится запись диаграммы зависимости глубины внедрения коронки в гранит от величины нагружения («сила–внедрение»).

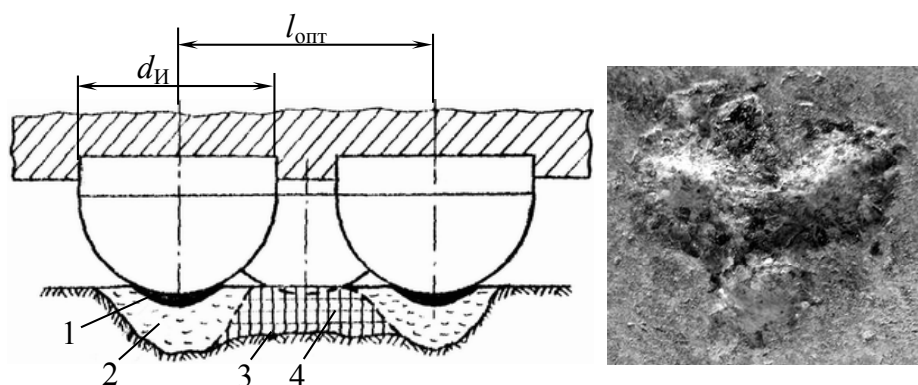
Наблюдения за характером разрушения породы показали, что при внедрении одиночного индентора (рисунок 18) непосредственно под контактной площадкой образуется сильно спрессованный и достаточно тонкий чашеобразный слой породы несколько меньшего диаметра (на 1-2мм), чем диаметр лунки выкола. Остальная часть разрушенной породы представляет собой менее спрессованные раздробленные частички породы, удаляемые без значительных усилий.



- 1 – сильно спрессованный слой породы,
2 – зона раздробленной породы,
3 – контур лунки выкола

Рисунок 18 – Внедрение в породу одиночного индентора

При одновременном внедрении двух, трех, четырех инденторов, характер разрушения породы под каждой сферой аналогичен описанному выше. Часть породы в пространстве между инденторами разрушается крупным сколом (рисунок 19). При оптимальном расстоянии между соседними инденторами $l_{\text{опт}} = (1...2,5)d_{\text{и}}$, обеспечивающем совместный скол породы, суммарный объем разрушения возрастает в среднем в 1,5-2,5 раза.



1 – сильно спрессованный слой породы, 2 – зона раздробленной породы, 3 – контур совместной лунки, 4 – зона крупного скола
Рисунок 19 – Профиль лунки выкола при внедрении трех инденторов

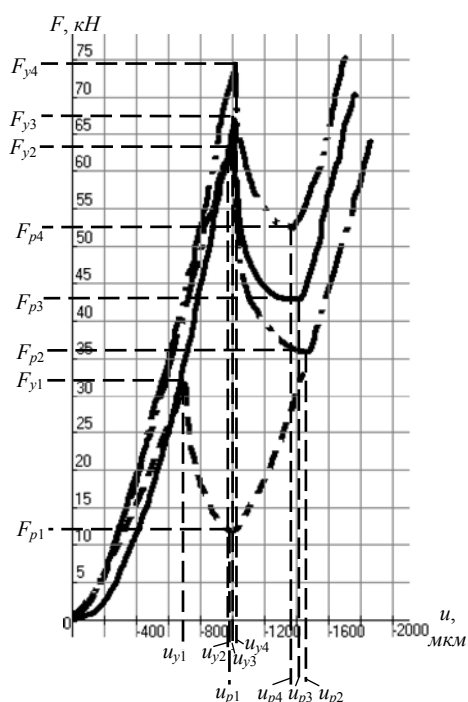


Рисунок 20 – Зависимость «сила–внедрение» для буровых коронок с количеством инденторов
— — — 1, — · — 2,
— — — 3, — · — 4

Количество инденторов	Средний объем разрушенной горной породы, см^3		
	Нагружение		
1	1	2	3
1	0,11	0,36	0,61
2	0,18	0,43	0,61
3	0,32	0,53	0,64
4	0,21	0,39	0,53

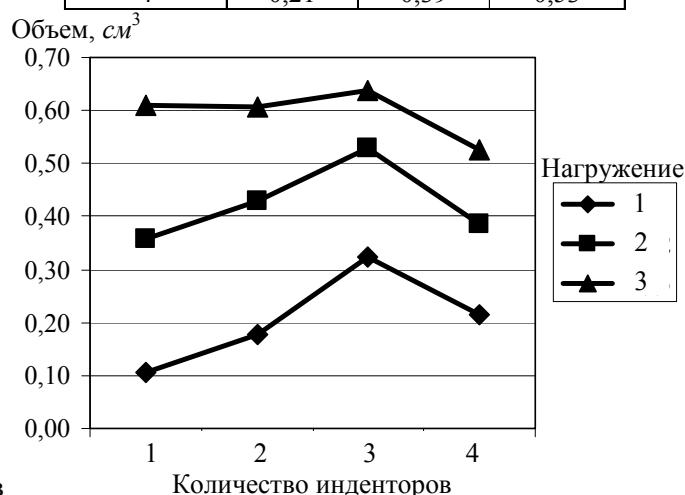


Рисунок 21 – Диаграмма объема разрушенной породы

Характер диаграмм (рисунок 20), распределение величины прикладываемого усилия F_y на число одновременно внедряемых инденторов и оценка среднего объема разрушения при вдавливании 1, 2, 3, 4-х инденторов, расположенных по схемам согласно рисунку 17, позволяют утверждать, что наиболее оптимальной схемой с точки зрения энергоемкости является схема, в которой три одновременно внедряемых индентора находятся в вершинах равностороннего треугольника.

В шестой главе изложены научно-методические основы разработки и совершенствования деталей ударных систем.

Как доказано экспериментом, если несколько одновременно внедряемых инденторов разместить на породоразрушающей части инструмента таким образом, что любые, рядом расположенные три индентора будут лежать в

вершинах равностороннего треугольника, то слой породы в пространстве между инденторами будет разрушен крупным сколом. Таким образом, получено экспериментальное подтверждение эффекта взаимовлияния близко расположенных и одновременно внедряемых инденторов – эффекта симультанности. Задаваясь конкретным значением диаметра шпура, можно найти такое взаимное расположение троек инденторов, которое позволит бурить отверстие ударом без вращения инструмента вокруг его геометрической оси, обеспечивая тем самым возможность получения отверстий некруглого сечения. Необходимо также отметить, что фигура, образованная соседними инденторами, может представлять собой не строгий равносторонний треугольник, угол между сторонами может быть в интервале $60 \pm 12^\circ$. Примеры рекомендуемых схем размещения инденторов на рабочей части буровых коронок показаны на рисунке 22.

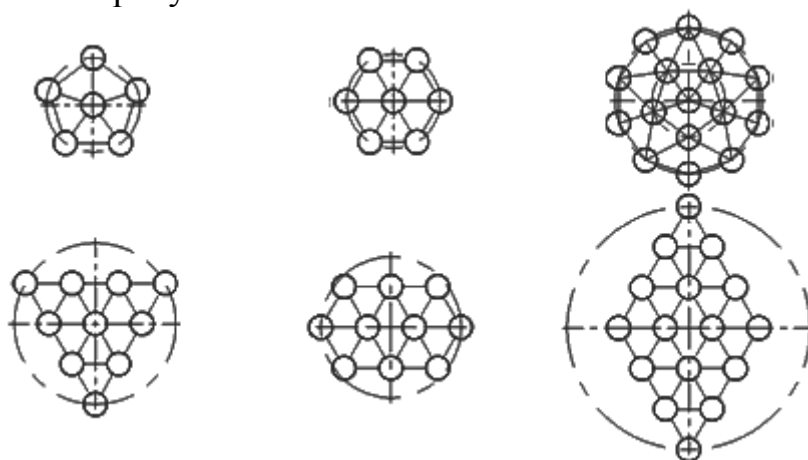


Рисунок 22 – Рациональные схемы размещения инденторов

Однако в основе проектных методик, используемых на предприятиях при разработке ударных систем технологического назначения, как правило, лежит выбор из конструктивных или каких-либо иных соображений разработчиков геометрических параметров ударных механизмов, после чего конструкции аналитически и экспериментально исследуются на предмет пригодности и рациональности практического применения. Решение поставленной проблемы возможно путем применения методики синтеза геометрических параметров ударных систем, которая представляется более рациональной. Сущность методики заключается в следующем.

По результатам оценки физико-механических свойств среды, которую предстоит разрушать, необходимо определить форму ударного импульса, генерируемого в стержне в стержне при ударе по нему бойком.

В период времени взаимодействия падающего импульса с разрушаемой средой на границе стержня со средой должно выполняться краевое условие, согласно третьему закону Ньютона

$$F(t) = -P(h), \quad (26)$$

где $P(h)$ – зависимость глубины внедрения инструмента от приложенной нагрузки.

Ударный импульс определяется в соответствии с законом Гука

$$F(t) = ES_0 \frac{\partial u(x, t)}{\partial x}, \quad (27)$$

Функция, описывающая падающий ударный импульс, представляется в форме Даламбера

$$u(x, t) = f(x + at) + g(x - at), \quad (28)$$

где $f(x + at)$ представляет волну, перемещающуюся в отрицательном направлении оси x со скоростью a (обратная волна);

$g(x - at)$ – волну, перемещающуюся в положительном направлении (падающая волна).

В результате совместного решения уравнений (26) и (27), определяется выражение для деформации, развиваемой ударным импульсом, соответствующим силам сопротивления разрушаемой среды внедрению:

$$\varepsilon(x - at) = \frac{\partial g(x - at)}{\partial x}. \quad (29)$$

В дальнейшем по форме первой волны падающего ударного импульса, описываемого функциями $\varepsilon(t)$ или $F(t)$, синтезируется форма бойка. Решение данной задачи достигается посредством применения графоаналитического метода в обратном порядке. Вначале задается зависимость усилий $F(t)$ (рисунок 23), возникающих в стержне после соударения с бойком, в виде некоторой функции от времени и длительность первой волны t_{ne} . График функции $F(t)$ разбивается на ступени в соответствии с задаваемым количеством расчетных шагов T . В результате разбиения находятся точки F_i , где $i=1, 2, \dots, T$. Время одного расчетного шага

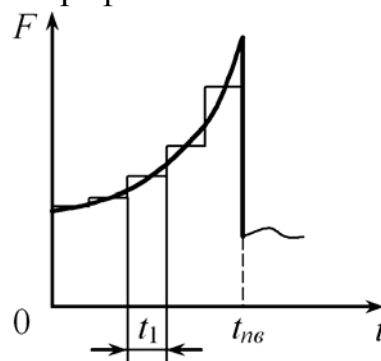


Рисунок 23 – Первая волна ударного импульса

определяется как $t_1 = \frac{t_{ne}}{T}$. Составляются выражения

для определения коэффициентов прохождения и отражения волн для каждого сечения бойка, и усилий, возникающих в бойке и стержне при соударении. Решая последовательно каждое уравнение, определяются площади поперечных сечений, диаметра и длина ступеней синтезируемого бойка, а также общая длина бойка. Синтезируемая форма бойка будет представлять собой многоступенчатый цилиндр, образующая боковой поверхности которого – ступенчатая функция, аппроксимируется некоторой гладкой кривой.

На основании вышеизложенной методики составлена компьютерная программа «Синтез геометрии бойков ударных механизмов» (свидетельство о регистрации №2007614717 от 24.09.2007г.), которая позволяет за сравнительно короткий срок определить наиболее эффективные геометрические размеры деталей ударных узлов машин ударного действия в зависимости от характеристик разрушаемого объекта.

На основании разработанных методик в шестой главе изложены общие рекомендации по исследованию и совершенствованию машин ударного действия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили разработать научные основы создания и совершенствования ударных систем, применяемых в частности при разрушении хрупких сред.

1. Разработаны модификации дифференциальных уравнений волновой теории удара, предназначенных для анализа динамики продольного соударения стержней сложной геометрической формы, позволяющие осуществлять выбор рациональных форм бойков ударных механизмов с точки зрения наиболее эффективного использования энергии удара.
2. В результате проведенного сравнительного анализа установлено, что бойки полукатеноидальной формы, в частности созданные согласно разработанной методике, генерируют в волноводе ударный импульс, приближенный к ударному импульсу оптимальной формы.
3. Проведено аналитическое исследование бойков полукатеноидальной формы, в результате которого определена функция, описывающая первую волну ударного импульса.
4. Разработан алгоритм численного исследования процесса формирования в волноводе ударных импульсов бойками различных форм, который положен в основу компьютерной программы, позволяющей значительно облегчить и сократить сроки проведения инженерных расчетов ударных систем.
5. Полученные в результате проведения исследования на экспериментальном стенде осциллограммы ударных импульсов, генерируемых полукатеноидальными бойками, свидетельствуют о том, что теоретические и экспериментальные исследования имеют удовлетворительную сходимость, что подтверждает пригодность аналитического и численного методов для расчета параметров ударных импульсов.
6. Разработана, исходя из известных контактных задач теории упругости, инженерная методика, позволяющая исследовать взаимодействие с хрупкой средой инденторов, выполненных в форме гладких тел вращения. Посредством данной методики разработана конструкция безлезвийного инструмента, предназначенного для создания шпуров некруглых форм.
7. Создана методика экспериментального определения физико-механических свойств горных пород путем записи диаграммы зависимости силы сопротивления среды от глубины внедрения инструмента. Получено экспериментальное подтверждение гипотетической зависимости «сила – внедрение».
8. Разработана математическая модель, позволяющая, в первом приближении описать эффект симультанности полей напряжений при одновременном воздействии на хрупкую среду группы инденторов. Подтверждение эффекта симультанности получено посредством физического эксперимента.
9. Результаты экспериментов позволили создать методику определения рационального размещения инденторов в корпусе бурового инструмента.
10. Разработанная теория синтеза форм бойков позволяет определять геометрические параметры ударных систем в зависимости от физико-механических свойств обрабатываемого объекта.

Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

1. Жуков И.А. Теоретические обоснования форм ударяющих тел для машин ударного действия / И.А. Жуков, Л.Т. Дворников // Наука и молодежь: на рубеже тысячелетий: Труды региональной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Под общей редакцией С.М. Кулакова / СибГИУ. – Новокузнецк, 2000. – С. 212.
2. Жуков И.А. К исследованию формирования ударного импульса в буровой штанге при ударе по ней катеноидальным бойком // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: Труды региональной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Под общей редакцией С.М. Кулакова / СибГИУ. – Новокузнецк, 2001. – С. 288-289.
3. Жуков И.А. Применение ЭВМ в исследовании формирования ударного импульса в стержнях при ударе по ним бойками различных форм // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: Труды региональной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Под общей редакцией С.М. Кулакова / СибГИУ. – Новокузнецк, 2002. – С. 266-267.
4. Дворников Л.Т. Анализ форм бойков ударных механизмов с точки зрения рациональности их применения / Л.Т. Дворников, И.А. Жуков // Наукоемкие технологии разработки и использование минеральных ресурсов: Материалы Международной научно-практической конференции. Сборник научных статей / Под редакцией В.Н. Фрянова. – Новокузнецк: СибГИУ, 2003. – С. 118-125.
5. Дворников Л.Т. Использование катеноидальных бойков в ударных системах технологического назначения / Л.Т. Дворников, И.А. Жуков // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-9-2003): Доклады 9-й Международной научно-практической конференции. Улан-Удэ, 23, 24 сент. 2003 г. / Отв. ред. В.Н. Масленников. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. – С. 112-115.
6. Жуков И.А. О преимуществах использования в ударных системах катеноидальных бойков и о возможности их встраивания в реальные конструкции // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Под общей редакцией С.М. Кулакова; СибГИУ. – Новокузнецк, 2003. – Вып. 7. – Ч. II. Технические науки. – С. 215-218.
7. Дворников Л.Т. Решение задачи о продольном соударении стержней на ЭВМ / Л.Т. Дворников, И.А. Жуков // X Юбилейная Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», посвященная 400-летию г. Томска, 29 марта – 2 апреля 2004 г. Труды. В 2-х т. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2004. – Т. 1. – С. 151-153.
8. Дворников Л.Т. Биметаллический ударник / Л.Т. Дворников, И.А. Жуков // XXIV Российская школа по проблемам науки и технологий, посвященная 80-летию со дня рождения академика В.П. Макеева. Тезисы докладов. – Миасс: МСНТ, 2004. – С. 13.

9. Жуков И.А. Изображение ударного импульса, генерируемого катеноидным бойком при ударе по полубесконечному стержню // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Под общей редакцией С.М. Кулакова; СибГИУ. – Новокузнецк, 2004. – Вып. 8. – Ч. II. Технические науки. – С. 273-275.
10. Дворников Л.Т. Боек ударного механизма / Л.Т. Дворников, И.А. Жуков // Инновации и изобретения года: материалы регионального конкурса. – Кемерово, 2005. – С. 38.
11. Дворников Л.Т. Аналитическое исследование формирования ударного импульса в полубесконечном стержне при ударе по нему бойком полукатеноидальной формы / Л.Т. Дворников, А.А. Мясников, И.А. Жуков // Материалы пятнадцатой научно-практической конференции по проблемам механики и машиностроения. Под редакцией профессора Дворникова Л.Т. и профессора Живаго Э.Я. – Новокузнецк, СибГИУ, 2005. – С. 154-161.
12. Жуков И.А. Задачи синтеза геометрии ударяющих тел ударных систем технологического назначения / И.А. Жуков, Л.Т. Дворников // Тезисы докладов Международной научной конференции «Проблемы теоретической и прикладной механики» (1-2 марта 2006г.): – Алматы: Казак университеті, 2006 г. – С. 118.
13. Дворников Л.Т. Способ образования катеноидных бойков ударных механизмов / Л.Т. Дворников, И.А. Жуков, А.Г. Стипанов // Инновации и изобретения года: материалы регионального конкурса. – Кемерово, 2006. – С. 31-32.
14. Дворников Л.Т. Продольный удар полукатеноидальным бойком: **Моногр.** / Л.Т. Дворников, И.А. Жуков. – СибГИУ, Новокузнецк – 2006. – 80 с.
15. Дворников Л.Т. Повышение КПД бурильных машин ударного действия / Л.Т. Дворников, И.А. Жуков // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов: Материалы Международной научно-практической конференции: сборник научных статей/ СибГИУ; Под ред. В.Н. Фрянова, Е.В. Пугачева. – Новокузнецк, 2006. – С. 188-190.
16. Жуков И.А. Современные проблемы совершенствования машин ударного действия / И.А. Жуков, Л.Т. Дворников // Проблемы механики современных машин: Материалы третьей международной конференции/ ВСГТУ. – Улан-Удэ, 2006. – Т. 2. 0– С. 17-20.
17. Дворников Л.Т. Анализ и обобщение закономерностей внедрения инструмента в горные породы при ударном воздействии / Л.Т. Дворников, И.А. Жуков // Материалы шестнадцатой научно-практической конференции по проблемам механики и машиностроения. Под редакцией профессора Дворников Л.Т. и профессора Живаго Э.Я. Новокузнецк, СибГИУ, 2006. – С. 225-229.
18. Дворников Л.Т. Синтез геометрии бойков ударных механизмов посредством графоаналитического метода / Л.Т. Дворников, И.А. Жуков // Ударно-вибрационные системы, машины и технологии. Материалы III

- Международного научного симпозиума, – Орел: ОрелГТУ, 2006. – С. 35-41.
19. Дворников Л.Т. Буровые устройства для разработки месторождений путем образования в хрупких средах отверстий некруглого сечения / Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сб. науч. статей / Л.Т. Дворников, И.А. Жуков // Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2007. – С. 107-112.
 20. Дворников Л.Т. Теоретические основы бурения хрупких сред без поворота инструмента вокруг его оси / Л.Т. Дворников, И.А. Жуков // **Горный информационно-аналитический бюллетень**. – 2007. – №9. – С. 269-273.
 21. Дворников Л.Т. Модификация дифференциальных уравнений теории удара, более точно моделирующих процесс колебания стержней / Л.Т. Дворников, И.А. Жуков // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-13-2007): Доклады (материалы) 13-й Междунар. Науч.-практ. конф. Кемерово, 1-3 окт. 2007г. / Отв. ред. В.Н. Масленников. – Томск: САН ВШ; В-Спектр, 2007. – С. 129-132.
 22. Жуков И.А. Уточнение гипотезы плоских сечений Сен-Венана при решении задач о продольных колебаниях в сложных волноводах / Материалы семнадцатой научно-практической конференции по проблемам механики и машиностроения. Под редакцией профессора Дворникова Л.Т. и профессора Живаго Э.Я. Новокузнецк, СибГИУ, 2007. – С. 117-118.
 23. Жуков И.А. Постановка проблем создания и совершенствования ударных систем, применяемых при бурении шпуров без поворота инструмента вокруг его оси / Материалы семнадцатой научно-практической конференции по проблемам механики и машиностроения. Под редакцией профессора Дворникова Л.Т. и профессора Живаго Э.Я. – Новокузнецк, СибГИУ, 2007. – С. 119-125.
 24. Жуков И.А. Вычислительная модель разрушения горных пород образованием в них отверстий некруглого сечения / XIX Международная Интернет-ориентированная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС-2007): Материалы конференции. – М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2007. – С. 214.
 25. Сараханова Е.В. Модель синтеза геометрии стержней при продольном ударе / Е.В. Сараханова, И.А. Жуков // XIX Международная Интернет-ориентированная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС-2007): Материалы конференции. – М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2007. – С. 230.
 26. Жуков И.А. Расчет колебаний ударных систем посредством модифицированных волновых уравнений с учетом инерции стержней в радиальном направлении / И.А. Жуков, Л.Т. Дворников (Zhukov I.A. Calculation of fluctuations of shock systems by means of the modified wave equations in view of inertia of cores in a radial direction / I.A. Zhukov, L.T. Dvornikov) // V Международная научная конференция «Прочность и разрушение материалов и конструкций»: Материалы конференции. – Т. 2, 12-14 марта 2008г. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2008. – С. 406-407.

27. Дворников Л.Т. Полукатеноид вращения как универсальный боек ударных систем технологического назначения / Л.Т. Дворников, И.А. Жуков // **Горный информационно-аналитический бюллетень**. – 2008. – №4. – С. 282-287.
28. Жуков И.А. Синтез геометрии бойка ударной системы, применяемой для разрушения крепких горных пород / И.А. Жуков, Е.В. Сараханова // **Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сб. науч. статей**. – Новокузнецк: СибГИУ, 2008. – С. 87-89.
29. Жуков И.А. Задачи экспериментального исследования процесса бесповоротного внедрения бурового инструмента в горную породу / И.А. Жуков, Л.Т. Дворников // **Материалы восемнадцатой научно-практической конференции по проблемам механики и машиностроения. Под редакцией профессора Дворникова Л.Т. и профессора Живаго Э.Я.** – Новокузнецк, СибГИУ, 2008. – С. 134-138.
30. Дворников Л.Т. Повышение эффективности разрушения обрабатываемой среды ударными воздействиями / Л.Т. Дворников, И.А. Жуков // **Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-14-2008): доклады (материалы) 14-й Междунар. науч.-практ. конф. Омск, 6-8 окт. 2008г. / Отв. ред. В.Н. Масленников**. – Томск: САН ВШ; В-Спектр, 2008. – С. 47-50.
31. Жуков И.А. Модификация дифференциальных уравнений волновой теории продольного соударения стержней / И.А. Жуков, Л.Т. Дворников // **Известия Томского политехнического университета**. – 2008. – Т. 313. – №2. – С. 5-9.
32. Жуков И.А. Бойки ударных механизмов, имеющие аналитическое решение / И.А. Жуков, Л.Т. Дворников // **Справочник. Инженерный журнал**. – 2008. – №10(139). – С. 17-20.
33. Жуков И.А. Анализ форм бойков ударных систем графоаналитическим методом / И.А. Жуков, Л.Т. Дворников // **Вестник компьютерных и информационных технологий**. – 2009. – №1. – С. 15-19.
34. Жуков И.А. Разрушение хрупких сред безлезвийным инструментом с образованием отверстий некруглого сечения / И.А. Жуков, Л.Т. Дворников // **Горное оборудование и электромеханика**. – 2009. – №2. – С. 23-26.
35. Дворников Л.Т. О применении безлезвийного инструмента при разрушении хрупких сред ударом / Л.Т. Дворников, И.А. Жуков, В.Н. Цвигун, Е.В. Сараханова // **Наука. Образование. Техника**. – Часть 1. – Ош: Кыргызско-Узбекский университет. – 2009. – №1 (1). – С. 22-25.
36. Жуков И.А. Научно-методические основы определения физико-механических свойств горной породы при исследовании разрушения хрупких сред ударом // **Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сб. науч. статей / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова**. – Новокузнецк, 2009. – С. 96-100.
37. Жуков И.А. К вопросу о рациональном проектировании бойков из композитных материалов для механизмов ударного действия / И.А. Жуков, А.Е. Бурда // **Наукоемкие технологии разработки и использования**

- минеральных ресурсов: сб. науч. статей / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2009. – С. 100-103.
38. Жуков И.А. Эффект симультанности при ударном разрушении горной породы безлезвийным инструментом / И.А. Жуков, Л.Т. Дворников, В.Н. Цвигун // **Вестник КузГТУ**. – 2009. – №3. – С. 13-16.
39. Жуков И.А. Структурные преобразования волновых уравнений колебаний стержней при продольном ударе / И.А. Жуков, Л.Т. Дворников // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-15-2009): доклады (материалы) 15-й Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 5-7 окт. 2009г. / Отв. ред. В.Н. Масленников. – Томск: САН ВШ; В-Спектр, 2008. – С. 61-63.
40. Жуков И.А. Теоретические основы синтезирования форм бойков ударных систем технологического назначения / И.А. Жуков, Е.В. Сараханова // **Известия Томского политехнического университета**. – 2009. – Т. 315. – №2. – С. 173-177.
41. Жуков И.А. Программный комплекс для определения рациональных параметров ударных механизмов / И.А. Жуков, Л.Т. Дворников // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: Труды VII Всероссийской научно-практической конференции. – Новокузнецк: СибГИУ, 2009. – С. 394-396.
42. Патент №2182953 РФ, МПК E21B1/38, B25D17/02. Способ образования видов катеноидных бойков ударных механизмов / Дворников Л.Т., Жуков И.А., Стипанов А.Г. (РФ) – №2000132024/03; приоритет от 20.12.2000; опубл. 27.05.2002; Бюл. №15.
43. Патент №2234583 РФ, МПК 7 E21B1/38, B25D17/02. Боек ударного механизма / Дворников Л.Т., Жуков И.А. (РФ) – № 2003109114/03; приоритет от 31.03.2003; опубл. 20.08.2004; Бюл. №23.
44. Патент №2347885 РФ, МПК E21B 10/56. Твердосплавная вставка – катенид / Дворников Л.Т., Жуков И.А. (РФ) – №2007123865; приоритет от 25.06.2007; опубл. 27.02.2009; Бюл. №6.
45. Свидетельство №2007613024. Анализ форм бойков ударных механизмов / Дворников Л.Т., Жуков И.А. (РФ) - №2007611961; поступление 18.05.2007; зарегистр. 11.07.2007.
46. Свидетельство №2007614717. Синтез геометрии бойков ударных механизмов / Дворников Л.Т., Жуков И.А. (РФ) - №2007613793; поступление 24.09.2007; зарегистр. 14.11.2007.

Жуков Иван Алексеевич

Разработка научно-методических основ исследования и совершенствования ударных систем (на примере машин, применяемых при разрушении хрупких сред)

Автореферат

Подписано в печать 24.12.2009г.

Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.
Усл.печ.л. 1,86. Уч.-изд.л. 2,08. Тираж 100 экз. Заказ №167.

Сибирский государственный индустриальный университет
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.
Типография СибГИУ