



На правах рукописи

Тимофеев Евгений Геннадьевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМАХ
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К МАШИНАМ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ**

Специальность: 1.2.2 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

Научный руководитель – доктор технических наук доцент
Жуков Иван Алексеевич

Официальные оппоненты: **Каледин Валерий Олегович**, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской лабораторией математического моделирования Кузбасского гуманитарно-педагогического института Кемеровского государственного университета, г. Новокузнецк

Битюрин Анатолий Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Промышленное и гражданское строительство» Ульяновского государственного технического университета

Ведущая организация – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Защита диссертации состоится 18 апреля 2024 г. в 15 часов 15 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.02, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) по адресу: 634050 г. Томск, ул. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на официальном сайте ТУСУРа по адресу <https://postgraduate.tusur.ru/urls/nqjahth7>

Автореферат разослан « _____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Татьяна Николаевна Зайченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Машины ударного действия (отбойные молотки, перфораторы, пневмоударники, дробилки и др.) имеют широкий спектр применения в различных отраслях промышленности, таких как, горное дело, машиностроение, строительство и т.д. Их используют для обработки и разрушения различных объектов с колоссальными усилиями, возникающими в результате нанесения продольного удара. Для организации ударного воздействия в машинах предусмотрен *ударный узел*, который представляет собой стрержневую систему, состоящую в большинстве случаев из двух стержней: бойка (ударника) и волновода. Оценка эффективности применения таких машин связана с анализом динамики ударного процесса, а именно с оценкой параметров генерируемого волнового ударного импульса, содержащего энергию, необходимую для разрушения или деформации объекта воздействия.

Существующие математические модели и аналитические методы исследования динамических процессов в стержневых ударных системах основываются на применении волновой теории Сен-Венана и применимы лишь к системам с бойками простых геометрических форм, представляющих, как правило, тела вращения различных кривых линий. Однако ударники современных машин имеют сложную геометрическую форму, они не только снабжены криволинейными боковыми поверхностями, но и имеют отверстия, канавки, проточки, фаски, галтели, предназначенные для предания необходимой устойчивости в корпусе механизма, а также обусловленные принципом действия машин (гидравлический, пневматический, электромеханический) и технологическими требованиями изготовления деталей машин.

Таким образом, настоящая работа, посвященная математическому моделированию, разработке численных методов и программного обеспечения для исследования ударных систем с соударяющимися стержнями любой сложной геометрической формы, представляется несомненно актуальной.

Степень разработанности темы.

Основы прикладной теории продольного соударения стержней были заложены в трудах Б. де Сен-Венана, Ж.В. Буссинеска, А. Лява, Н.С. Кошлякова, С.П. Тимошенко, Н.А. Кильчевского. Наиболее широкое применение при исследовании ударных систем получила волновая теория Сен-Венана, позволившая найти различным ученым несколько аналитических решений бойков, описанных одноступенчатыми сплошными телами вращения.

В 1974 году К.И. Иванов и В.Д. Андреев представляют первую модель, учитывающую наличие нескольких отличающихся по диаметральным размерам ступеней бойка. Опубликованные ими подходы в монографии «Техника бурения при разработке полезных ископаемых», показанные на примере решения трехступенчатого цилиндрического ударника, в последующем легли в основу графодинамического метода расчета ударного импульса.

В продолжение развития идеи Иванова К.И. и Андреева В.Д. на кафедре механики и машиностроения СибГИУ коллективом научной школы профессора Л.Т. Дворникова был разработан численно-аналитический метод расчета ударных импульсов, генерируемых бойками с множественным количеством цилиндрических ступеней, аппроксимирующих криволинейное тело вращения ударника.

Помимо решений задач определения ударных импульсов от бойков различной геометрической формы существует ряд моделей, алгоритмов и программных средств, описывающих динамические процессы в стержневых системах машин ударного действия. В частности, при нанесении удара в стержневых системах, имеющих неоднородную структуру и снабженных неудароустойчивыми связями. Этим вопросам были посвящены работы д.т.н., проф. Манжосова В.К. и его учеников: В.В. Слепухина, А.А. Битюрин, П.А. Вельмисова и др. Большое внимание изучению продольного удара и связанных с ним волновых процессов уделяют и за рубежом, что отражено в работах: Г. Кольского, Л. Бержерона, Г. Фишера, И. Хоукса, В. Гольдсмита, Р. Саймона, А. Venatar, А. Chakraborty, J. Naprstek и др.

Однако, имеющиеся математические модели, методы и алгоритмы описывают продольный удар в стержневых системах, нанесенный телом, имеющим относительно простую геометрическую форму, в основном это цилиндрические тела или тела вращения с образующей, заданной одной или несколькими кривыми.

Данная работа устраняет указанный пробел, в ней разработан и реализован численный метод анализа продольного удара в стержневой системе, в которой боек может быть представлен в виде тела геометрической формы любой сложности, в том числе, и не имеющей описания в виде математических зависимостей, например, в виде 3D-модели.

Помимо этого, в работе решается новая для практики создания машин ударного действия задача – синтез геометрических параметров ударного узла по физико-механическим свойствам разрушаемого объекта.

Объект исследования – динамический ударный процесс в стержневой системе машин ударного действия.

Предмет исследования – математические модели, численные методы и программные средства анализа ударных процессов в стержневых системах с бойками сложной геометрической формы.

Цель работы заключается в повышении эффективности и обосновании рациональной геометрии элементов ударного узла путем разработки моделей, численных методов и программных средств для моделирования ударных импульсов в стержневой системе машин.

Идея работы заключается в развитии возможностей применения графодинамического метода решения задачи о продольном соударении цилиндрических стержней к исследованию динамики ударных процессов в системах машин с бойками, обладающими геометрической формой любой сложности.

Задачи исследования:

- 1) Проанализировать графодинамический метод анализа ударных динамических процессов в стержневой системе и разработать на его основе математическую модель соударения тел при условии их выполнения в виде множества цилиндрических ступеней.
- 2) Разработать численный метод анализа ударного импульса, генерируемого в стержневой системе бойком любой геометрической формы, преобразуемой к многоступенчатой цилиндрической сплошного поперечного сечения.
- 3) Разработать алгоритм синтеза геометрии бойка по физико-механическим свойствам обрабатываемого объекта, основанным на обратном применении разработанного численного метода анализа стержневых ударных систем.

- 4) Создать программные средства для моделирования продольного соударения стержней геометрической формы любой сложности, позволяющие анализировать и синтезировать наиболее рациональные технические решения конструкций ударных узлов машин.
- 5) Обосновать способ конструктивного исполнения бойка, выполненного в виде тела вращения кривой линии вокруг геометрической оси ударника, снабжением его цилиндроконической оболочкой при условии сохранения параметров генерируемого ударного импульса.

Методы исследования основаны на применении известных положений теории продольного удара; одномерной волновой теории Сен-Венана и графодинамического метода решения задач о продольном соударении стержней; основ численной теории решения задач программирования.

Научная новизна работы заключается в:

- 1) Обосновании возможности математического моделирования динамических волновых процессов в ударной стержневой системе путем представления ударяющего тела любой сложной геометрической формы в виде многоступенчатого цилиндрического тела сплошного поперечного сечения. Предложенная модель отличается многовариантностью задания исходных геометрических параметров соударяющихся тел.
- 2) Разработке численного метода нахождения ударных импульсов, генерируемых бойком различной геометрической формы, и анализа их параметров для выявления наиболее рациональных и оптимальных конструктивных решений. В отличие от известных разработанный метод позволяет получать результаты расчета ударного импульса как в числовом, так и в графическом представлении за весь период его длительности.
- 3) Построению алгоритма обратного применения графодинамического анализа продольного соударения стержней, обеспечивающего решение задачи нахождения геометрических параметров ударных узлов машин в зависимости от свойств разрушаемых ими объектов. Построенный алгоритм отличается тем, что позволяет с высокой точностью синтезировать ударник с учетом эксплуатационного назначения машины, в ударном узле которой он будет применяться.
- 4) Обосновании возможности сохранения параметров ударного импульса, генерируемого бойком с криволинейной образующей боковой поверхности, путем оснащения бойка цилиндроконической оболочкой и внутренней полостью с одинаковым распределением объема по длине бойка. Предложенное конструктивное исполнение бойка отличается от традиционных тем, что боек, несмотря на наличие цилиндрической внешней геометрической формы, генерирует ударный импульс, обусловленный только ударной частью криволинейной формы.

Достоверность и обоснованность научных положений и результатов обеспечена тем, что в основу разработанных численных методов анализа стержневых ударных систем положен графодинамический метод, основанный на применении одномерной волновой теории Сен-Венана, а так же удовлетворительной сходимостью численных расчетов и экспериментальных данных.

Научные положения, выносимые на защиту:

- 1) Математическая модель ударной стержневой системы, основанная на представлении ударяющего тела любой геометрической сложности в виде ступенчатого цилиндрического тела вращения, позволяет объективно оценивать динамические волновые процессы при соударении стержней (соответствует п. 7 паспорта специальности 1.2.2).
- 2) Численный метод, построенный на математических принципах графодинамического описания процесса соударения стержней, обеспечивает возможность с высокой степенью точности получить и проанализировать волновые ударные импульсы, генерируемые бойками различной геометрической формы, с целью подбора наиболее рациональных и оптимальных (соответствует п. 7 паспорта специальности 1.2.2).
- 3) Численно-аналитический метод, основанный на обратном порядке применения алгоритма графодинамического анализа продольного соударения стержней, позволяет определять геометрические параметры ударного узла машины в зависимости от свойств разрушаемого объекта (соответствует п. 7 паспорта специальности 1.2.2).
- 4) Введение в конструкцию бойка с криволинейной образующей боковой поверхности цилиндроконической оболочки и внутренней полости с одинаковым распределением объема по длине бойка позволяет сохранить параметры ударного импульса, генерируемого бойком исходной геометрической формы (соответствует п. 8 паспорта специальности 1.2.2).
- 5) Разработанный комплекс программ дает возможность проведения вычислительных экспериментов с целью анализа или синтеза ударного узла машины, обладающего геометрической формой любой сложности, описываемой как функциональными математическими зависимостями, так и трехмерной компьютерной моделью (соответствует п. 3 паспорта специальности 1.2.2).

Личный вклад автора. Результаты, приведенные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно, а именно: разработана математическая модель стержневой ударной системы, позволяющая решать задачу моделирования динамических процессов; разработан численный метод и алгоритм расчета ударного импульса от бойков сложной геометрической формы; разработан комплекс программ для анализа ударных процессов в стержневых системах машин ударного действия с бойками геометрической формы любой сложности; разработан численно-аналитический метод синтеза геометрии бойка ударного узла машины в зависимости от физико-механических свойств разрушаемого объекта; предложено и обосновано техническое решение конструкции синтезируемого бойка в виде тела с криволинейным штоком и оболочкой цилиндроконической формы, сохраняющего генерируемый ударный импульс.

Практическая ценность результатов работы заключается в прикладной направленности разработанных математических моделей, численных методов и программных средств, которые могут быть использованы при проектировании и модернизации ударных узлов машин ударного действия. На разработанный комплекс программ получено 4 свидетельства об официальной регистрации. Материалы диссертационного исследования внедрены в учебный процесс Сибирского государственного индустриального университета в дисциплинах «Компьютерное моделирование объектов машиностроения», «Математическое

моделирование в технике», «Вычислительная механика и компьютерный инжиниринг».

Реализация результатов работы

Результаты диссертационного исследования приняты к внедрению: 1) в методике «Анализа и синтеза конструктивных параметров бойков горных машин ударного действия», а так же в формате программного обеспечения в Институте горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, где используются для модернизации конструкций погружных пневмоударных машин; 2) в учебный процесс Сибирского государственного индустриального университета, где используются для подготовки студентов по направлениям: «Прикладная механика», «Технологические машины и оборудование» и «Машиностроение».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на: II и III международных научно-практических конференциях «Автоматизированное проектирование в машиностроении» (Новокузнецк, 2014, 2015); VI и VIII Международных конференциях «Проблемы механики современных машин» (Улан-Удэ, 2015, 2022); 5-ой Международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование» (Санкт-Петербург, 2016); Международной научно-технической конференции «Проблемы фундаментальной и прикладной информатики в управлении, автоматизации и мехатронике» (Курск, 2017); Всероссийской научно-технической конференции «Интеллектуальные системы, управление и мехатроника» (Севастополь, 2018); 18-ой Международной молодежной конференции «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2018)» (Москва, 2018); XII международной научно-практической конференции «Современные проблемы машиностроения» (Томск, 2019).

Соответствие паспорту специальности Диссертационная работа соответствует пунктам 3, 7, 8 паспорта специальности ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Публикации – по теме диссертации опубликовано 14 научных работ, в том числе: 2 работы, входящие в наукометрическую базу Scopus, 3 работы, в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, получено 4 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа включает введение, четыре главы, заключение, список литературы из 147 наименований. Объем диссертации составляет 144 страницы машинописного текста, содержит 10 таблиц, 68 рисунков, 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы исследования с формулировкой цели и задач исследования. Определены предмет и объект исследования, сформулирована идея работы, отражена ее научная новизна и практическая значимость.

Первая глава содержит описание современных подходов к исследованию стержневых ударных систем любой геометрической формы, которые применяются в машинах ударного действия. Генерирование энергии в системах такого вида

(рис. 1) осуществляется путем нанесения продольного удара. Для простоты описания бьющее тело называется *бойком* или *ударником*, а принимающее удар тело – *волноводом*. Последний заканчивается инструментом, внедряющимся в объект воздействия. Передача энергии к обрабатываемому телу производится посредством волновых ударных импульсов, распространяющихся по волноводу.

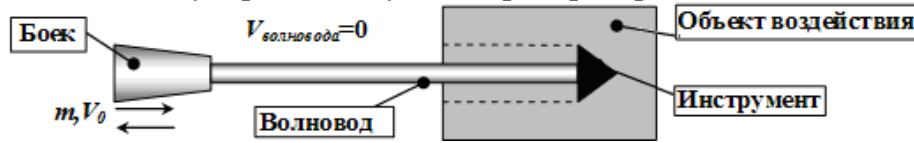


Рис. 1. Схема стержневой ударной системы

Одной из актуальных проблем механики является изучение динамических процессов, связанных с формированием таких импульсов. Эта проблема ставит перед собой две основные задачи:

- задачи, связанные с анализом геометрии ударников, позволяющим определять форму и характеристики генерируемых ударных импульсов для отыскания наиболее рациональных и оптимальных конструктивных решений;
- задачи, связанные с синтезом элементов ударных узлов машин по физико-механическим свойствам разрушаемых объектов.

Решение задачи определения формы ударных импульсов в стержнях переменного сечения при продольном ударе базируется на одномерной волновой теории Сен-Венана, которая является базой графодинамического метода, основы которого изложены в известной монографии К.И. Иванова и В.Д. Андреева. Анализ геометрии ударников заключается в нахождении коэффициентов отражения r_i и прохождения p_i прямых и обратных ударных волн на границах перемены сечений цилиндрических ступеней, составляющих боек, в них содержится геометрический параметр – площадь сечения S_i i -той цилиндрической ступени бойка:

$$r_i = \frac{S_{i-1} - S_i}{S_{i-1} + S_i}, \quad (1)$$

$$p_i = \frac{2S_{i-1}}{S_{i-1} + S_i}. \quad (2)$$

Недостатком этого метода является то, что он позволяет проводить анализ ударников простых геометрических форм, математика метода является численно-аналитической, что делает автоматизацию расчета зависимой от коммерческих программных приложений.

Решение задачи синтеза базируется на обратном принципе применения графодинамического метода. Известный, разработанный профессором И.А. Жуковым подход к решению этой задачи позволяет синтезировать ступенчатый боек, состоящий всего лишь из 10 цилиндрических ступеней, что не обеспечивает требуемую точность расчета формы ударника, но доказывает возможность обратного принципа применения графодинамического метода.

Во **второй главе** осуществляется численное моделирование стержневых ударных систем с бойками любой геометрической формы. Приводится описание численного метода анализа геометрии ударников и численно-аналитического метода синтеза бойка по форме первой волны ударного импульса, вычисленной в зависимости от свойств объекта разрушения.

По геометрической форме ударники делят на две группы: *простые* и *сложные*. *Простые* бойки представляют собой тела вращения с образующей боковой поверхности, заданной несколькими кривыми вида $f(x)$:

$$y = \begin{cases} f_1(x) + \frac{d_1}{2}, 0 \leq x < L_1; \\ f_2(x) + f_1(L_1), L_1 \leq x < L_1 + L_2; \\ \dots \\ f_k(x) + f_{k-1}(\sum_{z=1}^{k-1} L_z), \sum_{z=1}^{k-1} L_z \leq x < \sum_{z=1}^k L_z. \end{cases} \quad (3)$$

где d_1 – диаметр ударного торца, k – количество ступеней, L_1, L_2, \dots, L_k – длины ступеней бойка. Эскиз модели выполняется в прямоугольной системе координат, где ось абсцисс совпадает с геометрической осью бойка (рис. 2,а). Расчет ударного импульса осуществляется для ступенчатого ударника, составленного из цилиндров одинаковой длины l_1 и различных или одинаковых диаметров (рис. 2,б).

Диаметр каждой ступени определяется согласно выражению:

$$d_i = 2f_k(x_i = \frac{2i-1}{2} l_1), \quad (4)$$

где x_i – координата середины текущей цилиндрической ступени, i – порядковый номер цилиндрической ступени при отсчете от ударного торца бойка (рис. 2,б).

Математическая модель определяет количество ступеней N и имеет вид:

$$\sum_{i=1}^N \rho l_1 \pi \frac{d_i^2}{4} = m \pm m \frac{\varepsilon}{100\%}, \quad (5)$$

где ρ – плотность материала бойка и волновода, ε – относительная погрешность вычислений ($\approx 4-5\%$), m – масса бойка. Итогом моделирования является массив S_i , содержащий значения площадей цилиндрических ступеней, который вместе со значением площади поперечного сечения волновода S_0 , является численной моделью стержневого ударного узла машины.

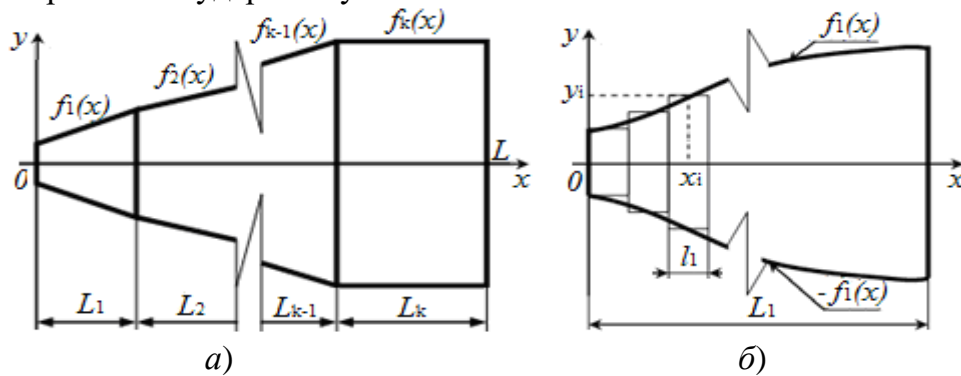


Рис. 2. а) модель простого бойка; б) представление смоделированного бойка в виде ступенчатого цилиндрического тела

Сложные бойки выполняются из тел вращения переменного поперечного сечения с добавлением различных конструктивных элементов (рис. 3,а). Формирование численных моделей таких ударников производится в САД системах 3D-моделирования, путем рассечения 3D-модели секущими плоскостями, параллельными друг другу, перпендикулярными геометрической оси ударника и расположенными на расстоянии l_1 друг от друга. Количество плоскостей выбирается произвольно и зависит от сложности конструкции ударника. Далее определяются величины площадей сечений бойка S_i , которые вместе с площадью

сечения волновода S_0 записываются в текстовый файл (*.txt). Этот файл содержит элементы одномерного числового массива, который является численной моделью ударного узла с бойком сложной геометрической формы. При выполнении расчета ударного импульса каждое сечение заменяется сплошным кругом равной площади соответствующего сечения реального бойка и формируется ударник приведенной формы, состоящий из N цилиндров одинаковой длины l_1 , имеющих общую ось симметрии (рис. 3,б).

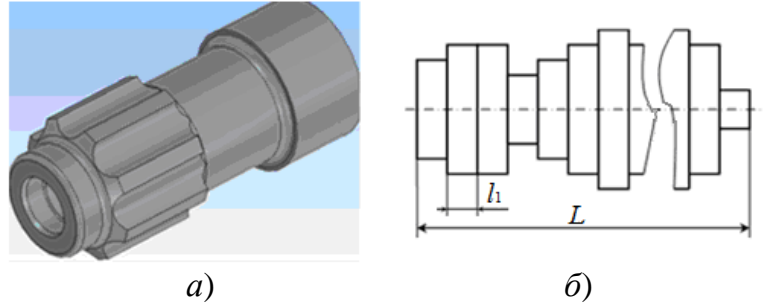


Рис. 3. а) 3D-модель сложного бойка; б) приведенная форма сложного бойка

Для расчета ударного импульса по численной модели ударного узла на базе графодинамического метода был разработан численный метод, имеющий следующую алгоритмическую схему.

1) Задание исходных параметров стрержневой ударной системы: S_i – численная модель ударного узла, E и ρ – модуль упругости и плотность материала бойка и волновода (в рамках решаемой задачи боек и волновод выполнены из одного материала); q – число единичных временных интервалов (важно: одна волна ударного импульса содержит $2N$ единичных временных интервалов); l_1 – длина расчетной цилиндрической ступени.

2) Определение длительности временного интервала T , за который производится расчет ударного импульса:

$$T = ql_1 \sqrt{\frac{\rho}{E}}. \quad (6)$$

3) Расчет коэффициентов отражения r и прохождения p прямых и обратных волн, генерируемых при ударе:

$$r_i = \frac{S_{i-1} - S_i}{S_i + S_{i-1}} \text{ и } p_i = \frac{2S_{i-1}}{S_i + S_{i-1}}, \quad 1 \leq i \leq N; \quad (7)$$

$$r_i = \frac{S_{i-N+1} - S_{i-N}}{S_{i-N+1} + S_{i-N}} \text{ и } p_i = \frac{2S_{i-N+1}}{S_{i-N+1} + S_{i-N}}, \quad (N+1) \leq i \leq (2N-1). \quad (8)$$

4) Расчет элементов матрицы сил P_z^j (размерностью $2N \times q$), представляющей численную модель динамической картины удара:

$$\begin{aligned} P_{2i-1}^1 &= \frac{V_0 \sqrt{E\rho}}{2} S_i, \quad 1 \leq i \leq N; \\ P_{2i}^1 &= -\frac{V_0 \sqrt{E\rho}}{2} S_i, \quad 1 \leq i \leq N; \\ P_{2N-1}^j &= -P_{2N}^{j-1}, \quad 2 \leq j \leq q; \\ P_{2i-1}^j &= P_{2i+1}^{j-1} p_{i+1} + P_{2i}^{j-1} r_{N+i}, \quad 1 \leq i \leq N; 2 \leq j \leq q; \\ P_2^j &= P_1^{j-1} r_1, \quad 2 \leq j \leq q; \\ P_{2i}^j &= P_{2i-1}^{j-1} r_i + P_{2i-2}^{j-1} p_{N+i-1}, \quad 1 \leq i \leq N; 2 \leq j \leq q. \end{aligned} \quad (9)$$

5) По элементам первой строки матрицы P_z^j формирование одномерного массива F_j согласно выражению:

$$F_j = P_1^j p_1, 1 \leq j \leq q. \quad (10)$$

Данный массив вместе со значением t_1 является численной моделью ударного импульса, где t_1 – время прохождения ударной волны одной цилиндрической ступени бойка:

$$t_1 = \frac{L}{N} \sqrt{\frac{\rho}{E}}. \quad (11)$$

6) По элементам массива F_j построение силовой гистограммы (рис. 4,а) (ступенчатая линия), которая аппроксимируется гладкой кривой (пунктирная линия), описываемой функцией вида:

$$F(t) = f(t) + F_0, \quad (12)$$

где $f(t)$ – функция, задающая рост амплитуды первой волны импульса; F_0 – начальное значение силы удара, равное первому элементу массива F_i .

7) Проведение анализа ударного импульса с определением его характеристик: F_{\max} – амплитуда ударного импульса; импульс силы первой волны – численно равный площади $S_{\text{импI}}$ под графиком первой волны импульса; F_{\max}/F_0 – коэффициент усиления ударного импульса; если длительность промежутка времени, за который произведен расчет импульса больше времени двух первых волн, то определяется импульс силы, содержащийся в двух первых волнах рассчитанного импульса $S_{\text{импI}} + S_{\text{импII}}$. (рис 4,б).

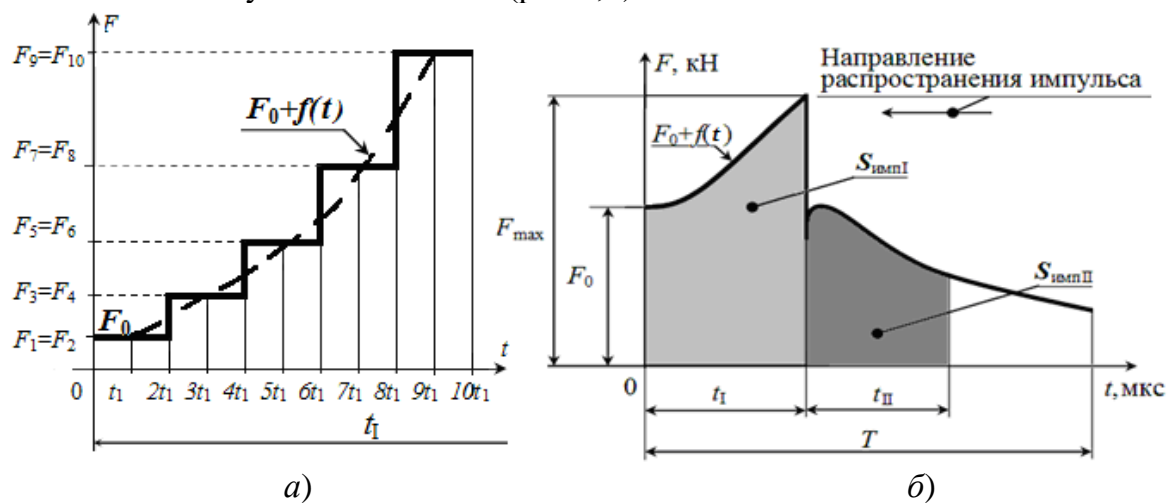


Рис. 4. а) Построение математической модели ударного импульса;
б) ударный импульс и его характеристики

Первостепенным является вывод о том, соответствует ли полученный импульс тому предназначению машины, на которое она рассчитана. Например, в машине, предназначенной для разрушения горных пород, исходной характеристикой объекта разрушения является зависимость «сила-внедрение». Импульс в первую очередь должен соответствовать силам сопротивления породы при внедрении в нее инструмента под действием удара, это соответствует требованию минимизации энергии в отраженной волне. Если исходным сделать зависимость «сила-внедрение», то тогда вместо задачи анализа получаем задачу синтеза, которая на сегодняшний день для практики создания машин ударного действия представляется более актуальной.

Для синтеза ударного узла, содержащего ступенчатый боек, был разработан численно-аналитический метод (рис. 5), основанный на обратном порядке применения алгоритма анализа ударного импульса. Он по численной модели первой волны ударного импульса производит расчет численной модели ударного узла, содержащего ступенчатый боек, которым при нанесении удара по волноводу генерируется заданный импульс.

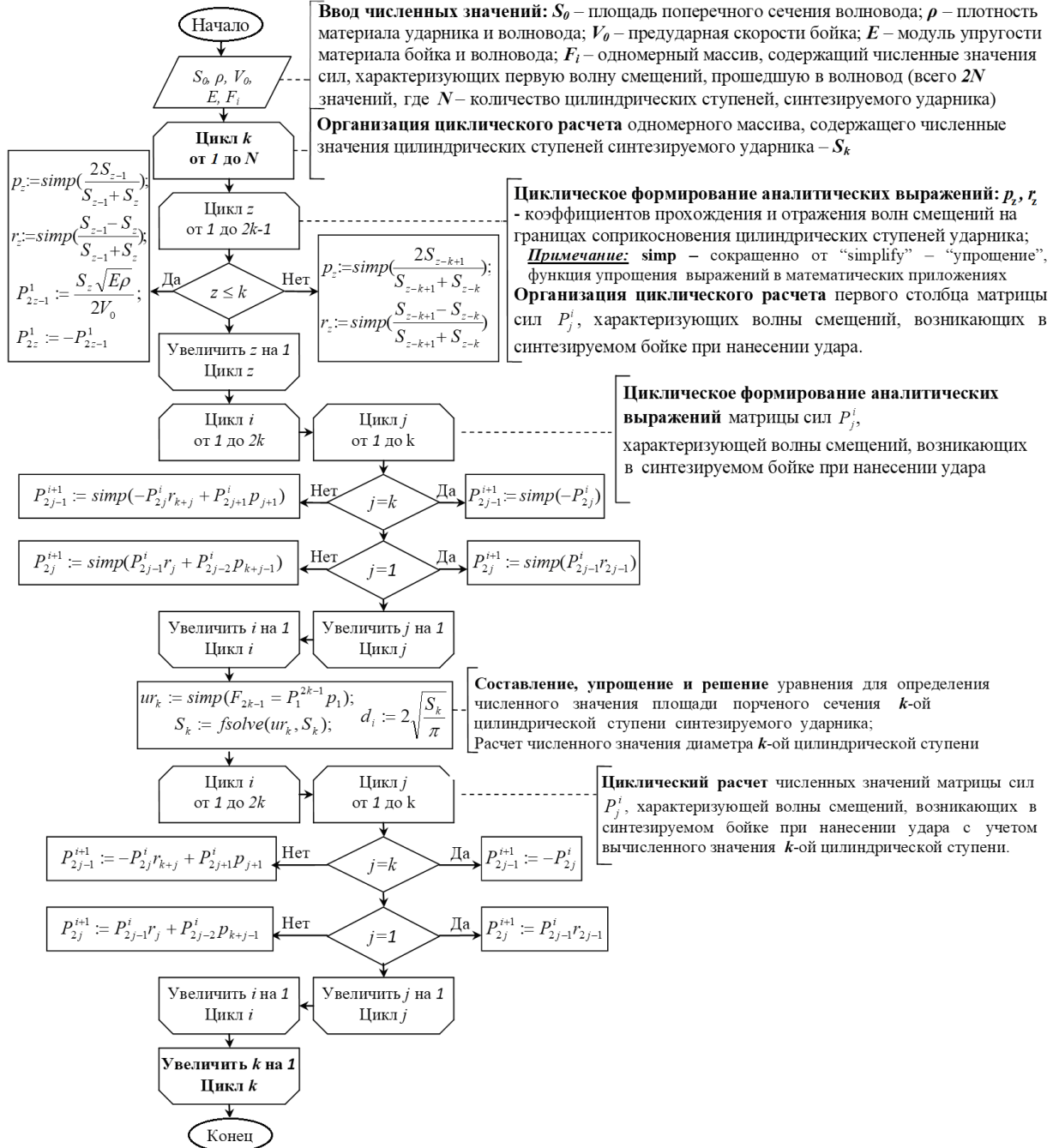


Рис. 5. Блок-схема вычислительного алгоритма численно-аналитического метода расчета численной модели ударного узла

Третья глава содержит описание комплекса программных средств, разработанных для анализа геометрии бойков стержневых ударных систем, состоящего из трех инженерно-расчетных программ, написанных в среде *Lazarus* на языке программирования *Object Pascal*.

Преимуществом разработанного комплекса программ является независимость от сторонних приложений, кроссплатформенность определяет возможность их работы во всех возможных операционных системах семейств: Windows, Linux, MacOS и др. Работа комплекса осуществляется при соблюдении следующих требований к ресурсам ЭВМ: 100Mb HDD, 512Mb RAM. Программы комплекса имеют схожий интерфейс, состоящий из двух программных вкладок:

- 1) «Проект бойка» – здесь вводятся параметры исследуемого ударного узла, моделируется ударник, рассчитываются характеристики бойка;
- 2) «Расчет ударного импульса» – здесь решается динамическая часть задачи: производится расчет и построение ударного импульса от смоделированного ударного узла, и определяются его характеристики (*примечание*: данная вкладка общая для всех программ).

I программа: «Ударный импульс 2.0» (свидетельство о регистрации №2015662766) – моделирует ударные узлы с простыми бойками, образующая боковой поверхности которых задана одной кривой вида $y=f(x)$ (рис. 6), рассчитывает и анализирует генерируемый ими ударный импульс (рис. 7).

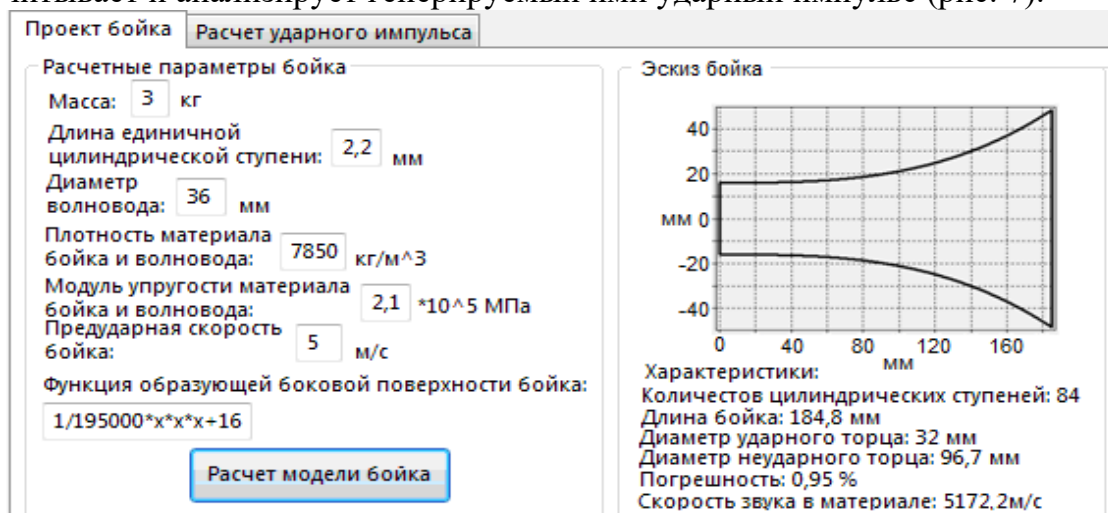


Рис. 6. Вкладка «Проект бойка» программы «Ударный импульс 2.0»

II программа «Удар многоступенчатым бойком» (свидетельство о регистрации №2017613900) – моделирует ударные узлы с простыми бойками, образующая боковой поверхности которых задана несколькими кривыми вида $y=f(x)$ с известными областями определения (рис. 8), рассчитывает и анализирует генерируемый в них ударный импульс (рис. 7).

III программа «Удар бойком сложной геометрической формы» (свидетельство о регистрации №2019619495) – моделирует ударные узлы с бойками сложной геометрической формы, модели которых выполняются в сторонних САД приложениях. По численным значениям площадей сечений S_i , записанных в текстовый файл, выполняет эскиз приведенного бойка (рис 9), рассчитывает и анализирует генерируемый ударный импульс (рис. 7).

Для подтверждения корректности результатов, полученных при помощи комплекса программ, было проведено сравнение результатов численных вычислений с известными аналитическими решениями для бойков следующих геометрических форм: цилиндрического, конического и полукатеноидального. Результаты статистической обработки дали допустимую погрешность: для цилиндрического бойка – 1,85%, для конического – 6%, для полукатеноидального – 12%.

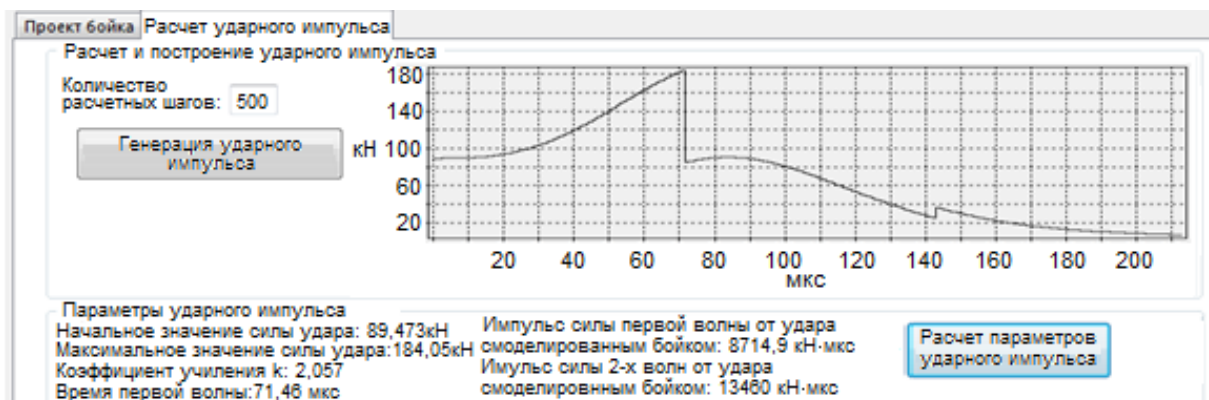


Рис. 7. Вкладка «Расчет ударного импульса» (общая для всех программ комплекса)

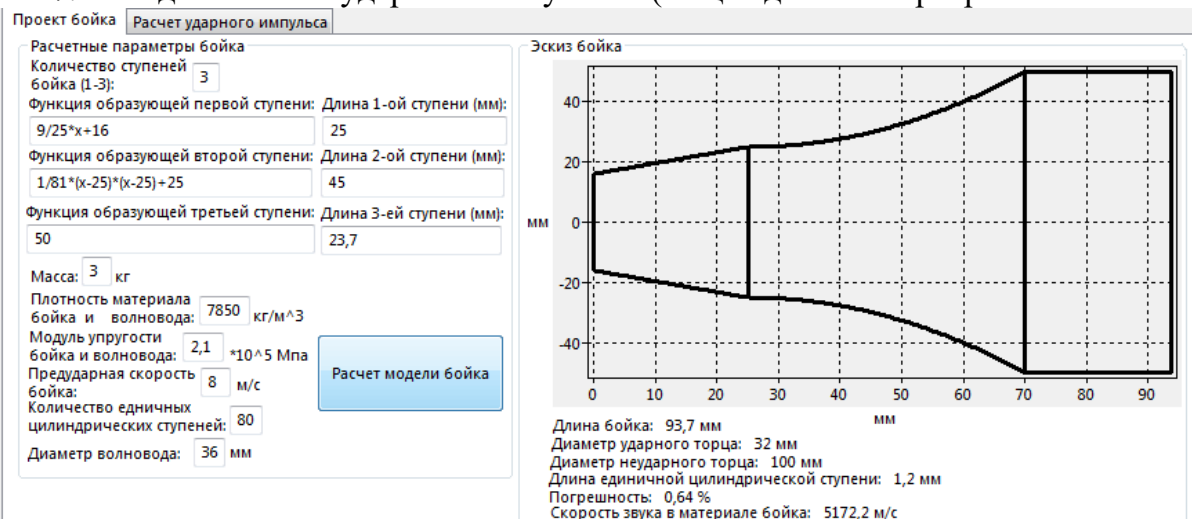


Рис. 8. Вкладка «Проект бойка» программы «Удар многоступенчатым бойком»

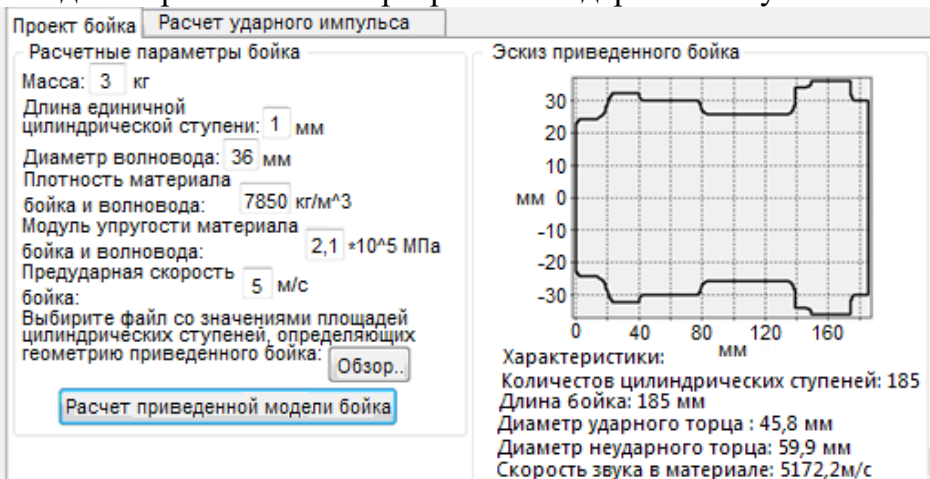


Рис. 9. Вкладка «Проект бойка» программы «Удар бойком сложной геометрической формы»

Для узлов, содержащих сложный боек, оценка достоверности результатов, получаемых при использовании комплекса программ, производилась путем сопоставления результатов численных вычислений с экспериментальными данными, полученными в процессе исследования динамических процессов в погружной пневмоударной машине ПП 110 ЭН (рис 10,а). Осциллограммы импульсов накладывались на теоретические решения, полученные в программе «Удар бойком сложной геометрической формы» (рис 10,б). Результат статистической обработки данных дал удовлетворительную сходимость, погрешность составила $7,3 \pm 2,1\%$.

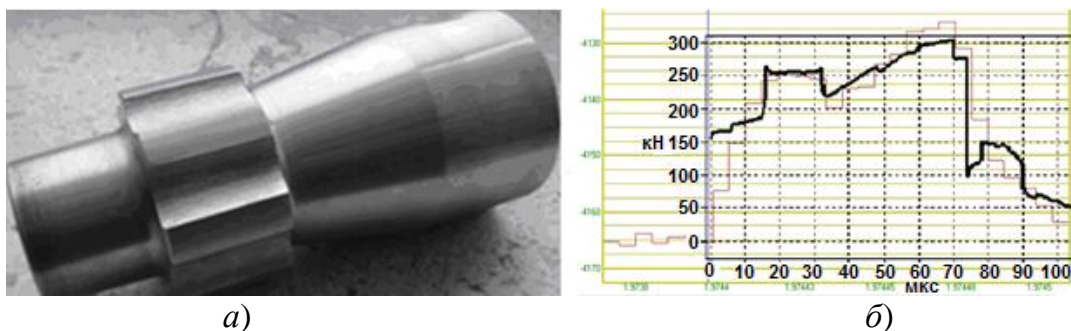
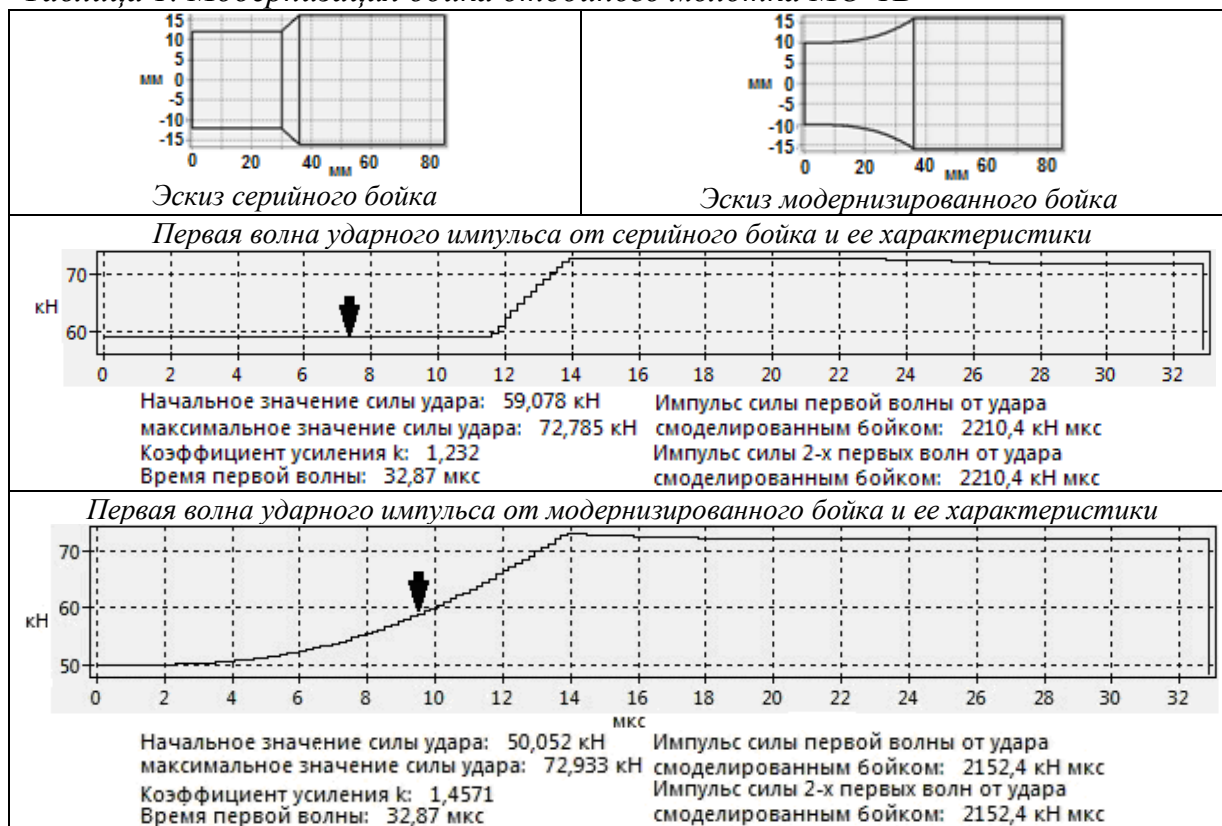


Рис. 10. а) боек сложной геометрической формы ПП 110 ЭН; б) сравнение теоретических и экспериментальных импульсов

Для демонстрации возможностей комплекса программ был произведен анализ геометрии бойков отбойных молотков МО-1Б и МО-6П, которые представляют собой тела вращения простой и сложной геометрических форм соответственно, что позволило выявить конструкционные недостатки ударников и предложить варианты их модернизации.

В отбойном молотке МО-1Б используется трехступенчатый цилиндрический ударник (табл. 1). Генерируемый в нем ударный импульс должен соответствовать свойствам разрушаемого объекта. Ранее многочисленными исследованиями неоднократно было доказано, что импульс, имеющий прямоугольную форму, является наименее эффективным.

Таблица 1. Модернизация бойка отбойного молотка МО-1Б

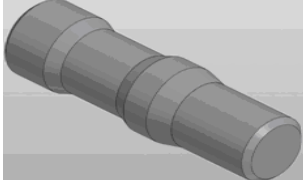
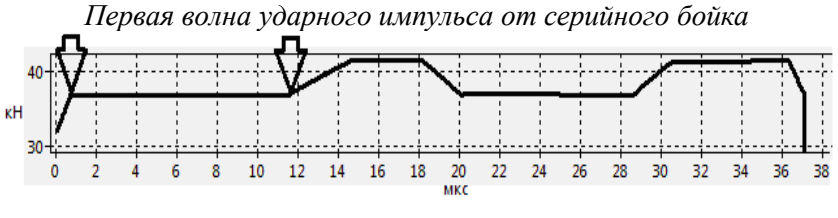
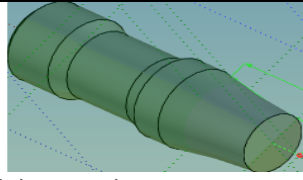
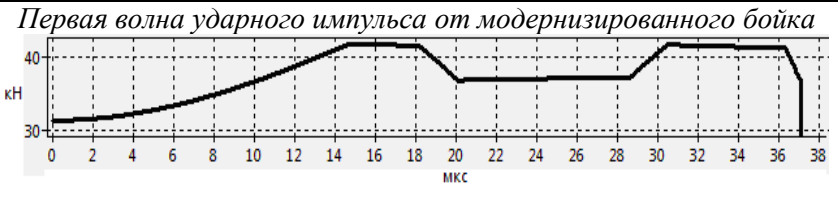


С этой точки зрения, имея данный программный комплекс, можно не только анализировать, но и достаточно быстро вносить изменения в геометрию ударяющего тела, при этом не влекущую за собой изменения в самой машине, получать ударные импульсы и сопоставлять их со свойствами объекта воздействия.

Модернизация ударника была произведена путем замены свободной цилиндрической ступени на криволинейную, заданную кубической параболой вида $f(x)=1,127 \cdot 10^{-3}x^3+10$ с областью определения $[0; 36]$. Данное изменение реализует импульс, амплитуда которого является нарастающей, это обеспечивает совпадение импульса со свойствами объекта воздействия, что минимизирует возврат энергии назад в машину. При этом увеличивается коэффициент геометрического усиления на 10%, что влечет повышение эффекта ударного воздействия.

Для ударника отбойного молотка МО-6П так же решалась аналогичная задача, так как от серийного бойка (табл. 2) импульс является прямоугольным. Замена передней части ударника на криволинейную, выполненную в виде тела вращения с образующей, заданной дугой окружности радиусом 182,5 мм, привела к изменению характера роста амплитуды ударного импульса, он стал плавно нарастающим, что соответствует росту сил сопротивления, возникающих в объекте воздействия при внедрении инструмента. Данная модернизация привела к увеличению эффективности работы отбойного молотка.

Таблица 2. Модернизация бойка отбойного молотка МО-6П

	<p>Первая волна ударного импульса от серийного бойка</p> 
<p>Характеристики импульса от серийного бойка</p> <p>Начальное значение силы удара: 31,586 кН Импульс силы первой волны от удара смоделированным бойком: 1428,2 кН мкс</p> <p>Максимальное значение силы удара: 41,597 кН Импульс силы 2-х волн от удара смоделированным бойком: 1446,7 кН мкс</p> <p>Коэффициент усиления k: 1,317</p> <p>Время первой волны: 37,12 мкс</p>	
	<p>Первая волна ударного импульса от модернизированного бойка</p> 
<p>Характеристики импульса от модернизированного бойка</p> <p>Начальное значение силы удара: 31,275 кН Импульс силы первой волны от удара смоделированным бойком: 1394,2 кН мкс</p> <p>Максимальное значение силы удара: 41,639 кН Импульс силы 2-х волн от удара смоделированным бойком: 1411,2 кН мкс</p> <p>Коэффициент усиления k: 1,331</p> <p>Время первой волны: 37,12 мкс</p>	

Четвертая глава посвящена решению задачи синтеза бойка для строжневой ударной системы по физико-механическим свойствам разрушаемого объекта. Ее решение состоит из трех этапов:

I этап: определение параметров первой волны оптимального ударного импульса по физико-механическим свойствам разрушаемого объекта.

II этап: определение геометрических параметров приведенной формы ударника, являющегося телом вращения переменного сечения, генерирующего оптимальный ударный импульс;

III этап: определение способа образования бойка, встраиваемого в корпус ударной машины, приведенная форма которого совпадает с формой синтезированного ударника.

Решение первых двух этапов автоматизировано и оформлено в виде программного модуля, написанного на языке программирования математического приложения MAPLE: *Синтез геометрических параметров ударных узлов машин в зависимости от физико-механических свойств разрушаемого объекта* (свидетельство ПЭВМ №2019619331), состоящего из двух *maple*-процедур, выполняемых последовательно друг за другом.

Работоспособность модуля проверена на примере синтеза ударника по оптимальному импульсу, который наилучшим образом соответствует такой горной породе, как гранит. По диаграмме «сила-внедрение» был синтезирован оптимальный ударный импульс (рис. 11,а), рост амплитуды в первой волне которого задается выражением:

$$F(t) = 128,9 - 2,8586t + 11,24t^2 - 14,95t^3 + 9,7746t^4 - 2,9562t^5 + 0,3741t^6. \quad (15)$$

По функции (15) был синтезирован ступенчатый боек (рис. 11,б,в), линия, задающая образующую этого ударника, была аппроксимирована кривой вида:

$$f(x) = 7 \cdot 10^{-6}x^4 - 1,2 \cdot 10^{-3}x^3 + 5,8 \cdot 10^{-2}x^2 - 0,96x + 16. \quad (16)$$

В итоге, получается простой боек, представляющий собой тело вращения с образующей, заданной функцией (16).

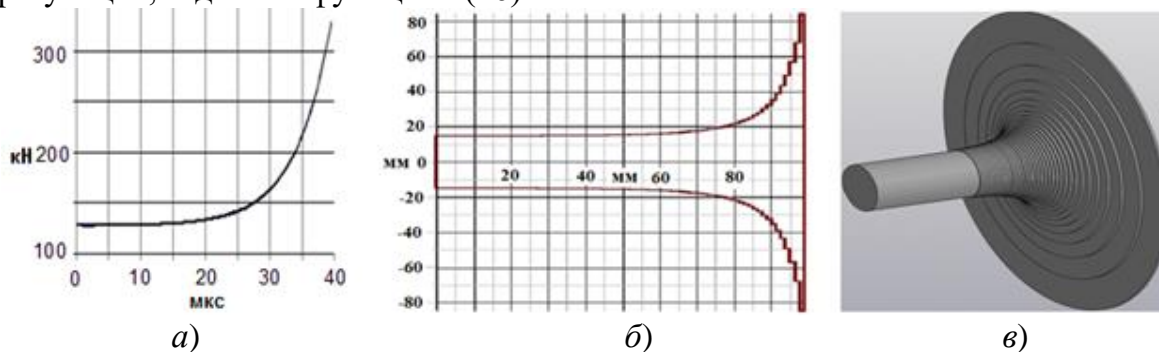


Рис. 11. а) график функции, задающей оптимальный ударный импульс; б) эскиз синтезированного ступенчатого бойка; в) 3D модель ступенчатого бойка

Но по результатам синтеза ударник получается криволинейной формы, у которого отсутствует ступень, обеспечивающая ему устойчивое положение в корпусе механизма. В связи с этим была поставлена и успешно решена задача о преобразовании этого ударника в пригодную для встраивания в корпус машины форму с сохранением ударного импульса, который он генерирует. Для этого к синтезированному криволинейному бойку добавляется цилиндроконическая оболочка (рис. 12), обеспечивающая ему продольную устойчивость в корпусе машины, а внутри ударника делается отверстие, причем объемы цилиндроконической оболочки и внутренней полости одинаково распределены по длине ударника. На основании этого условия получены функциональные закономерности, описывающие геометрию ударника (табл. 3).

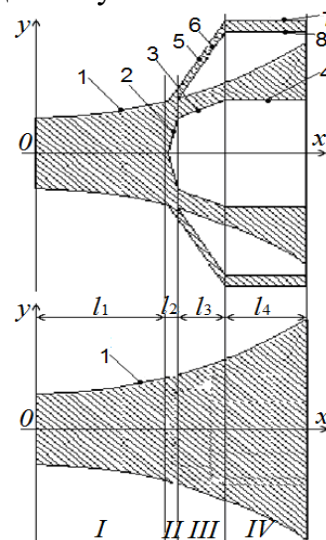


Рис. 12. Схематические изображения продольных разрезов встраиваемого бойка и ударника приведенной формы, (номера 1-8 указаны линии, задающие образующие боковых поверхностей)

Таблица 3. Геометрические параметры встраиваемого бойка

№ ступени	Длина	Равенство площадей поперечных сечений в координате x_i
I	l_1	$\pi f^2(x_i) = \pi f_1^2(x_i)$, где $x_i \in [0; l_1]$
II	l_2	$\pi f^2(x_i) = \pi(f_5^2(x_i) - f_2^2(x_i))$, где $x_i \in [l_1; l_2 + l_1]$
III	l_3	$\pi f^2(x_i) = \pi(f_5^2(x_i) - f_6^2(x_i) + f_1^2(x_i) - f_3^2(x_i))$, где $x_i \in [l_1 + l_2; l_1 + l_2 + l_3]$
V	l_4	$\pi f^2(x_i) = \pi(f_7^2(x_i) - f_8^2(x_i) + f_1^2(x_i) - f_4^2(x_i))$, где $x_i \in [l_1 + l_2 + l_3; l_1 + l_2 + l_3 + l_4]$

В итоге получается четырехступенчатый боек, для каждой ступени которого должно выполняться равенство площадей поперечных сечений для любой координаты по длине бойка.

Таким образом, по результатам теоретических и экспериментальных исследований разработаны математическая модель динамики ударных процессов в стержневой системе, численные методы и программный комплекс анализа и синтеза геометрических параметров элементов ударного узла машин, нашедшие применение как в учебном процессе, так и в условиях производства погружных пневмоударных машин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения диссертационного исследования были получены следующие результаты.

1. Разработана математическая модель стержневой ударной системы, основанная на представлении ударяющего тела любой сложности в виде ступенчатого цилиндрического тела вращения, позволяющая объективно анализировать динамические процессы в стержневых системах.
2. На математических принципах графодинамического описания продольного соударения стержней разработан численный метод анализа ударного импульса, генерируемого в стержневых системах любой геометрической формы, с высокой степенью точности.
3. Разработан алгоритм синтеза геометрии бойка, основанный на обратном порядке применения алгоритма анализа ударного импульса, позволяющий определять геометрические параметры ударного узла машины в зависимости от физико-механических свойств разрушаемого объекта.
4. Разработаны и протестированы программные средства, позволяющие анализировать и синтезировать наиболее рациональные технические решения конструкций элементов стержневых ударных систем геометрической формы любой сложности.
5. Обоснован способ конструктивного исполнения бойка, выполненного в виде тела вращения кривой линии вокруг геометрической оси, оснащенного цилиндрической оболочкой и внутренней полостью, с сохранением параметров генерируемого ударного импульса.
6. Результаты работы внедрены в учебный процесс Сибирского государственного индустриального университета и используются для модернизации конструкций погружных пневмоударных машин в Институте

горного дела Сибирского отделения Российской академии наук, что несомненно способствует развитию экономики страны.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

в изданиях, входящих в наукометрическую базу Scopus:

1. Zhukov I.A. Automated calculation and analysis of impacts generated in mining machine by anvil blocks of complex geometry / I.A. Zhukov, A.A. Repin, E.G. Timofeev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018, vol. 134, p. 012071. DOI: 10.1088/1755-1315/134/1/012071.
2. Тимофеев Е.Г. Автоматизированный метод проектирования бойков ударных машин по физико-механическим свойствам разрушаемых объектов / Е.Г. Тимофеев, А.В. Теплякова, И.А. Жуков, Н.С. Голиков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – №12-2. – С. 257-269. – DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_257.

в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК РФ:

3. Жуков И.А. Моделирование продольных колебаний сложных бойков ударных систем / И.А. Жуков, Е.Г. Тимофеев, В.В. Молчанов // Научное обозрение. – 2015. – №5. – С. 90-93.
4. Жуков И.А. Математическое и компьютерное моделирование ударных процессов в стержневой системе машин ударного действия / И.А. Жуков, Е.Г. Тимофеев // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 12 (часть 1) – С. 43-49. – DOI: 10.17513/snt.38409.
5. Тимофеев Е.Г. Комплекс программ для автоматизированного расчета геометрии ударных узлов машин / Е.Г. Тимофеев, И.А. Жуков, А.В. Теплякова // Программная инженерия. – 2021. – Т. 12, № 8. – С. 404-412. – DOI: 10.17875/prin.12.404-412.

в материалах конференций и сборниках трудов:

6. Тимофеев Е.Г. К разработке специализированного программного обеспечения для анализа сложных форм бойков ударных механизмов / Е.Г. Тимофеев, И.А. Жуков // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2014. – №2. – С. 7-10.
7. Жуков И.А. Инструментальные средства для автоматизации проектирования машин и механизмов ударного действия / И.А. Жуков, Е.Г. Тимофеев // Проблемы механики современных машин: Материалы VI Международной конференции. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2015. – Т. 3. – С. 161-167.
8. Жуков И.А. Математическое и компьютерное моделирование ударных процессов в стержневой системе сложной геометрической формы / И.А. Жуков, Е.Г. Тимофеев, В.В. Молчанов // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2015. – №3. – С. 7-11.
9. Тимофеев Е.Г. К разработке численного метода исследования ударных процессов в стержневой системе машин ударного действия / Е.Г. Тимофеев, И.А. Жуков // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 5-й Международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – №5. – С. 540-549. – DOI: 10.1872/MMF-2016-52.
10. Тимофеев Е.Г. Комплекс расчетных программ, моделирующих динамические процессы при нанесении удара по волноводу бойком переменного сечения / Е.Г. Тимофеев, И.А. Жуков // Проблемы фундаментальной и прикладной информатики в управлении, автоматизации и мехатронике: Сборник научных

трудов Международной научно-технической конференции (21-22 ноября 2017 года); Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск: Изд-во ЗАО «Университетская книга», 2017. – С. 130-136.

11. Тимофеев Е.Г. Применение информационных технологий в решении задачи рационализации ударных импульсов, генерируемых в машинах ударного действия / Е.Г. Тимофеев, И.А. Жуков // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника – 2018: Материалы Всероссийской научн.-техн. конф., Севастополь 29-31 мая 2018 г. – Севастополь: Изд-во СевГУ, 2018. – С. 161-165.
12. Тимофеев Е.Г. Алгоритм синтеза ударников переменного сечения по геометрии первой волны импульса ими генерируемого / Е.Г. Тимофеев, И.А. Жуков // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2018): труды XVIII Междунар. молодеж. конфер., 16-18 окт. 2018г. – М.: ИПУ РАН, 2018. – С. 215-218.
13. Тимофеев Е.Г. Определение рациональных геометрических параметров ударных узлов машин по физико-механическим свойствам разрушаемого объекта автоматизированными средствами проектирования / Е.Г. Тимофеев, И.А. Жуков // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2020. – №8. – С. 49-55.
14. Тимофеев Е.Г. К вопросу о программном обеспечении для анализа и синтеза геометрии бойков машин ударного действия / Е.Г. Тимофеев, А.С. Князев // VII Международная конференция Проблемы механики современных машин: сборник статей / отв. ред. Л.А. Бохоева. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2022. – С. 372-379.

свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

1. Свидетельство ПЭВМ №2015662766. Ударный импульс 2.0 / Тимофеев Е.Г., Жуков И.А. – №2015619792; поступление 13.10.2015; зарегистр. 01.12.2015.
2. Свидетельство ПЭВМ №2017613900 Удар многоступенчатым бойком / Тимофеев Е.Г., Жуков И.А. – №2016662568 поступление 22.11.2016; зарегистр. 03.05.2017.
3. Свидетельство ПЭВМ №2019619495. Удар бойком сложной геометрической формы / Тимофеев Е.Г., Жуков И.А. – №20196118226; поступление 05.07.2019; зарегистр. 18.07.2019.
4. Свидетельство ПЭВМ №2019619331. Синтез геометрических параметров ударных узлов машин в зависимости от физико-механических свойств разрушаемого объекта / Тимофеев Е.Г., Жуков И.А. – №2019618249; поступление 05.07.2019; зарегистр. 16.07.2019.