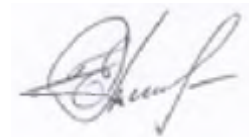


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»

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»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Жуков И.А.

Новокузнецк - 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ УДАРНЫХ СИСТЕМ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ.....	13
1.1 Удар, ударные системы и их принцип действия.....	13
1.2 История развития математических основ теории удара.....	14
1.3 Обоснование зависимости производительности ударных систем от формы бойка.....	17
1.4 Теоретические основы исследования продольных колебаний в соударяющихся телах.....	20
1.5 Постановка задач анализа и синтеза форм бойков. Обоснование актуальности задач.....	23
2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ УДАРНОГО ИМПУЛЬСА В СТЕРЖНЕ ПРИ УДАРЕ ПО НЕМУ БОЙКОМ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ.....	27
2.1 Математическая модель многоступенчатого бойка.....	27
2.2 Учет внутренних полостей. Приведенная форма бойка.....	31
2.3 Математическое описание процесса продольного соударения стержней сложной геометрической формы.....	34
2.3.1 Цилиндрический боек.....	34
2.3.2 Ступенчатый боек.....	40
2.4 Численный метод определения формы ударного импульса в зависимости от формы бойка.....	45
2.5 Численно-аналитический метод синтеза геометрии бойка в зависимости от формы первой волны ударного импульса.....	54
2.6 Сравнение моделей продольного удара.....	57
2.7 Сравнение авторского алгоритма численного метода расчета ударного импульса с аналогичными алгоритмами.....	62
2.8 Выводы по разделу.....	64

3. КОМПЛЕКС ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ, РАЗРАБОТАННЫХ ДЛЯ АНАЛИЗА ГЕОМЕТРИИ БОЙКОВ УДАРНЫХ СИСТЕМ.....	66
3.1 Комплекс программ для аналитического определения ударного импульса от ударников различной геометрической формы.....	66
3.1.1 Описания программного обеспечения выбранного для моделирования и анализа ударников.....	66
3.1.2 Реализация на практике алгоритмов численного моделирования бойков, выполненных в форме тела вращения плоской кривой вокруг геометрической оси ударника.....	70
3.1.3 Метод моделирования ударников «произвольной» формы и способ формирования приведенного бойка.....	75
3.1.4 Реализация на практике алгоритма численного метода расчета ударного импульса и его основных характеристик.....	77
3.2 Комплекс программ, предназначенных для анализа бойков сложной геометрической формы.....	79
3.2.1 Общий подход к созданию комплекса программ.....	79
3.2.2 Расчетная программа «Ударный импульс 2.0».....	80
3.2.3 Расчетная программа «Удар многоступенчатым бойком».....	82
3.2.4 Расчетная программа «Удар бойком сложной геометрической формы».....	83
3.3 Сравнительный анализ теоретических результатов расчета ударных импульсов, генерируемых бойками различных форм.....	84
3.3.1 Удар бойком, выполненным в виде тела вращения простой линии вокруг геометрической оси ударника.....	85
3.3.1.1 Цилиндрический боек постоянного сечения (классическая задача теории удара).....	85
3.3.1.2 Конический боек равнопеременного сечения.....	86
3.3.1.3 Полукаленоидальный боек переменного сечения.....	89
3.3.2 Удар бойком, выполненным в виде тела вращения составной линии вокруг геометрической оси ударника.....	92
3.3.2.1 Боек отбойного пневматического молотка.....	92

3.3.2.2 Модернизация бойка отбойного пневматического молотка.....	94
3.3.3 Удар бойком, выполненным в виде тела сложной геометрической формы.....	96
3.3.3.1 Сложный боек пневматического отбойного молотка.....	96
3.3.3.2 Ударник погружного пневмоударника ИГД СОРАН.....	99
3.4 Сравнение комплекса программ с известными аналогами.....	101
3.5 Выводы по разделу.....	103
4. СИНТЕЗ ГЕОМЕТРИИ БОЙКОВ ДЛЯ УДАРНЫХ УЗЛОВ МАШИН В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СВОЙСТВ РАЗРУШАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ.....	104
4.1 Постановка задачи синтеза и определение путей ее решения.....	104
4.2 Оптимальный ударный импульс и его характеристики.....	105
4.3 Определение функции, задающей рост амплитуды впервой волне оптимального ударного импульса по физико-механическим свойствам разрушаемого объекта.....	106
4.4 Решение задачи синтезирования геометрии по форме первой волны падающего ударного импульса.....	109
4.5 Описание программного обеспечения, выбранного для синтеза геометрии бойка.....	112
4.6 Описание расчетного модуля для синтеза геометрических параметров ударных узлов машин по физико-механическим свойствам разрушаемых объектов.....	115
4.7 Пример синтезирования бойка по физико-механическим свойствам породы гранит.....	116
4.8 Практическая реализация синтезируемых бойков, как части ударного узла машины.....	119
4.9 Выводы по разделу.....	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	124
Список литературы.....	126
Список опубликованных работ по теме диссертации.....	142
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	145

ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	153
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	162
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	166
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	185

ВВЕДЕНИЕ

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.

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 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) Построении 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 также удовлетворительная сходимость 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, позволяющей решать задачу моделирования динамических процессов; разработан численный метод расчета 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 цилиндрической 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 техника 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 18 научных работ, в том числе: 2 работы, входящие в наукометрическую базу Scopus, 3 работы, в изданиях рецензируемых ВАК РФ, получено 4 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 147 наименований, 5 приложений. Основной текст изложен на 144 страницах машинописного текста и поясняется 68 рисунками и 10 таблицами.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ УДАРНЫХ СИСТЕМ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

1.1 Удар, ударные системы и их принцип действия

Продольный удар положен в основу обработки и разрушения объектов с применением колоссальных нагрузок. Он получил широкое применение в машинах ударного действия [1-8], где для генерации и передачи энергии к разрушаемому объектам используются стержневые системы погружного (пневмоударники) [9-11] и непогружного (перфораторы, отбойные молотки, дробилки) [12-14] типов. Они имеют схожую конфигурацию и состоят из одинаковых элементов: бойка, волновода и инструмента (рис. 1.1.1).

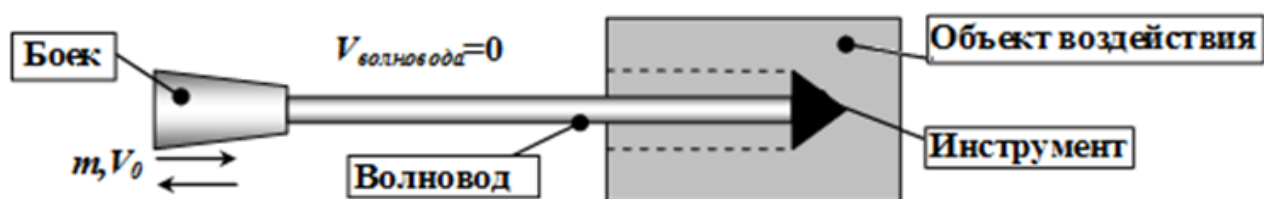


Рис. 1.1.1. Схема стержневой ударной системы

Принцип работы ударных систем заключается в следующем, разгон ударника обеспечивает гидравлический или пневматический привод, сообщаящий предупредную скорость бойку V_0 , которая вместе с его массой m определяет энергию удара T_0 :

$$T_0 = \frac{mV_0^2}{2}. \quad (1.1.1)$$

На границе контакта «ударник-волновод» формируются продольные волны смещений, которые посредством волнового импульса переносят энергию от ударника до разрушаемого объекта. При достижении импульсом инструмента, последний приобретает запас кинетической энергии, за счет которой происходит его внедрение в разрушаемый объект. Величина глубины проникновения инструмента h является характеристикой производительности ударной системы.

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

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

1.2 История развития математических основ теории удара

Математические основы теории удара были заложены в трудах И. Ньютона, Г. Герца, Б. де Сен-Венана, И.Е. Сирса. Математические модели Ньютона и Герца основываются на применении закона сохранения количества движения, модель Сен-Венана на одномерной волновой теории, а модель Сирса совмещает теории Герца и Сен-Венана [15].

Впервые задача продольного удара тел с пространственно распределенной массой была поставлена в работах Буссинеска, Навье, Сен-Венана. Ее решение основывалось на описании перемещения поперечных сечений соударяющихся тел дифференциальными уравнениями в частных производных, а решение, предложенное Сен-Венаном, легло в основу построения современных моделей продольного удара [16].

Большой вклад в исследование проблем продольного удара в стержневых системах технологического назначения был сделан в XX веке и был отражен в трудах: С.П. Тимошенко [17], Е.И. Николаи [18], Л. Бержерона [19], Н.М. Герсеванова [20], В.Л. Бидермана [21], Н.А. Кильчевского [22, 23], В. Гольдсмита [24], Г. Кольского [25], Е.В. Александрова [26], Ю.В. Беляева [27–29], Р. Саймона [30], Г. Фишера [31], Ю.В. Флавицкого [32], К.С. Хомякова [33], И. Хоукса [34], С.А. Зегжды [35], О.Д. Алимова [36–38], Л.Т. Дворникова [39–43], И.-И.Д. Шапошникова [44–48], В.Э. Еремьянца [49–53], В.К. Манжосова [54–58], Б.Н.

Стихановского [59–61], А.А. Мясникова [62, 63], О.Б. Малкова [64–66], Л.А. Саруева [67], А.П. Сластина [68], С.В. Доронина [69, 70], Л.С. Ушакова [71, 72] Д.А. Юнгмейстера [73,74], И.А. Жукова [75, 76] и других. Большой вклад в изучение продольного удара внесен и зарубежными исследователями [77–84], к моделированию ударных процессов в стержневых системах относятся работы: А. Benatar [85], А. Chakraborty [86], Náprstek, J. [87].

В настоящее время существует большое количество математических моделей, описывающих продольный удар. Их систематизации и описанию посвящены работы В.К. Манжосова и его учеников, перечислим их согласно [88]:

1. Модель удара абсолютно твердых тел.
2. Модель Герца.
3. Модель Релея.
4. Модель удара сосредоточенной массы по стержню без учета распределенных сил инерции стержня.
5. Модель удара сосредоточенной массы по стержню без учета распределенных сил инерции стержня, ориентированная на определение коэффициента динамичности.
6. Модель удара сосредоточенной массы по стержню, ориентированная на определение коэффициента динамичности с учетом приведенной масс стержня.
7. Модель удара, где взаимодействие описывается теоремой о кинетической энергии.
8. Модель удара, когда распределенные силы инерции стержневой системы заменены множеством сосредоточенных сил или стержневая система заменена множеством сосредоточенных масс (дискретная модель).
9. Волновая модель продольного удара по стержню (модель Сен-Венана).
10. Волновая модель удара по стержню, составленному из неоднородных элементов.
11. Волновая модель продольного удара стержня с переменным поперечным сечением о жесткую преграду.

Большую значимость имеет волновая модель Сен-Венана, на ее базе разработаны современные модели продольного удара, такие как:

1. Волновая модель удара в стержневой системе неоднородной структуры [89] – авторы С.В. Слепухин и В.К. Манжосов.
2. Модель удара неоднородных стержневых систем о жесткую преграду при неударяющих связях [90] – авторы А.А. Битюрин и В.К. Манжосов.
3. Модель соударения упругих стержней с закругленными торцами [91] – автор Д.З. Ямпольский.

Для моделирования продольного удара в стержневых системах, используются методы решения задач с применением известных волновых теорий, методы решений дифференциальных уравнений (аналитические и численные), методы математического моделирования, методы теории алгоритмов и решения задач программирования.

Однако, имеющиеся математические модели, описывающие продольный удар в стержневых системах технологического назначения не учитывают сложную геометрическую форму бойков, применяемых в современных машинах ударного действия. Они описывают удар, нанесенный телом, имеющим относительно простую геометрическую форму, в основном, это цилиндрические тела или тело вращения, с образующей заданной одной или несколькими простыми кривыми.

В 60-70-х годах XX века К.И. Иванов представляет первую модель, где учитывается геометрия бойка [92,93]. Она базируется на волновой теории Сен-Венана и позволяет определять ударные импульсы от ступенчатого ударника, состоящего из трех цилиндрических ступеней различного диаметра. Данная модель легла 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, аппроксимирующим криволинейное тело вращения

ударника [94], получивший свое дальнейшее развитие в данной диссертационной работе.

1.3 Обоснование зависимости производительности ударных систем от формы бойка

Продольный удар генерирует волновой импульс, переносящий энергию от механизма до разрушаемого объекта, характеристики этого импульса определяют степень эффективности применения механизма. Поэтому задачи, связанные с определением формы и длительности ударного импульса, являются актуальными. Они связаны с формированием и распространением ударных импульсов в стержневой системе, а также с проникновением энергии в среду в виде полезной работы. Решения этих задач определяют нагрузки, возникающие в системе при ее использовании, что позволяет определить ее прочность и оценить производительность.

Энергия, генерируемая в стержневой ударной системе, распределяется следующим образом: при разгоне боек получает определенный запас кинетической энергии T_0 , равной величине энергии ударного импульса W , которую он переносит по волноводу к разрушаемому объекту, в процессе удара она делится на три вида (рис. 1.2.1):

- 1) Энергия $W_{отр}$, отраженная от обрабатываемого объекта, движется посредством отраженного импульса к ударнику по волноводу.
- 2) Энергия T , передающаяся инструменту в виде кинетической энергии равная полезной работе.
- 3) Энергия $W_{расс}$, рассеивающаяся при ударе в материале разрушаемого объекта (например, расходуется на трещинообразование).

Отсюда получается выражения для определения коэффициента полезного действия механизма:

$$\eta = \frac{T}{W}. \quad (1.2.1)$$

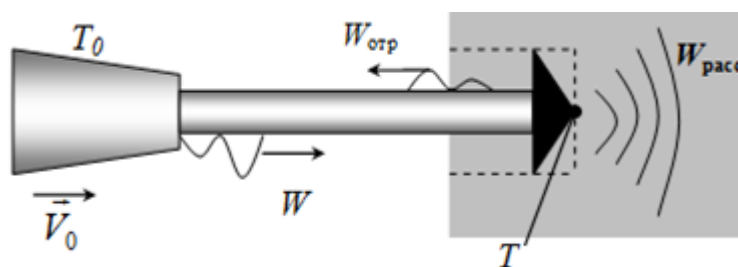


Рис. 1.2.1 Распределение энергии в стержневой ударной системе

Рассчитать величины энергий $W_{\text{расс}}$ и T не представляется возможным, поэтому эффективность удара оценивается по величинам энергий W и $W_{\text{отр}}$, по их значениям определяют коэффициент эффективности ударного процесса – коэффициент передачи энергии ξ [95-97]:

$$\xi = \frac{W - W_{\text{отр}}}{W}. \quad (1.2.2)$$

В 1962г. Е.В. Александровым было сделано открытие [98]: «При упругом ударе коэффициент передачи энергии зависит от соотношения масс соударяющихся тел до определенного критического значения этого соотношения, которое определяется *конфигурацией* соударяющихся тел.

При дальнейшем увеличении масс соударяющихся тел коэффициент передачи энергии определяется уже не соотношением действительных масс, а лишь указанным критическим значением этого соотношения.

При упругом ударе коэффициент восстановления определяется *формой* и *массой* соударяющихся тел, а также степенью рассеяния энергии в них».

Максимальные значения массы бойка и его скорости в момент удара заложены при проектировании механизма, это определяется нагрузками, возникающими при эксплуатации. Таким образом, предельный запас кинетической энергии T_0 является постоянным, а максимальная сила удара определяется геометрической формой бойка и одновременно является амплитудой падающего ударного импульса (рис. 1.2.2). Получается, что изменение формы ударника приводит к изменению характера роста амплитуды в первой волне ударного импульса и влияет на величину максимальной силы удара,

это позволяет увеличить значение КПЭ и, как следствие, расширить диапазон применения машины.

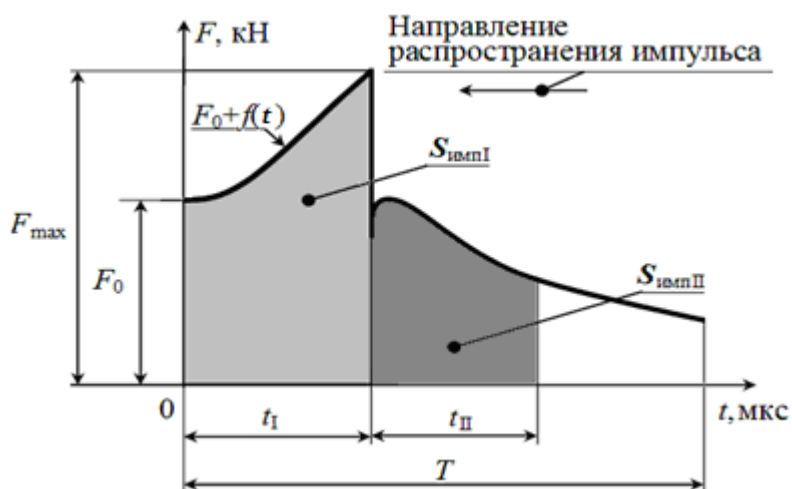


Рис. 1.2.2 Математическая модель ударного импульса (где: F_0 и F_{\max} – начальное и максимальное значения сил удара; $f(t)$ – функция, задающая рост амплитуды ударного импульса; t_I и t_{II} – длительности первой и второй волн импульса, T – общее расчетное время, $S_{\text{импI}}$ и $S_{\text{импII}}$ – площади под графиком, численно равные импульсам силы в первой и второй волнах)

Наряду с коэффициентом передачи энергии вводится понятие: *энергоемкости* (это отношение энергии, прошедшей в обрабатываемый объект к объему, разрушенной части объекта), как говорит в своей работе К.И. Иванов [92], эта характеристика описывает эффективность применения ударной системы. Она определяется амплитудой и длительностью падающего ударного импульса. Данные характеристики напрямую зависят от формы и материала ударника. Поэтому уместно говорить, что «в природе существует закон, согласно которому форма соударяющегося тела влияет на энергоемкость разрушаемой среды», которому К.И. Иванов дает название: *закон формы ударяющего тела*. Это еще раз подтверждает актуальность задачи анализа геометрии бойков.

1.4 Теоретические основы исследования продольных колебаний в соударяющихся телах

Произвольная геометрическая форма ударника говорит о том, что рассматриваемая стержневая система имеет переменное сечение, а сам боек является телом вращения коаксиальной формы, иногда это тело вращения с асимметричными элементами (рис. 1.3.1).



Рис. 1.3.1. Внешний вид ударников переменного сечения

Поэтому для оценки возможности эксплуатации бойков такого вида необходимо знать теоретические основы формирования ударных импульсов в стержнях переменного сечения. Динамическая часть решения данной задачи базируется на теории Сен-Венана [99–101], которая дает теоретическое описание прохождения продольной волны по стержню через границу, где происходит резкое изменение его поперечного сечения со следующими допущениями:

1. При прохождении волн плоскости, перпендикулярные геометрической оси стержня, не деформируются, то есть остаются плоскими.
2. Деформации, возникающие в материале стержня, считаются упругими и подчиняются закону Гука.
3. Ударный контакт тел происходит одновременно по всей плоскости соприкосновения.

Рассмотрим походжение волны сквозь границу такого изменения площади поперечного сечения цилиндрического стержня, то есть из области с площадью сечения S_1 в область с площадью сечения S_2 (рис. 1.3.2).

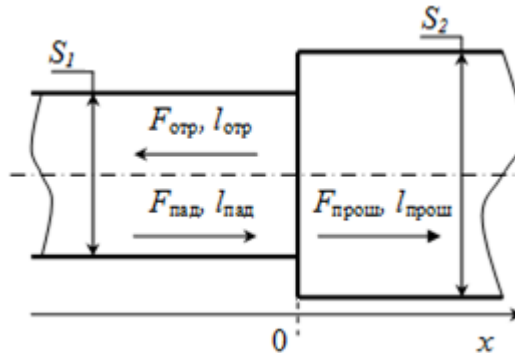


Рис. 1.3.2. Схема прохождения силового импульса сквозь границу изменения площади поперечного сечения цилиндрического стержня

Расположим ось координат Ox так, что граница изменения площади поперечного сечения имела координату $x=0$. При прохождении волны часть энергии пройдет в область S_2 , а часть отразится обратно в область S_1 . Введем обозначения сил ($F_{пад}$, $F_{прош}$ и $F_{отр}$) и смещений ($l_{пад}$, $l_{прош}$ и $l_{отр}$) в падающей, прошедшей и отраженной волнах соответственно:

$$\begin{aligned}
 &1) F_{пад}(t-x\sqrt{\frac{\rho}{E}}) \text{ и } l_{пад}(t-x\sqrt{\frac{\rho}{E}}); \\
 &2) F_{прош}(t-x\sqrt{\frac{\rho}{E}}) \text{ и } l_{прош}(t-x\sqrt{\frac{\rho}{E}}); \\
 &3) F_{отр}(t+x\sqrt{\frac{\rho}{E}}) \text{ и } l_{отр}(t+x\sqrt{\frac{\rho}{E}});
 \end{aligned} \tag{1.3.1}$$

где: t – время; ρ и E – плотность и модуль упругости материала; x – координата текущего положения продольной волны.

Силы и смещения связаны друг с другом законом Гука и с учетом (1.3.1):

$$\begin{aligned}
 F_{пад}(t-x\sqrt{\frac{\rho}{E}}) &= -ES_1 \frac{\partial l_{пад}(t-x\sqrt{\frac{\rho}{E}})}{\partial x}; \\
 F_{прош}(t-x\sqrt{\frac{\rho}{E}}) &= -ES_2 \frac{\partial l_{прош}(t-x\sqrt{\frac{\rho}{E}})}{\partial x};
 \end{aligned} \tag{1.3.2}$$

$$F_{omp}(t-x\sqrt{\frac{\rho}{E}}) = -ES_1 \frac{\partial l_{omp}(t+x\sqrt{\frac{\rho}{E}})}{\partial x}.$$

Произведя замену вида: $k = t \pm x\sqrt{\frac{\rho}{E}}$, можно определить величины сил $F_{прош}$ и $F_{отр}$ по известной функции силы $F_{над}(k)$. Выпишем уравнения непрерывности смещений и сил в сечении с координатой $x=0$:

$$l_{над} + l_{отр} = l_{прош}; \quad (1.3.3)$$

$$F_{над} + F_{отр} = F_{прош}. \quad (1.3.4)$$

Вычислим частные производные:

$$\frac{\partial k}{\partial t} = 1 \text{ и } \frac{\partial k}{\partial x} = \pm \sqrt{\frac{\rho}{E}}. \quad (1.3.5)$$

Произведя замену: $l(t \pm x\sqrt{\frac{\rho}{E}}) = l(k)$ вычислим производные с учетом (1.3.5):

$$\frac{\partial l}{\partial x} = \frac{dl}{dk} \frac{\partial k}{\partial x} = \pm l' \sqrt{\frac{\rho}{E}} \text{ и } \frac{\partial l}{\partial t} = \frac{dl}{dz} \frac{\partial k}{\partial t} = l'. \quad (1.3.6)$$

Подставив (1.3.2) и (1.3.6) в (1.3.4) получаем:

$$S_1 l'_{над} - S_1 l'_{отр} = S_2 l'_{прош}. \quad (1.3.7)$$

Продифференцировав (1.3.3) получим:

$$l'_{над} + l'_{отр} = l'_{прош}. \quad (1.3.8)$$

Решив (1.3.7) и (1.3.8) как систему, найдем величины $l'_{прош}$ и $l'_{отр}$:

$$l'_{прош} = \frac{2S_1}{S_1 + S_2} l'_{над} \text{ и } l'_{отр} = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} l'_{над}. \quad (1.3.9)$$

Выпишем величины сил в падающей, прошедшей и отраженной волнах с учетом (1.3.2), (1.3.6) и (1.3.9):

$$\begin{aligned} F_{над} &= -ES_1 \frac{\partial l_{над}}{\partial x} = -ES_1 \frac{\partial l_{над}}{\partial t} \frac{dt}{dx} = -ES_1 \sqrt{\frac{\rho}{E}} \frac{\partial l_{над}}{\partial t}; \\ F_{прош} &= -ES_2 \frac{\partial l_{прош}}{\partial x} = -ES_2 \frac{\partial l_{прош}}{\partial t} \frac{dt}{dx} = -ES_2 \sqrt{\frac{\rho}{E}} \frac{\partial l_{над}}{\partial t} \frac{2S_1}{S_1 + S_2}; \\ F_{отр} &= -ES_1 \frac{\partial l_{отр}}{\partial x} = -ES_1 \frac{\partial l_{отр}}{\partial t} \frac{dt}{dx} = -ES_1 \sqrt{\frac{\rho}{E}} \frac{\partial l_{отр}}{\partial t} \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2}. \end{aligned} \quad (1.3.10)$$

Отсюда получаем выражения для вычисления сил в прошедшей и отраженной волнах, по известному значению силы в падающей волне:

$$F_{\text{прош}} = F_1 \frac{2S_2}{S_1 + S_2} \text{ и } F_{\text{отр}} = F_1 \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2}. \quad (1.3.11)$$

Ведем обозначения r и p – коэффициенты отражения и прохождения соответственно:

$$r = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} \text{ и } p = \frac{2S_1}{S_1 + S_2}. \quad (1.3.12)$$

Таким образом, используя выражения (1.3.11), можно выполнять расчеты усилий в динамических системах при нанесении продольного удара в контактирующих стержнях с сечениями, выполненными в виде плоскостей, аналитическим методом. Этот метод получил название: *графодинамический метод*, он широко применяется на практике для решения различных задач, связанных с динамикой продольного удара [88-91,102,103].

1.5 Постановка задач анализа и синтеза форм бойков. Обоснование актуальности задач

Проектирование бойка для ударного узла машины - это достаточно сложная инженерная задача. Для этого необходимо учесть особенности всей машины, которая будет сообщать ударнику возвратно поступательное движение. Чтобы бойки были частью ударных узлов, их снабжают различными канавками, выступами, фасками, добавляют дополнительные ступени для устойчивости и т.д. и т.п. При этом может быть нарушена симметрия бойка как на отдельных участках, так по всей его длине (но, как правило, нарушения симметрии стараются не допускать, или делают его незначительным) (рис. 1.4.1).

Встраивание ударника в корпус уже имеющейся машины – это достаточно трудоемкая и ювелирная работа, в ходе которой инженер сталкивается с проблемой сохранности параметров ударного импульса при ограниченных размерах бойка. Получается, что на каждом этапе внесения конструкционных

изменений необходимо проверять сохранность основных параметров ударного импульса (амплитуды, длительности и характера роста амплитуды в первой волне). Сохранить длительность просто, для этого нужно оставлять неизменной длину ударника. Но максимальное значение силы и характер изменения амплитуды импульса необходимо проверять при каждой манипуляции с геометрией бойка. Проведение эксперимента – это самый надежный способ анализа, но одновременно и самый затратный (как по времени, так и по финансовой составляющей). Поэтому наличие достаточно точного и оперативного способа аналитического определения ударного импульса от бойков различной геометрической формы является актуальным.

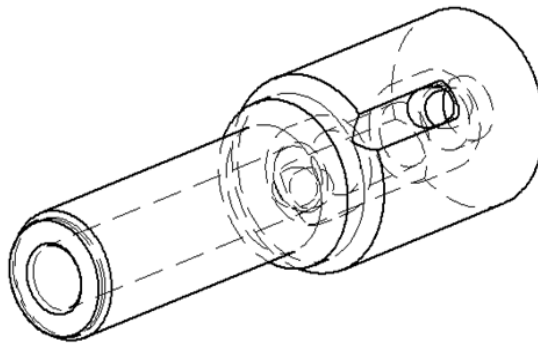


Рис. 1.4.1. Структурная схема бойка сложной геометрической формы

Вышесказанное определяет цель первой части данного диссертационного исследования: *создание точного, быстрого и относительно дешевого метода аналитического расчета ударного импульса от ударников любой геометрической формы*. Точность достигается путем проведения расчетов с использованием ЭВМ, для этого создаются специальные алгоритмы, которые описываются на различных языках программирования, и после компиляции превращаются в расчетные программы. Дешевизна определяется независимостью расчетных программ от коммерческих программных приложений, использование которых влечет существенные финансовые затраты необходимые для содержания и поддержки их работоспособности. Относительно недорогими являются программы, написанные на алгоритмических языках программирования (таких как Pascal, C++, Python и

др.), они оперируют алгоритмами, математика которых базируется на численных методах, то есть на перерасчете числовых массивов по определенным правилам. Кроме этого, итоговые программные продукты являются кроссплатформенными, что позволяет работать с расчетной программой в любой операционной системе (Microsoft Windows (Win 32, Win64), MacOS, ALT LINUX и др.).

Поставленная цель предполагает решение следующих подзадач:

- 1) Разработать методы формирования численных моделей ударных узлов машин с бойками любой геометрической формы.
- 2) Разработать метод расчета ударного импульса, математика которого является численной и поддается описанию на любом алгоритмическом языке программирования.
- 3) Автоматизировать расчет путем составления программы, предназначенной для оперативного анализа геометрии ударных узлов машин с бойками формы.
- 4) Расчетная программа (или комплекс программ) должна быть «независимой» от дополнительного программного обеспечения и быть кроссплатформенной.

Объекты воздействия состоят из различных материалов, которые имеют свои индивидуальные физико-механические свойства, описываемые диаграммой «сила-внедрение» [104]. Данная диаграмма позволяет синтезировать ударный импульс, оптимальный для разрушения конкретного материала (гранита, базальта и т.д.). Эта задача имеет аналитическое решение. Оно полностью автоматизировано и реализовано в виде *maple*-процедуры: *Синтез ударного импульса по зависимости «сила-внедрение» для разрушения горной породы ударом*, написанной на алгоритмическом языке программирования математической среды MAPLE-14 [105].

Данное решение ставит вопрос: «Какой формы ударник способен сгенерировать синтезированный импульс?». При наличии большой базы бойков с определенными импульсами необходимый ударник можно просто подобрать, но это не всегда является возможным. Поэтому наличие аналитического метода определения геометрической формы ударника по имеющемуся импульсу является актуальным. Попытка создания такого метода была предпринята ранее [75].

Математической базой расчета стал графоаналитический метод, используемый в обратном порядке. На его базе была составлена система уравнений, которая решалась в математическом редакторе MAPLE. Данный подход оказался неудачным, он позволил синтезировать ступенчатый ударник всего из десяти цилиндрических ступеней, что не позволяет даже оценить геометрическую форму ударника. Преимуществом этого решения явилось то, что оно доказало возможность обратного применения графоаналитического метода.

Во второй части диссертационного исследования была поставлена задача: *доработки имеющегося аналитического метода синтеза бойков так, чтобы он позволял формировать ступенчатые ударники, состоящие, как минимум, из восьмидесяти цилиндрических ступеней.* Что даст возможность достаточно точно определить кривую, задающую образующую боковой поверхности бойка. Поставленная цель обусловила наличие следующих подзадач:

- 1) Проанализировать имеющийся подход синтеза ударников по первой геометрии первой волны ударного импульса с целью выявления закономерностей формирования синтезируемого ударника.
- 2) Разработать новый подход синтеза ударников, опирающийся на обратном применении графоаналитического метода.
- 3) Разработать численный или численно-аналитический метод синтеза ударников переменного сечения.
- 4) Автоматизировать разработанный метод путем написания расчетной программы, процедуры или программного модуля в любой среде программирования без наложения каких-либо условий.
- 5) Написать программу (процедуру или программный модуль), позволяющую автоматизировать синтез бойков для ударных узлов машин по физико-механическим свойствам разрушаемых объектов, в любой среде программирования без наложения на нее каких-либо условий.

2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ УДАРНОГО ИМПУЛЬСА В СТЕРЖНЕ ПРИ УДАРЕ ПО НЕМУ БОЙКОМ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

2.1 Математическая модель многоступенчатого бойка

Бойки непогружных ударных систем представляют собой сплошные тела вращения плоской кривой вокруг геометрической оси [106-110]. Их моделируют в прямоугольной системе координат, где ось абсцисс совпадает с геометрической осью ударника (чаще всего являющейся его осью симметрии). Образующая задается в виде кривой, составленной из набора простых линий (k штук), заданных функциями одной переменной:

$$y = \begin{cases} f_1(x) + \frac{d_1}{2}, 0 \leq x < L_1; \\ f_2(x) + f_1(L_1), L_1 \leq x < L_1 + L_2; \\ \dots \\ f_k(x) + f_{k-1}\left(\sum_{z=1}^{k-1} L_z\right), \sum_{z=1}^{k-1} L_z \leq x \leq \sum_{z=1}^k L_z. \end{cases}, \quad (2.1.1)$$

где d_1 – диаметр ударного торца, L_1, L_2, \dots, L_k – длины областей определения соответствующих функций (или длины ступеней ударника), z – индекс суммирования (или порядковый номер простой линии в образующей бойка) (рис. 2.1.1–а).

В зависимости от количества простых кривых в линии, образующей ударника, бойки имеют названия: *одноступенчатый* – образующая составлена из одной простой кривой, *двухступенчатый* – образующая составлена из двух простых кривых и *многоступенчатый* – образующая составлена из трех и более простых кривых. Все ударники, поддающиеся данному методу моделирования, получили условное название: *простые бойки*.

Аналитический расчет ударного импульса графоаналитическим методом производится для ступенчатого бойка, составленного из цилиндрических

ступеней одинаковой длины l_1 и различного (или одинакового, в зависимости от формы ударника) диаметра (рис. 2.1.1–б).

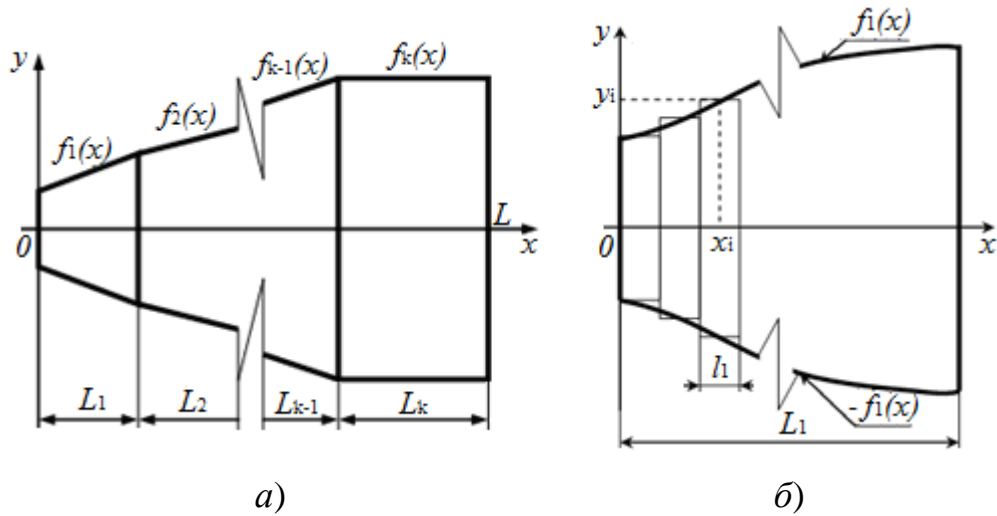


Рис. 2.1.1 а) Модель простого боя; б) представление смоделированного боя в виде ступенчатого цилиндрического тела

При решении задачи по определению ударного импульса аналитическим методом с использованием ЭВМ (в любом математическом редакторе) формирование ступенчатого (или расчетного) ударника производилось из равенства объемов (или масс) реального и расчетного ударников. Математическая модель этого подхода была предложена Л.Т. Дворниковым и И.А. Жуковым и имеет следующий вид:

$$\frac{m}{\rho} = \sum_{i=1}^N \pi \int_{(i-1)l_1}^{il_1} y^2(x) dx, \quad (2.1.2)$$

где m – масса ударника; ρ – плотность материала ударника; $y(x)$ – функция образующей, полученная согласно (2.1.1); i – номер текущей цилиндрической ступени; N – число цилиндрических ступеней (определяется произвольно, как правило, его величина равна 80); l_1 – длина одной цилиндрической ступени, вычисленная согласно:

$$l_1 = \frac{\sum_{z=1}^k L_z}{N}, \quad (2.1.3)$$

где L_z – длина соответствующей ступени многоступенчатого ударника. Такой подход к формированию ступенчатого ударника является самым оптимальным, так как не имеет ни массовой, ни объемной погрешности. Но для численного моделирования он не подходит, так как модель, описанная выражением (2.1.2), содержит интеграл, а образующую ударника можно задать любой функцией, содержащей различные по виду выражения (например, степенные, тригонометрические, логарифмические и т.д.). Математический аппарат алгоритмических языков программирования не поддерживает расчет первообразной функции напрямую. Эта особенность привела к необходимости разработки метода составления ступенчатого (расчетного) ударника по значениям функции (2.1.1), задающей образующую ударника:

$$d_i = 2f_k\left(x_i = \frac{2i-1}{2}l_1\right), \quad (2.1.4)$$

где x_i – координата середины текущей цилиндрической ступени (рис. 2.1.1-б).

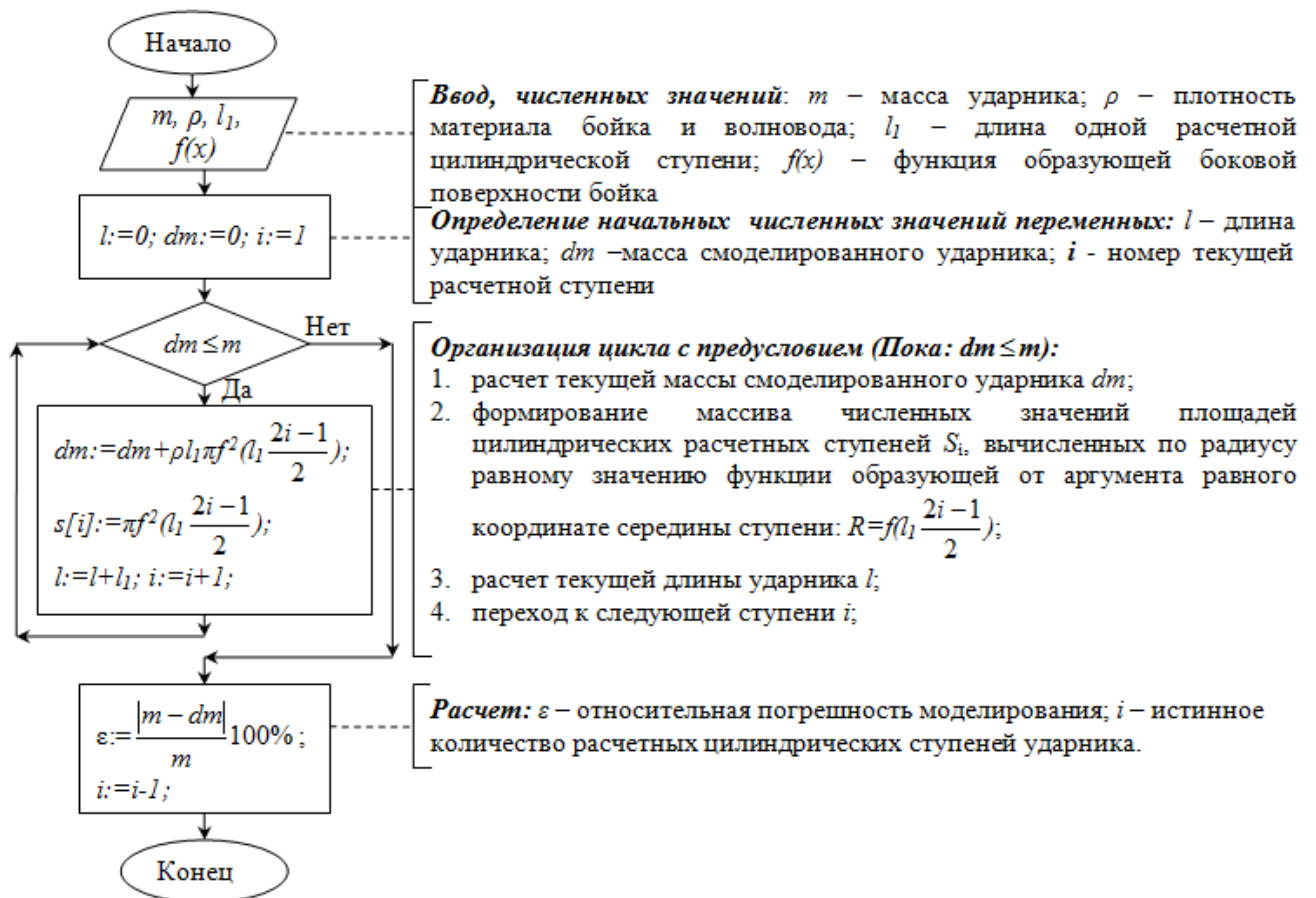


Рис. 2.1.2 Блок-схема алгоритма численного моделирования одноступенчатого бойка

Математическую модель такого формирования расчетного ударника можно представить выражением:

$$\sum_{i=1}^n \rho l_i \pi \frac{d_i^2}{4} = m \pm m \frac{\varepsilon}{100\%}, \quad (2.1.5)$$

где ρ – плотность материала и волновода, i – номер текущей расчетной цилиндрической ступени, ε – относительная погрешность ($\approx 4-5\%$). Следует отметить, что при проведении расчетов с использованием данной модели удавалось достигнуть погрешности менее 1%. На практике эта модель реализуется циклической структурой с предусловием и ветвлением (рис. 2.1.2 – для ударника с образующей заданной одной простой кривой; рис. 2.1.3 – для ударника с образующей заданной k простыми кривыми).



Рис. 2.1.3 Блок-схема алгоритма численного моделирования многоступенчатого бойка

Итогом моделирования, в обоих случаях, массив S_i , содержащий значения площадей цилиндрических ступеней, составляющих расчетный боек. Данный массив вместе со значением площади поперечного сечения волновода S_0 , является численной моделью ударного узла машины, имеющей простой боек.

2.2 Учет внутренних полостей. Приведенная форма бойка

Рассмотренные в п. 2.1 методы моделирования ударников применяются для моделирования сплошных бойков, не содержащих внутренних полостей и не имеющих сложных поверхностных элементов, таких как вырезы, пазы, канавки, галтели и т.д. и т.п., любое сечение, выполненное секущей плоскостью перпендикулярной оси симметрии ударника, является сплошным кругом. В машинах погружного действия (пневмоударниках) [9-11] бойки представляют собой сложные тела, которые не всегда обладают осевой симметрией. Эти ударники, как правило, изготавливаются из простых тел вращения и называются *сложными*. В итоге получается объект, имеющий своеобразную боковую поверхность (рис. 2.2.1-а), которая не моделируется согласно (2.1.1). Для ударников погружных ударных систем, обязательно наличие сквозного продольного отверстия (рис. 2.2.1-б) [111,112]. В дальнейшем для описания ударников этого вида используется условное название «*бойки сложной геометрической формы*» или «*сложные бойки*».

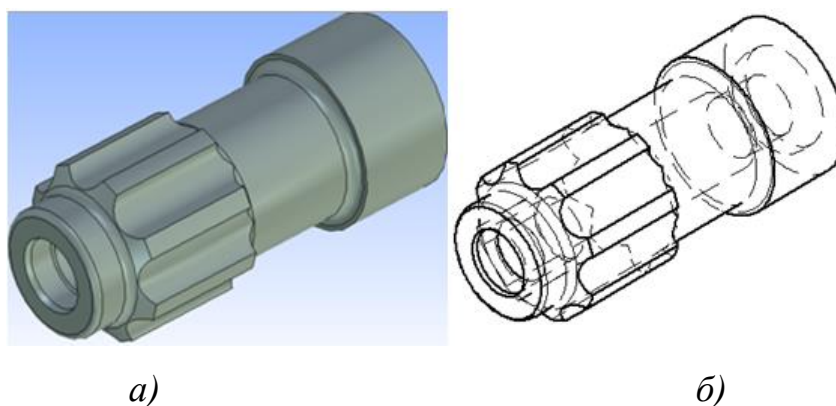


Рис. 2.2.1 а) -3D модель сложного бойка; б) структурная 3D модель сложного бойка

Аналитический расчет ударных импульсов от ударников этого вида с использованием графоаналитического метода предполагает представление бойка в ступенчатом (расчетом) виде. Это предполагает формирование цельного тела, состоящего из цилиндров одинаковой длины, не имеющее внутренних полостей. Форма ударника, которым заменяется сложный боек, получила название: *приведенная форма сложного бойка*.

Такое преобразование ударника на практике производится по следующему алгоритму:

1) Создание трехмерной модели бойка с использованием современных технологий 3D моделирования для этого подойдет любая САД система 3D моделирования, например, «Т-Flex», «КомпАс» и др. (рис. 2.2.1-а). По выполненной 3D модели строится структурная модель, необходимая для проведения анализа геометрии бойка с учетом его внутренних особенностей (рис. 2.2.1-б). Результат анализа определяет сложность геометрической формы ударника, что определит количество цилиндрических ступеней в приведенной форме бойка.

2) Рассечение 3D модели большим количеством секущих плоскостей, параллельных друг другу и перпендикулярных геометрической оси бойка, которое на практике определяется длиной ударника L и расстоянием между соседними секущими плоскостями l_1 :

$$N = \frac{L}{l_1} \quad (2.2.1)$$

Величина l_1 , как правило, варьируется в пределах от 0,5 до 2 мм и выбирается произвольно, в зависимости от сложности боковой поверхности и геометрических размеров внутренних полостей. Затем определяются величины площадей сечений S_i , которые образовались при рассекании ударника (это легко сделать, используя встроенную функцию расчета площадей сечений, имеющуюся в каждом 3D редакторе). В компьютерной системе 3-D моделирования Т-Flex данный процесс легко автоматизируется при помощи функции «анимация».

3) Замена каждого сечения кругом, равным по площади соответствующему сечению (рис. 2.2.2). При этом все имеющиеся внутренние полости и внешние элементы «исчезают».

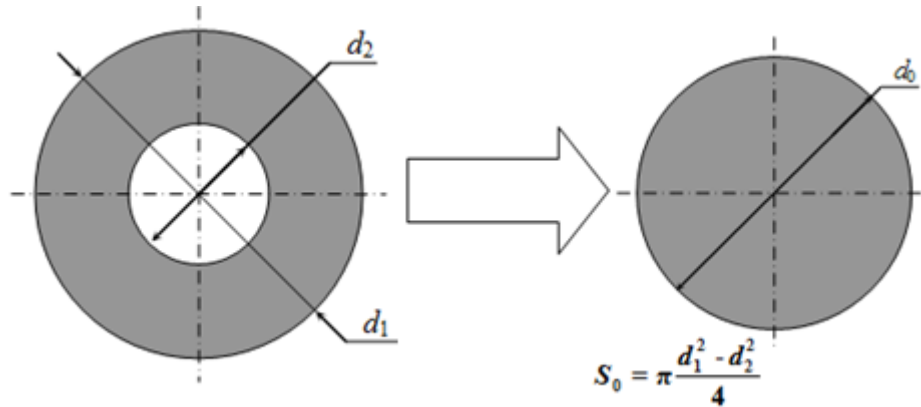


Рис. 2.2.2 Замена реального сечения ударника кругом равной площади

Расчет диаметра круга d_0 происходит по его площади S_0 согласно:

$$S_0 = S_1 - \sum_{i=2}^n S_i$$

$$d_0 = \sqrt{\frac{4S_0}{\pi}}, \quad (2.2.2)$$

где S_1 – площадь сечения, полученного при рассечении сложного бойка (с учетом площадей всех выемок, пазов и т.д., попавших в данную секущую плоскость);

$\sum_{i=2}^n S_i$ – суммарное значение площадей всех выемок, вырезов, пазов и т.д.,

попавших в данную секущую плоскость (всего $n-1$ штук).

4) Формирование приведенной формы ударника производится путем составления его из ступеней, представляющих собой цилиндры одинаковой длины l_1 . Оси всех цилиндров лежат на одной прямой, а сами цилиндры расположены вплотную друг к другу (рис. 2.2.3).

Процесс расчета численных значений площадей сечений, необходимых для построения приведенной формы сложного бойка, был автоматизирован в CAD системе 3D моделирования T-Flex [113]. В итоге получается одномерный массив численных значений S_i , записанный в текстовый файл (*.txt), который хранит численную модель приведенной формы бойка. Вместе со значением площади

поперечного сечения волновода S_0 , является численной моделью ударного узла машины, имеющей сложный боек.

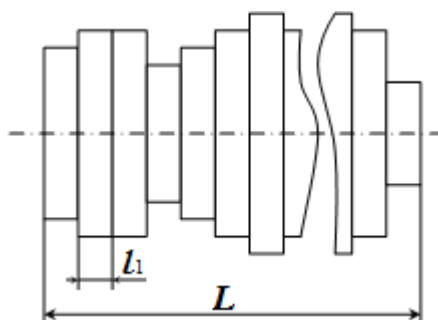


Рис. 2.2.3 Внешний вид приведенной формы ударника, составленной из цилиндрических ступеней равной длины l_1

2.3 Математическое описание процесса продольного соударения стержней сложной геометрической формы

Решение задачи по определению ударного импульса, сгенерированного при соударении стержней переменного сечения, является базовым при проектировании любого ударного механизма. Решение таких задач базируется на теории Сен-Венана, рассматривающей решение задачи о соударении двух стержней постоянного сечения. Общим в них является наличие двух тел: первое – стержень конечной длины постоянного или переменного сечения – это *ударник* (или *бойк*), второе – полубесконечный стержень постоянного сечения – это *волновод*. Полубесконечность волновода имеет немаловажное значение, оно накладывает условие на решение задачи: импульс, сгенерированный при ударе «уходит» по волноводу и назад не возвращается.

2.3.1 Цилиндрический боек

Данная задача относится ко времени зарождения основ теории удара, ее основоположником является Сен-Венан, он сформулировал и рассмотрел решение задачи продольного удара бруса с телом цилиндрической формы, которые имеют постоянное сечение. В дальнейшем, интерес представила несколько измененная

задача, где удар наносится цилиндром постоянного сечения конечной длины по полубесконечному волноводу постоянного сечения. При этом диаметры волновода и бойка могут быть различными (рис. 2.3.1.1), но материал этих тел в рамках рассматриваемой задачи одинаков.

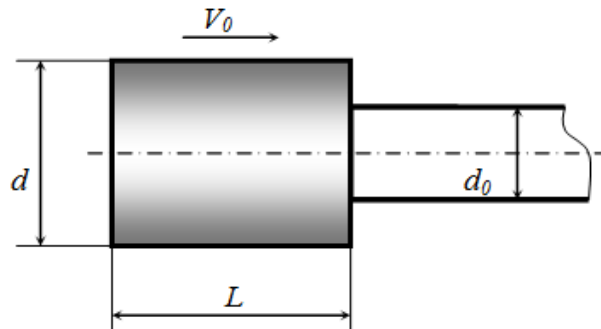


Рис. 2.3.1.1 Схема удара цилиндрическим бойком конечной длины по полубесконечному волноводу

Для решения этой задачи назовем известные величины, характеризующие эту ударную систему, и определим начальные условия.

Величины, характеризующие ударную систему: *геометрические параметры* (d – диаметр ударника, L – длина ударника, d_0 – диаметр волновода), *механические параметры* (ρ – плотность материала бойка и волновода, E – модуль упругости материала бойка и волновода, V_0 – предударная скорость бойка).

Начальные условия: перед ударом боек движется со скоростью V_0 в направлении неподвижного волновода. Ударный контакт производится по всей площади соприкосновения бойка и волновода. Проведем решение этой задачи, согласно алгоритму, рассмотренному ранее (раздел 1, п. 1.3).

- 1) Представление ударника в виде цилиндрических ступеней в рассматриваемой задаче не имеет смысла, т.к. сам ударник – это одна цилиндрическая ступень диаметром d и длиной L .
- 2) Определение коэффициентов отражения r и прохождения p волны, сгенерированной при ударе, на границе контакта бойка и волновода:

$$r = \frac{S - S_0}{S + S_0}; \quad (2.3.1.1)$$

$$p = \frac{2S_0}{S + S_0}, \quad (2.3.1.2)$$

где S_0 и S – площади поперечного сечения волновода и ударника соответственно.

3) Определение временного интервала, за который произведем вычисление силового импульса, сгенерированного при ударе, для этого вычислим время первой волны ударного импульса:

$$T_1 = 2L\sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (2.3.1.3)$$

Как было сказано ранее, этот интервал выбирается произвольно и задается в виде целого четного числа временных интервалов равных времени прохождения волной смещений длины одной расчетной цилиндрической ступени ударника. В данном случае ступень одна и время прохождения ее волной равно $T_1/2$. Пусть это число равно шести. То есть рассмотрим выход трех волн ударного импульса. Общий промежуток времени при этом будет равен:

$$t = 6L\sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (2.3.1.4)$$

4) Расчет сил, прошедших в волновод за произвольно определенный промежуток времени (2.3.1.4). Для этого производится расчет сил, характеризующих волны смещений, сформированных при ударе и распространяющиеся от границы соударения в разные стороны:

$$F_1 = \frac{V_0\sqrt{E\rho}}{2}S \text{ и } F_2 = -\frac{V_0\sqrt{E\rho}}{2}S, \quad (2.3.1.5)$$

Здесь F_1 – сила, характеризующая волну смещений, движущуюся в сторону границы соударения, а F_2 – от нее. Минус задает направление силы по отношению к направлению предупредной скорости. При решении будем пользоваться модулем этих сил F , а направление укажем на схеме удара. Подробное решение данной задачи представим в виде таблицы (таблица № 2.3.1.1).

Таблица 2.3.1.1- Расчет ударного импульса от цилиндрического бойка площадью поперечного сечения большей, чем площадь волновода

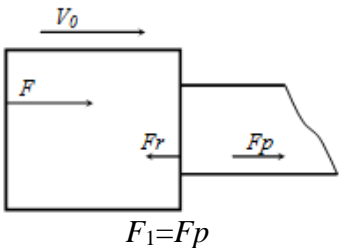
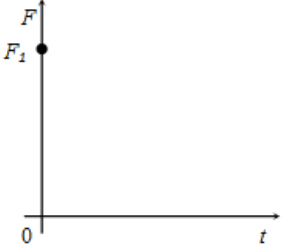
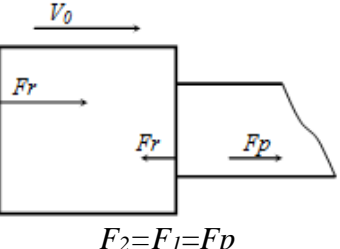
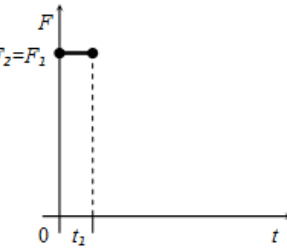
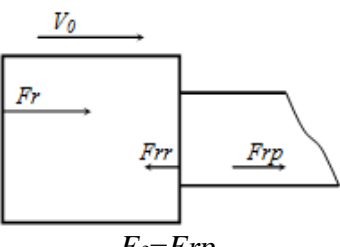
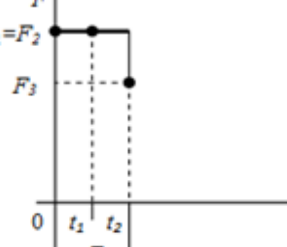
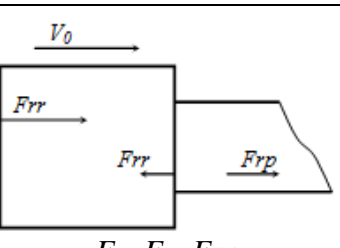
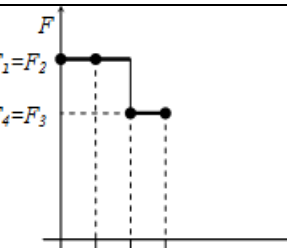
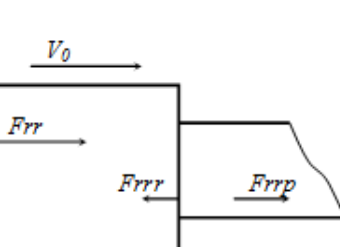
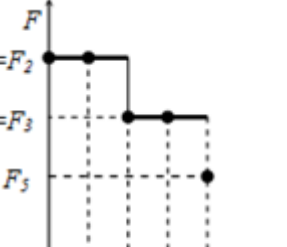
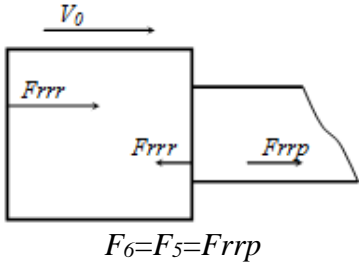
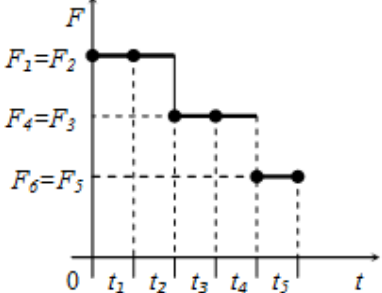
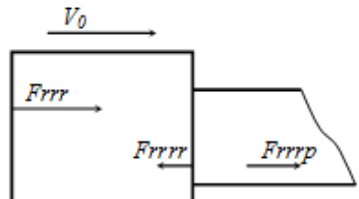
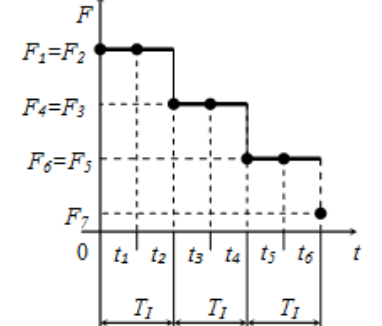
№ п/п	Время	Схема формирования сил в ударнике и волноводе	График ударного импульса
1	$t = 0$ Момент нанесения удара	 $F_1 = F_p$	
2	$t_1 = L\sqrt{\frac{\rho}{E}}$	 $F_2 = F_1 = F_p$	
3	$t_2 = 2L\sqrt{\frac{\rho}{E}}$ Выход первой волны ударного импульса	 $F_3 = F_{rp}$	
4	$t_3 = 3L\sqrt{\frac{\rho}{E}}$	 $F_4 = F_3 = F_{rrp}$	
5	$t_4 = 4L\sqrt{\frac{\rho}{E}}$ Выход двух длин волн ударного импульса	 $F_5 = F_{rrrp}$	

Таблица 2.3.1.1- Расчет ударного импульса от цилиндрического бойка площадью поперечного сечения большей, чем площадь волновода (продолжение таблицы)

6	$t_5 = 5L\sqrt{\frac{\rho}{E}}$	 <p style="text-align: center;">$F_6=F_5=F_{rrp}$</p>	
7	<p>Выход трех длин волн ударного импульса</p> $t_6 = 6L\sqrt{\frac{\rho}{E}}$	 <p style="text-align: center;">$F_7=F_{rrrp}$</p>	

Ступенчатость итогового графика связана с тем, что в рассматриваемом примере ударник и волновод имеют различную площадь поперечного сечения. Поэтому на границе ударника и волновода происходит отражение волн смещений, что приводит к увеличению времени выхода энергии в волновод при ударе.

В приведенном примере расчет производится для трех длин волн. На практике важнейшее значение имеет только первая длина волны. Это связано с режимом работы ударного механизма, где частота циклических нагрузок достаточно высока и время, проходящее между двумя последующими ударами $T_{уд}$, соизмеримо с двумя длинами волн (как правило, $1,5T_1 < T_{уд} < 2,5T_1$). Исходя из этого, в рассмотренном решении достаточно было рассмотреть четыре временных промежутка.

В разделе 1 п. 1.3, описываются условия, влияющие на производительность ударных систем, в зависимости от формы ударника. Одним из таких аспектов, является время выхода энергии в волновод при ударе, оно должно быть минимальным. Одним из факторов тормозящих этот выход является заметное различие в диаметрах ударного торца бойка и волновода. Для этого рассмотрим удар цилиндрическим бойком, диаметр которого равен диаметру волновода

($d=d_0$), что, соответственно, сделает равными площади поперечного сечения $S=S_0$. Длину ударника – L , модуль упругости E и плотность ρ материала бока волновода оставим прежними. Нетрудно видеть, что поменяются только коэффициенты отражения и прохождения (они будут иметь два предельных значения):

$$r = \frac{S - S_0}{S + S_0} = 0 \text{ и } p = \frac{2S_0}{S + S_0} = 1 \quad (2.3.1.6)$$

Аналитическое решение определения формы ударного импульса представим в виде таблицы (таблица 2.3.1.2), где ограничимся четырьмя временными промежутками. Данное решение имеет немаловажное значение, оно определяет минимальное время выхода энергии в волновод при ударе (оно равно времени выхода первой волны ударного импульса) и оптимальное соотношение между площадями ударного торца бойка и площади поперечного сечения удароприемника - они должны быть равны.

Таблица 2.3.1.2 – Расчет ударного импульса от цилиндрического бойка площадью поперечного сечения равной площади волновода

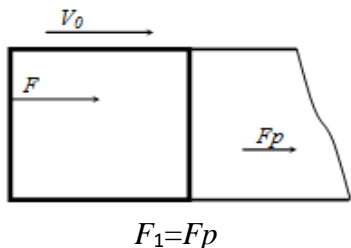
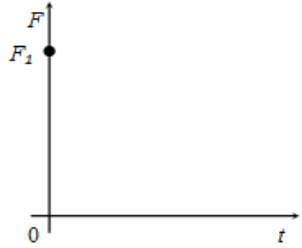
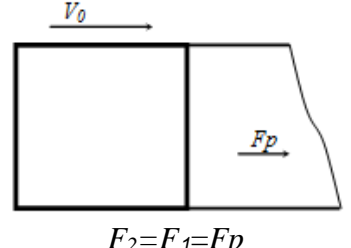
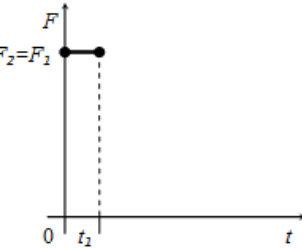
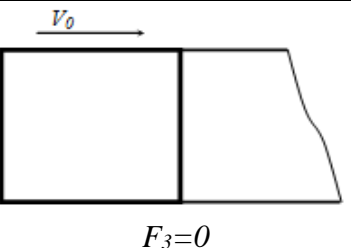
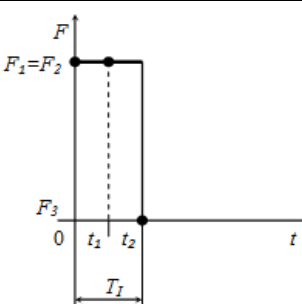
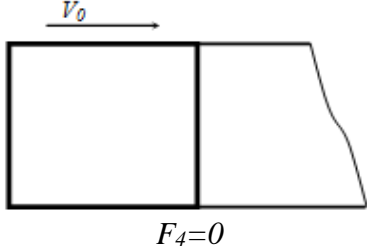
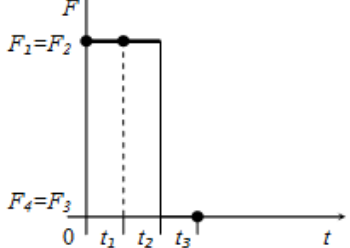
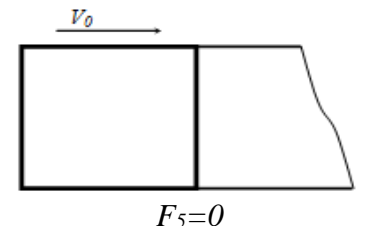
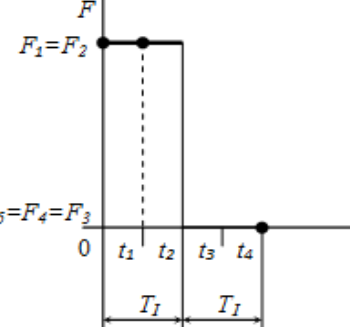
№ п/п	Время	Схема формирования сил в ударнике и волноводе	График ударного импульса
1	$t = 0$ Момент нанесения удара	 <p style="text-align: center;">$F_1 = F_p$</p>	
2	$t_1 = L\sqrt{\frac{\rho}{E}}$	 <p style="text-align: center;">$F_2 = F_1 = F_p$</p>	
3	$t_2 = 2L\sqrt{\frac{\rho}{E}}$ Время выхода первой ударного импульса	 <p style="text-align: center;">$F_3 = 0$</p> <p style="text-align: center;">ВАЖНО момент выхода всей энергии в волновод</p>	

Таблица 2.3.1.2 - Расчет ударного импульса от цилиндрического бойка площадью поперечного сечения равной площади волновода (продолжение таблицы)

4	$t_3 = 3L\sqrt{\frac{\rho}{E}}$	 <p style="text-align: center;">$F_4=0$</p>	
5	<p>Время выхода двух длин волн ударного импульса</p> $t_4 = 4L\sqrt{\frac{\rho}{E}}$	 <p style="text-align: center;">$F_5=0$</p>	

2.3.2 Ступенчатый боек

Выводы, полученные из решения предыдущей задачи, определили условие следующей задачи. Для увеличения эффективности удара необходимо сократить минимальное время выхода энергии в волновод. Его величина определяется соотношением (2.3.1.3) и зависит от длины ударника. Поэтому необходимо, сохраняя массу и материал бойка, уменьшить его длину, это возможно путем внесения геометрических изменений в конструкцию бойка. Например, ударник можно сделать ступенчатым (состоящим из двух и более цилиндрических ступеней), но при этом следует сохранить равенство площадей ударного торца бойка и площади поперечного сечения удароприемника.

Рассмотрим формирование ударного импульса от ступенчатого бойка, выполненного в виде двух цилиндрических ступеней одинаковой длины l_1 , имеющих диаметры d_1 и d_2 , при соударении с полубесконечный волноводом диаметром $d_0=d_1$ (рисунок 2.3.2.1). Для решения этой задачи назовем известные величины, характеризующие эту ударную систему, и определим начальные условия.

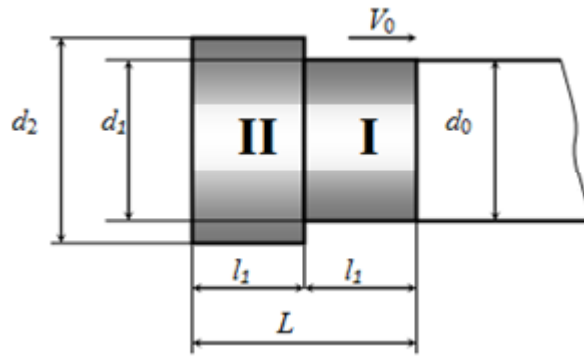


Рис. 2.3.2.1 Схема удара ступенчатым бойком по полубесконечному волноводу

Величины, характеризующие ударную систему: *геометрические характеристики* (d_1 и d_2 — диаметры первой и второй ступени ударника соответственно, l_1 — длина одной цилиндрической ступни, L — общая длина бойка, d_0 — диаметр удароприемника); *механические характеристики* (ρ и E — плотность и модуль упругости материала соударяющихся тел, V_0 — скорость ударника в момент нанесения удара).

Начальные условия: перед ударом боек движется со скоростью V_0 в направлении неподвижного волновода. Ударный контакт производится по всей площади соприкосновения бойка и волновода.

Проведем решение этой задачи, согласно алгоритму, рассмотренному ранее (раздел 1, п.1.3).

- 1) Представление ударника в виде цилиндрических ступеней в этой задаче не имеет смысла, так как ударник создан из двух цилиндрических ступеней, имеющих диаметры d_1 и d_2 , и одинаковой длины l_1 .
- 2) Определим коэффициенты, отражения r и прохождения p продольной волны смещений на границах:

2.1) соударения ударник-волновод: r_1 и p_1 :

$$r_1 = \frac{S_0 - S_1}{S_1 + S_0} = 0 \text{ и } p_1 = \frac{2S_0}{S_1 + S_0} = 1, \quad (2.3.2.1)$$

данные значения коэффициентов отражения и прохождения обусловлены равенством площадей S_1 и S_0 , что было определено при постановке задачи.

2.2) изменения поперечного сечения ударника (граница между ступенями): r_2 и p_2 – для волны, движущейся из сечения II в сечение I, в направлении предупредной скорости бойка V_0 .

$$r_2 = \frac{S_1 - S_2}{S_2 + S_1} \text{ и } p_2 = \frac{2S_1}{S_2 + S_1}, \quad (2.3.2.2)$$

где S_1 и S_2 – площади поперечного сечения ступеней, составляющих ударник I и II соответственно.

2.3) изменения поперечного сечения ударника (граница между ступенями): r_3 и p_3 – для волны, движущейся из сечения I в сечение II, против направления предупредной скорости бойка V_0 :

$$r_3 = \frac{S_2 - S_1}{S_2 + S_1} \text{ и } p_3 = \frac{2S_2}{S_2 + S_1}. \quad (2.3.2.3)$$

3) Определим временной интервал, за который произведем вычисление силового импульса, сгенерированного при ударе, для этого вычислим время первой волны ударного импульса T_1 согласно (2.3.1.3). Чтобы задать количество единичных расчетных временных интервалов, вычислим время прохождения волной смещений одной ступени ударника в одном направлении. В данном случае ступени две, их длина одинакова и равна l_1 . Время одного единичного расчетного интервала t_1 – это время прохождения волной смещений одной ступени, т.к. ступени две и время первой волны T_1 – это время прохождения ударной волной бойка в двух направлениях по всей его длине, учитывая, что необходимо рассчитать выход первых двух волн, имеем, что количество расчетных шагов равно *восемь*. Поэтому общий промежуток времени будет равен:

$$t = 2T_1 = 8t_1 = 8l_1 \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (2.3.2.4)$$

4) Произведем расчет сил прошедших в волновод за произвольно определенный промежуток времени (2.3.2.4). Для этого следует определить силы, характеризующие волны смещений, в сгенерированных прямых и обратных волнах при ударе:

$$F_1^+ = \frac{V_0 \sqrt{E\rho}}{2} S_1 \text{ и } F_1^- = -\frac{V_0 \sqrt{E\rho}}{2} S_1, \quad (2.3.2.5)$$

прямая и обратная силы, характеризующие волны смещений, сгенерированные в ступени I, здесь S_1 – площадь поперечного сечения первой ступени ударника;

$$F_2^+ = \frac{V_0 \sqrt{E\rho}}{2} S_2 \text{ и } F_2^- = -\frac{V_0 \sqrt{E\rho}}{2} S_2, \quad (2.3.2.6)$$

прямая и обратная силы, характеризующие волны смещений, сгенерированные в ступени II, здесь S_2 – площадь поперечного сечения второй ступени ударника.

Подробное решение данной задачи (приложение А) рассматривает поэтапное формирование двух первых волн ударного импульса. Если удар одиночный или время между соседними ударами достаточно велико, то время полного выхода энергии, сгенерированной при ударе, будет определяться массой ударника – m , его предударной скоростью – V_0 и геометрическими размерами бойка. При достаточно большой разнице площадей цилиндрических ступеней, составляющих боек, время выхода энергии существенно увеличится, это связано с отражением энергии при движении волн смещений через границы ступеней ударника.

Следует отметить, что при увеличении количества цилиндрических ступеней ударника будет изменяться геометрия первой волны ударного импульса. В каждом случае ее внешний вид определяется числом ступеней и величинами площадей их поперечного сечения (приблизительный вид первых волн ударных импульсов от бойков, состоящих из 2-х, 3-х, 4-х и 5-ти ступеней представлены в таблице № 2.3.2.1). При этом следует отметить немаловажную особенность, что волны смещений, образующиеся в дальних ступенях ударника, не влияют на величины сил и распространение волн в ближних к ударному торцу ступенях. Величины сил, характеризующих волны смещений от дальних ступеней ударника, будут зависеть от значения динамического коэффициента удара (2.3.1.5) и численных значений площадей поперечного сечения ступеней бойка, расположенных между текущей ступенью и ударным торцом. Они вместе с площадью поперечного сечения волновода сформируют коэффициенты

отражения и прохождения энергии, переносимой волнами смещений в прямом и обратном направлениях.

Каждая силовая площадка графиков первой волны ударных импульсов, определяется численными значениями площадей поперечного сечения всех расчетных ступеней, находящихся между волноводом и рассматриваемой на данном этапе расчета ступенью. Это дает возможность корректировать профиль ударного импульса путем изменения геометрии ударников.

Таблица № 2.3.2.1 – Геометрия первой волны ударного импульса, в зависимости от числа цилиндрических ступеней бойка

Число ступеней ударника	Схематическое изображение ударника	Примерный вид первой волны ударного импульса
2		
3		
4		
5		

2.4 Численный метод определения формы ударного импульса в зависимости от формы бойка

Большинство ударников, применяемых на практике, являются однородными телами вращения [112]. Их образующая представляет собой непрерывную кривую линию, которая может быть простой, сложной или произвольной рис. 2.4.1. Любой из этих бойков может иметь внутренние полости и сквозные отверстия. Основными параметрами ударников будут: d и D - диаметры ударного и неударного торцов соответственно; L – общая длина бойка.

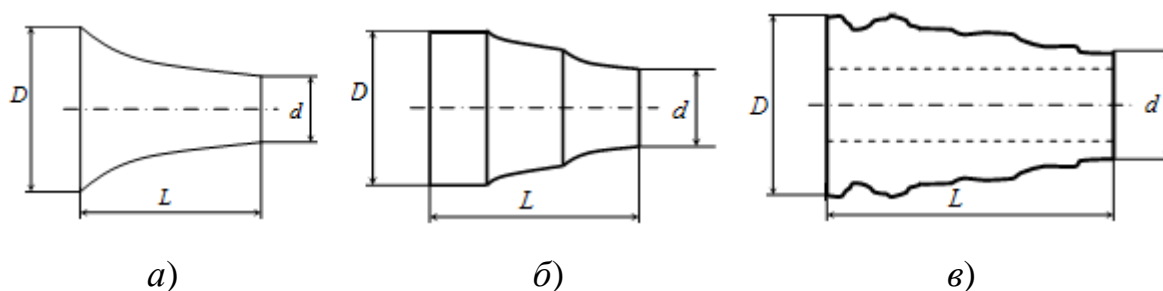


Рис. 2.4.1 Внешний вид ударников, выполненных в виде тел вращения, с образующими, заданными а) простой кривой; б) сложной линией; в) линией произвольной формы с внутренним цилиндрическим отверстием.

Для аналитического определения ударного импульса от бойков такой формы было предложено воспользоваться методом, описанным ранее (раздел 2, п. 2.3.2). Для выполнения расчета ударник необходимо представить в виде составного бойка, выполненного из цилиндрических ступеней одинаковой длины и различного (или одинакового, в зависимости от геометрии бойка) диаметра. Сформировать расчетный ударник такого вида можно разными способами (раздел 2, п. 2.1 и п. 2.2.).

Рассмотрим математические основы аналитического определения ударного импульса от бойка, являющегося телом вращения кривой линии, разбитого на пять цилиндрических ступеней одинаковой длины и различного диаметра. Удар нанесем по полубесконечному волноводу, круглого поперечного сечения диаметром d_0 , изготовленного из такого же материала, что и боек.

Для решения этой задачи назовем известные величины, характеризующие эту ударную систему, и определим начальные условия.

Величины, характеризующие ударную систему: *геометрические параметры* (N – количество расчетных цилиндрических ступеней, d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 – диаметры расчетных цилиндрических ступеней, на которые разбит ударник для проведения аналитического расчета ударного импульса, l_1 – длина одной цилиндрической ступни ударника (по условию задачи длины всех ступеней равны), L – общая длина ударника, d_0 – диаметр волновода); *физические параметры* (ρ – плотность материала бойка и волновода, E – модуль упругости материала бойка и волновода, V_0 – предударная скорость бойка).

Начальные условия: перед ударом боек движется со скоростью V_0 в направлении неподвижного полубесконечного волновода. Ударный контакт производится по всей площади соприкосновения бойка и волновода. Проведем решение этой задачи согласно алгоритму, рассмотренному в первой главе (пункт 1.2) этой работы и по ходу модернизируем аналитический метод в численный. Для этого воспользуемся составленным ранее алгоритмом:

1. Представление ударника в виде цилиндрических ступеней. Для этого необходимо воспользоваться одним из методов, которые описаны в п. 2.1. В итоге будет получена математическая модель бойка, при построении которой необходимо сформировать массив, содержащий численные значения площадей поперечного сечения расчетных цилиндрических ступеней S_i ;
2. Определим коэффициенты, отражения r и прохождения p продольной волны смещений на границах:

- 1) соударения ударник-волновод: r_1 и p_1 :

$$r_1 = \frac{S_0 - S_1}{S_1 + S_0} = 0 \text{ и } p_1 = \frac{2S_0}{S_1 + S_0} = 1, \quad (2.4.1)$$

- 2) соприкосновения расчетных цилиндрических ступеней r_i и p_i :

$$r_i = \frac{S_{i-1} - S_i}{S_i + S_{i-1}} \text{ и } p_i = \frac{2S_{i-1}}{S_i + S_{i-1}}, \quad (2.4.2)$$

для волн, распространяющихся в сторону волновода (для $i=1 \div 5$).

$$r_i = \frac{S_{i-N+1} - S_{i-N}}{S_{i-N+1} + S_{i-N}} \text{ и } p_i = \frac{2S_{i-N+1}}{S_{i-N+1} + S_{i-N}}, \quad (2.4.3)$$

для волн, распространяющихся от волновода (для $i=6 \div 2N-1$)

Изобразим схему ударника, где укажем направления распространения волн смещений и соответствующие им коэффициенты (рис. 2.4.2).

3. Ограничимся первой волной ударного импульса, так как она определяет энергоемкость процесса и несет информацию о геометрии бойка. Ее длительность определяется по формуле (2.3.1.3, см. п.2.3.1), а количество временных интервалов, исходя из этого, что ступеней пять и волна проходит каждую ступень в двух направлениях, в два раза больше количества расчетных цилиндрических ступеней $2N$ и, в данном случае, равно десяти. Длительность каждого интервала, в общем виде, будет определяться согласно выражению:

$$t_1 = \frac{L}{N} \sqrt{\frac{\rho}{E}}. \quad (2.4.4)$$

Для расчета сил, характеризующих волны смещений возникающих при нанесении удара, удобно воспользоваться двумерным массивом P_z^j (или матрицей сил) размером: $2N \times q$. Здесь: $z \in [1; 2N]$ и $j \in [1; q]$, где N – количество ступеней, на которые разбит ударник, определяет число строк массива, а q – число временных интервалов t_1 , определяющих длительность всего временного промежутка T , за который рассчитывается волновой импульс - количество столбцов матрицы. (Например, для данного случая: ударник разбит на пять ступеней $N=5$, а временной интервал T равен длительности первой волны, то $q=10$). Поэтому следует отметить, что временной диапазон может быть любым, что делает численное значение q равным любому целому положительному числу, величина которого определяется из условий решаемой задачи.

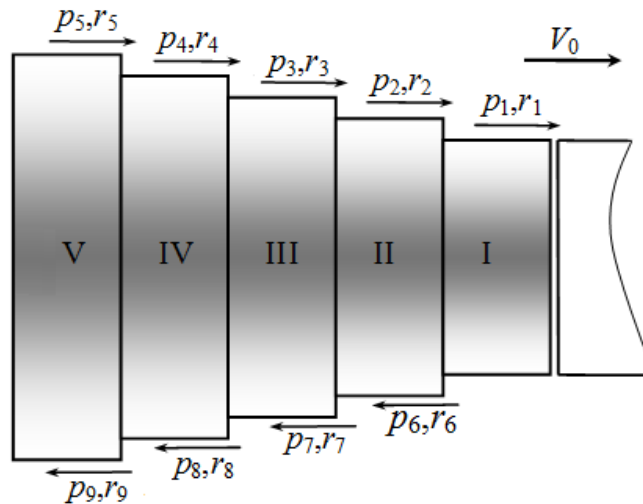


Рис. 2.4.2 Схема ударника с направлениями волн смещений

В момент удара в бойке возникают продольные волны смещений, распространяющиеся в обе стороны от границы удара. Они характеризуются силами, модули которых определяются по формуле:

$$F_i = \frac{V_0 \sqrt{E\rho}}{2} S_i, \quad (3.4.5)$$

где (2.3.1.5), S_i – площадь соответствующей расчетной цилиндрической ступени. Формирование сил в ступенях при ударе показано на рис. 2.4.3.

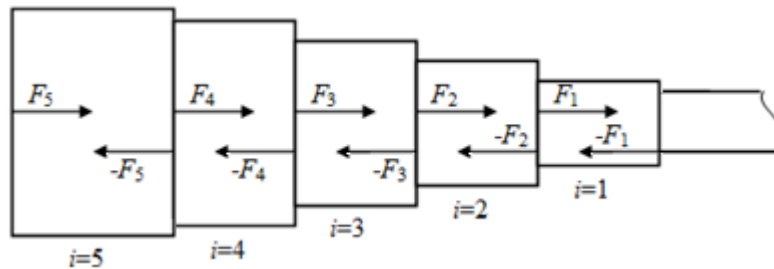


Рис. 2.4.3 Формирование сил, характеризующих волны смещений, генерируемые в каждой ступени при ударе (в момент времени $t=0$)

Величины сил записываются в первый столбец двумерного массива P_z^j , (табл. 2.4.1) и рассчитываются согласно выражениям:

$$P_{2i-1}^l = F_i \text{ и } P_{2i}^l = -F_i \quad (2.4.5)$$

Таблица 2.4.1- Первый заполненный столбец массива P_z^j

$z \backslash j$	1	2	3	...	10
1	F_1				
2	$-F_1$				
3	F_2				
4	$-F_2$				
5	F_3				
6	$-F_3$				
7	F_4				
8	$-F_4$				
9	F_5				
10	$-F_5$				

Дальнейшее заполнение матрицы сводится к расчету величин сил, прошедших через границы соприкосновения расчетных степеней ударника и к сложению величин этих сил оказавшихся по одну сторону от соответствующей границы. Рассмотрим два последующих момента, математическое описание которых позволит сформировать расчетные уравнения для формирования всех элементов массива сил P_z^j .

Моменту времени $t=t_1$ соответствует силовая схема, изображенная на рисунке 2.3.3.4. Силы на левой и правой границах расчетных ступеней умножаются на соответствующий коэффициент и складываются, а результат записывается в соответствующую ячейку второго столбца матрицы сил (табл. 2.4.2).

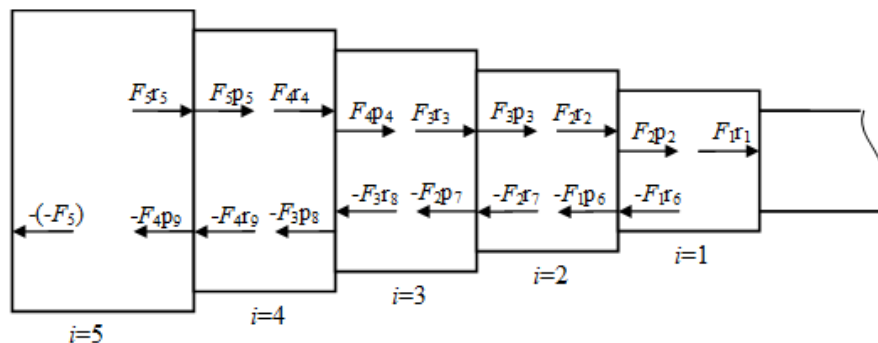


Рис. 2.4.4 Формирование сил, характеризующих волны смещений в момент времени $t=t_1$

Таблица 2.4.2 – Первый и второй заполненные столбцы массива P_z^j

$z \backslash j$	1	2	3	...	10	
1	F_1	P_1^l	$F_2 p_2 + (-F_1) r_6$	P_1^2		
2	$-F_1$	P_2^l	$F_1 r_1$	P_2^2		
3	F_2	P_3^l	$F_3 p_3 + (-F_2) r_7$	P_3^2		
4	$-F_2$	P_4^l	$F_2 r_2 + (-F_1) p_6$	P_4^2		
5	F_3	P_5^l	$F_4 p_4 + (-F_3) r_8$	P_5^2		
6	$-F_3$	P_6^l	$F_3 r_3 + (-F_2) p_7$	P_6^2		
7	F_4	P_7^l	$F_5 p_5 + (-F_4) r_9$	P_7^2		
8	$-F_4$	P_8^l	$F_4 r_4 + (-F_3) p_8$	P_8^2		
9	F_5	P_9^l	$-P_{10}^l$	P_9^2		
10	$-F_5$	P_{10}^l	$F_5 r_5 + (-F_4) p_9$	P_{10}^2		

Следует отметить, что работать с элементами массива в общем виде неудобно, поэтому данный массив следует заполнять численными значениями и для расчета каждого последующего столбца брать не величину силы в общем виде, а численное значение соответствующего элемента массива, что учтено при составлении силовой схемы для момента времени $t=2t_1$, изображенной на рис. 2.4.5

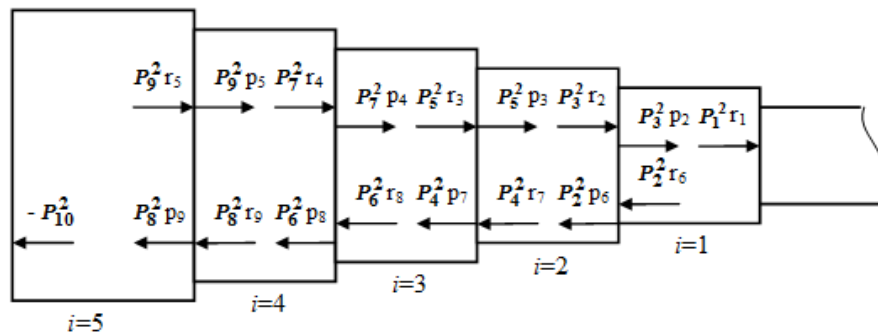


Рис. 2.4.5 Формирование сил, характеризующих волны смещений, момент времени $t=2t_1$, выписанные через адреса соответствующих ячеек массива P_z^j

Данная силовая схема позволяет заполнить третий столбец матрицы сил с учетом численных значений хранящихся в ячейках ее второго столбца. (таблица 2.4.3).

Таблица 2.4.3- Заполненный массив P_z^j

$z \backslash j$	1	2		3		...	10		
1	F_1	P_1^1	$F_2 p_2 + (-F_1) r_6$	P_1^2	$P_3^2 p_2 + P_2^2 r_6$	P_1^3	...	$P_3^9 p_2 + P_2^9 r_6$	P_1^{10}
2	$-F_1$	P_2^1	$F_1 r_1$	P_2^2	$P_1^2 r_1$	P_2^3	...	$P_1^9 r_1$	P_2^{10}
3	F_2	P_3^1	$F_3 p_3 + (-F_2) r_7$	P_3^2	$P_5^2 p_3 + P_4^2 r_7$	P_3^3	...	$P_5^9 p_3 + P_4^9 r_7$	P_3^{10}
4	$-F_2$	P_4^1	$F_2 r_2 + (-F_1) p_6$	P_4^2	$P_3^2 r_2 + P_2^2 p_6$	P_4^3	...	$P_3^9 r_2 + P_2^9 p_6$	P_4^{10}
5	F_3	P_5^1	$F_4 p_4 + (-F_3) r_8$	P_5^2	$P_7^2 p_4 + P_6^2 r_8$	P_5^3	...	$P_7^9 p_4 + P_6^9 r_8$	P_5^{10}
6	$-F_3$	P_6^1	$F_3 r_3 + (-F_2) p_7$	P_6^2	$P_5^2 r_3 + P_4^2 p_7$	P_6^3	...	$P_5^9 r_3 + P_4^9 p_7$	P_6^{10}
7	F_4	P_7^1	$F_5 p_5 + (-F_4) r_9$	P_7^2	$P_9^2 p_5 + P_8^2 r_9$	P_7^3	...	$P_9^9 p_5 + P_8^9 r_9$	P_7^{10}
8	$-F_4$	P_8^1	$F_4 r_4 + (-F_3) p_8$	P_8^2	$P_7^2 r_4 + P_6^2 p_8$	P_8^3	...	$P_7^9 r_4 + P_6^9 p_8$	P_8^{10}
9	F_5	P_9^1	$-P_{10}^1$	P_9^2	$-P_{10}^2$	P_9^3	...	$-P_{10}^9$	P_9^{10}
10	$-F_5$	P_{10}^1	$F_5 r_5 + (-F_4) p_9$	P_{10}^2	$P_9^2 r_5 + P_8^2 p_9$	P_{10}^3	...	$P_9^9 r_5 + P_8^9 p_9$	P_{10}^{10}

По выражениям, рассчитывающим элементы третьего столбца, можно выписать уравнения в общем виде, позволяющие заполнить всю матрицу:

$$\begin{aligned}
P_{2i-1}^1 &= kS_i, 1 \leq i \leq N; \\
P_{2i}^1 &= -kS_i, 1 \leq i \leq N; \\
P_{2N-1}^j &= -P_{2N}^{j-1}, 2 \leq j \leq q; \\
P_{2i-1}^j &= P_{2i+1}^{j-1} p_{i+1} + P_{2i}^{j-1} r_{N+i}, 1 \leq i \leq N; 2 \leq j \leq q; \\
P_{2i}^j &= P_{2i-1}^{j-1} r_i, 2 \leq j \leq q; \\
P_{2i}^j &= P_{2i-1}^{j-1} r_i + P_{2i-2}^{j-1} p_{N+i-1}, 1 \leq i \leq N; 2 \leq j \leq K.
\end{aligned} \tag{2.4.6}$$

Согласно этим выражениям заполняются все столбцы силового массива. Например, таким образом, заполнен десятый столбец, рассчитываемой матрицы сил (таблица 2.4.3). Здесь важным является то, что матрица сил должна обязательно заполняться по столбцам. Определяющее значение представляют собой элементы первой строки массива P_1^j , так как их численные значения, умноженные на коэффициент прохождения p_1 , представляют собой величины сил, характеризующие волны смещений прошедшие в волновод при ударе, которые записываются в одномерный массив F_j и рассчитываются согласно выражению:

$$F_j = P_1^j p_1, 1 \leq j \leq K. \tag{2.4.7}$$

Данный массив вместе со значением t_1 представляют собой численную модель ударного импульса, которая визуализируется путем построения силовой гистограммы (рис. 2.4.6). Здесь следует отметить, что элементы массива F_j попарно равны $F_{2j-1}=F_{2j}$, это обусловлено математикой расчета, что доказано в пункте 2.3.1 данной работы. Ступенчатая линия аппроксимируется гладкой кривой (пунктирная линия), описывается функцией, имеющей вид:

$$F(t) = f(t) + F_0, \quad (2.4.8)$$

где $f(t)$ – функция, задающая рост амплитуды импульса; F_0 – начальное значение силы удара (оно равно первому и второму элементу массива F_j). Область определения функции (2.4.8) ограничена промежутком $[0; t_1]$.

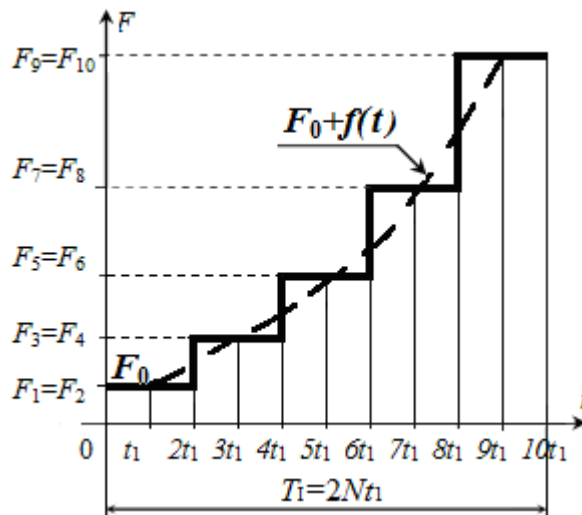


Рис. 2.4.6 Силовая гистограмма, построенная по численным значениям элементов массива сил F_j

Численный подход к решению задачи аналитического определения геометрии ударного импульса позволил создать алгоритм, блок-схема которого приведена на рис. 2.4.7, по ней легко написать программу на любом алгоритмическом языке программирования (например, Pascal, Basic, C++, Python и др.). Далее проводится анализ рассчитанного ударного импульса, в ходе которого определяются значения следующих величин: *максимальное значение силы удара* – это максимальное значение F_{\max} массива F_j ; *коэффициент*

геометрического усиления - отношение первого элемента массива F_j к максимальному; время первой волны ударного импульса; импульс силы первой волны ударного импульса – площадь столбцов силовой гистограммы (рис. 2.4.6), охватывающих первую волну ударного импульса; импульс силы от двух первых волн ударного импульса – площадь силовой гистограммы, охватывающей две первые волны ударного импульса.

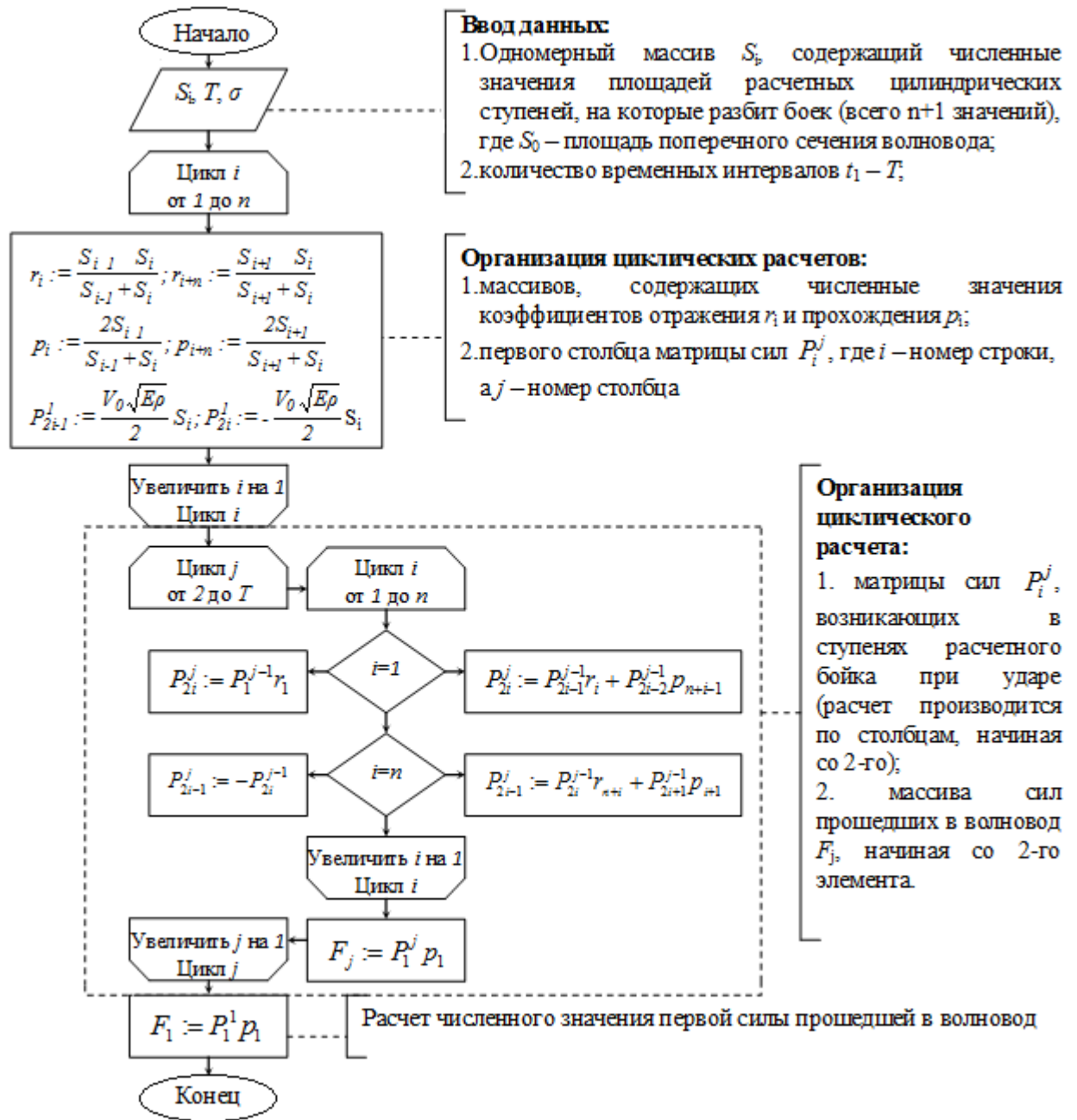


Рис. 2.4.7 Блок-схема алгоритма определения геометрии ударного импульса

2.5 Численно-аналитический метод синтеза геометрии бойка в зависимости от формы первой волны ударного импульса

Задача синтеза геометрии бойка по форме первой волны ударного импульса представляет собой обратную задачу, где по численной модели первой волны ударного импульса рассчитывается численная модель ударного узла, где генерируется этот импульс. Для ее решения было предложено применить численный метод расчета ударного импульса в обратном направлении. В итоге был разработан аналитический метод синтеза бойков переменного сечения, его преимущества и недостатки описаны выше (раздел 1, п.4). Учитывая недостатки и опираясь на пошаговую структуру алгоритма численного метода определения ударного импульса, был разработан численно-аналитический метод синтеза бойков ударных узлов машин по форме ударного импульса с высокой точностью.

Исходными данными для решения этой задачи являются:

1. F_i – одномерный массив, содержащий численные значения силовой гистограммы, описывающей первую волну ударного импульса (всего $2N$ значений);
2. t_1 – длительность первой волны ударного импульса;
3. S_0 – площадь поперечного сечения волновода ударного узла машины;
4. V_0 – предударная скорость бойка;
5. ρ – плотность материала бойка и волновода;
6. E – модуль упругости материала бойка и волновода.

Синтезируемый боек состоит из N цилиндров одинаковой длины и различного (или одинакового диаметра). Длина бойка и длина одной цилиндрической ступени определяются по исходным данным согласно выражениям:

$$L = \frac{t_1}{2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (2.5.1)$$

$$l_1 = \frac{L}{N}. \quad (2.5.2)$$

Дальнейшее решение задачи сводится к определению диаметров цилиндрических ступеней составляющих синтезируемый боек.

Поитерационный анализ численно-аналитического метода, описанного в п. 2.4, позволил создать численно-аналитический метод расчета диаметров цилиндрических ступеней составляющих синтезируемый боек. Идея данного метода заключается в том, что высоты каждого нечетного $2i-1$ и следующего за ним четного $2i$ столбцы силовой гистограммы (рис. 2.4.6) определяются численными значениями площадей цилиндрических ступеней синтезируемого бойка расположенными между волноводом и ступенью $i+1$. Здесь i – номер текущей ступени бойка, для которой рассчитывается численное значение диаметра. После расчета диаметра текущей цилиндрической ступени все сопутствующие величины, которые определяются через значение площади i -той ступени, превращаются в числа. Такой подход к решению задачи позволил создать вычислительный алгоритм для расчета численной модели ударного узла в зависимости от формы первой волны ударного импульса (рис. 2.5.1).

Итогом вычислений является одномерный массив d_i , содержащий численные значения диаметров цилиндрических ступеней синтезированного бойка. Далее по этим значениям строится модель ударника. Смоделированный боек это однородное тело вращения с образующей, представляющей собой ступенчатую линию, которую можно сгладить путем аппроксимации некоторой гладкой кривой. Функция вида $f(x)$, определяющая гладкую линию образующей синтезированного бойка, и ее область определения $x \in [0; L]$ (рис. 2.5.2), являются решением поставленной задачи.

Разработанный алгоритм синтеза легко описывается языком программирования математического приложения (например, Maple). В итоге получается процедура или функция пользователя (что зависит от приложения, где происходит реализация алгоритма), автоматизирующая процесс синтеза.

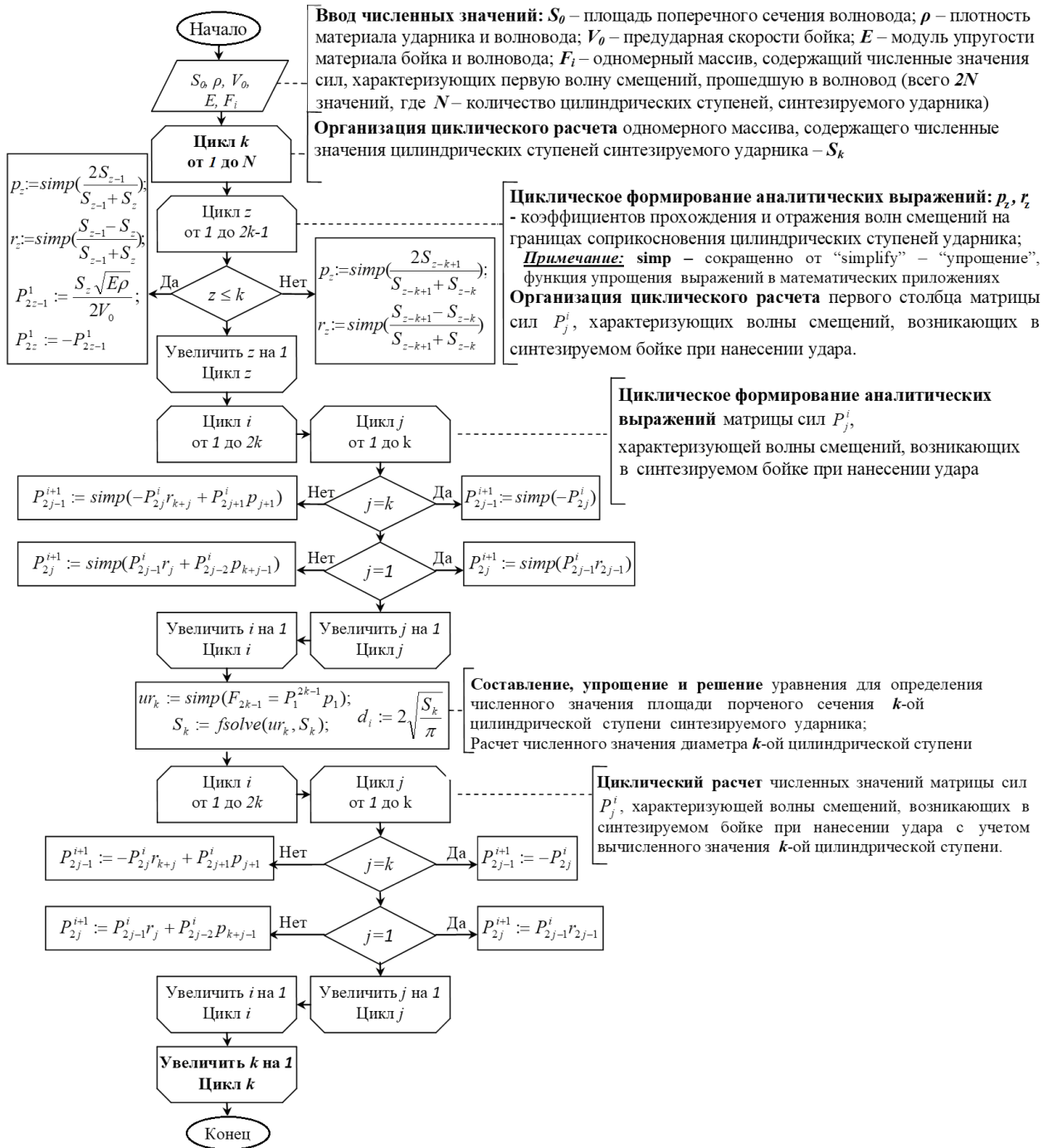


Рис. 2.5.1 Блок-схема вычислительного алгоритма численно-аналитического метода расчета численной модели ударного узла

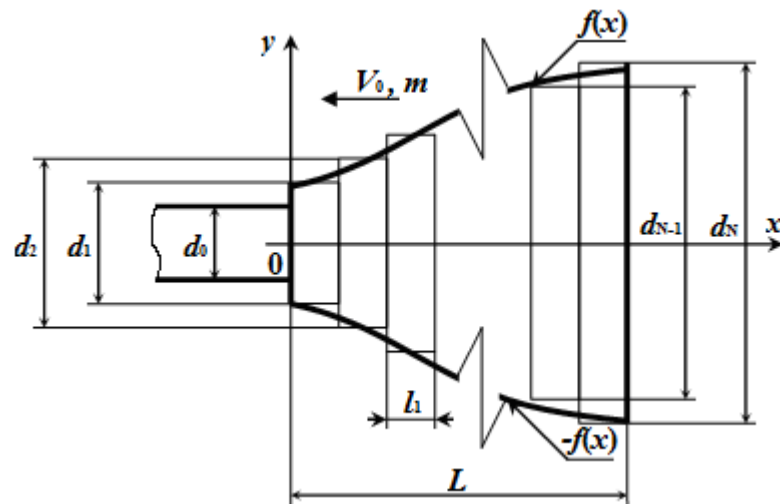


Рис. 2.5.2 Синтез ударника из цилиндрических ступеней одинаковой длины l_1 и диаметрами d_i

2.6 Сравнение моделей продольного удара

В разделе 1 п. 1.2 дан перечень известных моделей описывающих продольный удар, дадим их краткую характеристику согласно [88], с учетом геометрии ударяющихся тел.

1. Модели удара абсолютно твердых тел.

Описание: модель удара, математическое описание которой базируется на теореме об изменении количества движения, для точечных тел или тел со сферически распределенной массой. Модель не учитывает геометрию взаимодействующих тел

Преимущества: описывает поведение виброударных систем, где удар можно считать мгновенным

Недостатки: не определяет время и максимальную силу удара, а так же характер роста ударной силы.

2. Модель Герца.

Описание: модель удара, где взаимодействующие тела представляются абсолютно твердыми телами, связь между которыми осуществляется посредством упругого элемента. Здесь не учитывается геометрия ударяющихся тел, но в расчетах присутствуют радиусы кривизны их поверхностей.

Преимущества: позволяет определить время удара и максимальное значение силы удара.

Недостатки: ограниченная применимость, так как при повышении скорости удара до некоторого значения дает существенные ошибки из-за развития пластических деформаций, не учитываемых в модели.

3. Модель Релея.

Описание: модель удара, где взаимодействие ударяющихся тел описывается с точки зрения колебания стержней. Модель не учитывает геометрию ударяющихся тел.

Преимущества: позволяет определить время и максимальную силу удара.

Недостатки: предполагает наличие предположения о распределении перемещений поперечных сечений стержня, что приводит к разным результатам.

4. Модель удара сосредоточенной массы по стержню без учета распределенных сил инерции стержня.

Описание: модель удара, где масса бьющего тела значительно больше массы стержня принимающего удар, поэтому силы инерции стержня при расчетах не учитываются. Модель не учитывает геометрию взаимодействующих тел.

Преимущества: позволяет определить время удара, максимальное значение силы удара и характер роста силы удара. Вводится коэффициент динамичности удара (отношение максимальной силы удара к силе, разгоняющей ударную массу).

Недостатки: модель не учитывает массу стержня, его длину и геометрическую форму.

5. Модель удара сосредоточенной массы по стержню без учета распределенных сил инерции стержня, ориентированная на определение коэффициента динамичности.

Описание: модель удара, где масса бьющего тела значительно больше массы стержня, принимающего удар, поэтому силы инерции стержня при расчетах не учитываются. Модель учитывает расстояние, пройденное ударной массой при

разгоне из состояния покоя. Геометрия взаимодействующих тел не учитывается.

Преимущества: решает поставленную задачу с учетом разгона бьющего тела

Недостатки: не учитывает геометрию взаимодействующих тел.

6. *Модель удара сосредоточенной массы по стержню, ориентированная на определение коэффициента динамичности с учетом приведенной массы стержня.*

Описание: модель удара, масса стержня, принимающего удар, сосредоточена в ударном сечении. Ее значение вычисляется из равенства кинетической энергии стержня и кинетической энергии приведенной массы. Модель не учитывает геометрию соударяющихся тел.

Преимущества: решает поставленную задачу по определению коэффициента динамичности.

Недостатки: не учитывает геометрию взаимодействующих тел.

7. *Модель удара, где взаимодействие описывается теоремой о кинетической энергии.*

Описание: модель удара, рассчитывающая максимальное значение ударной силы, базирующаяся на теореме о кинетической энергии и гипотезах о деформации взаимодействующих тел. Геометрия ударяющихся тел не учитывается.

Преимущества: решает поставленную задачу по определению максимальной силы удара.

Недостатки: решение только локальной задачи исходя из поставленных условий.

8. *Дискретная модель удара.*

Описание: модель удара, где принимающее удар тело представлено в виде дискретной системы из n сосредоточенных масс. В модели учтены силы инерции ударной массы и масс, заменяющих стержень, принимающий удар. Геометрия ударяющихся тел не учитывается.

Преимущества: оперирует распределенной массой тела, принимающего удар.

Недостатки: количество масс, которыми заменяется стержень, принимающий удар, значительно влияют на характеристики удара: максимальное значение ударной силы и длительности удара.

9. *Волновая модель продольного удара по стержню (модель Сен-Венана).*

Описание: модель удара, по стержню с заземленным концом, где полагается, что в момент удара формируется упругая волна растяжения сжатия, которая распространяется по стержню от границы удара со скоростью звука в материале стержня. Распространение волн описывается дифференциальными уравнениями с наложенными на них граничными условиями. Геометрия тела наносящего удар не учитывается, а стержень принимающий удар имеет конечную длину и площадь поперечного сечения.

Преимущества: модель хорошо согласуется с результатами экспериментов. Дальнейшее развитие модели позволяет отследить влияние геометрии тел на характеристики удара: длительность удара, максимальное значение и характер роста силы удара.

Недостатки: предположение о том, что удар производится по всей площади соприкосновения взаимодействующих тел, что не достижимо на практике.

10. *Волновая модель удара по стержню, составленному из неоднородных элементов.*

Описание: модель удара по цилиндрическому стержню, представленному ставом цилиндрических участков различной длины и диаметра. Распространения волн описывается дифференциальными уравнениями, с известными начальными и граничными условиями, определенными при постановке задачи. Геометрия тела наносящего удар не учитывается.

Преимущества: модель учитывает распространение волны на границе контакта участков, имеющих схожую геометрическую форму.

Недостатки: модель не учитывает геометрических параметров разнородных участков, степень разнородности отличают по величинам внутренних и внешних сил, действующих на границах этих участков.

11. Волновая модель удара стержня с переменным поперечным сечением о жесткую преграду.

Описание: модель удара, описывающая контакт стержня, имеющего переменное поперечное сечение с абсолютно жесткой преградой. Распространения волн по стержню описывается дифференциальными уравнениями, с наложенными на них начальными и граничными условиями, определенными при постановке задачи. В модели учитывается геометрия тела, наносящего удар (вводится площадь поперечного сечения и ее координата), но полностью отсутствует информация о геометрии тела, принимающего удар.

Преимущества: модель учитывает геометрическую форму бьющего тела.

Недостатки: принимающее удар тело выполнено в виде абсолютно жесткой преграды, что исключает распространение в нем волн.

12. Волновая модель удара в стержневой системе неоднородной структуры [89].

Описание: модель удара, где стержневая система неоднородной структуры представлена совокупностью сопряженных элементов распределенной массы. Модель учитывает распространение волн внутри каждого элемента, преобразование волн на границах элементов, неудерживающие связи в системе и возникновение повторных волн.

Преимущества: модель учитывает геометрию ударника (работает со следующими геометрическими формами: ступенчатый стержень, состоящий из двух и трех цилиндрических ступеней различного диаметра; конический стержень).

Недостатки: Модель работает только с заданными геометрическими формами бьющих тел.

13. Модель удара неоднородных стержневых систем о жесткую преграду при неудерживающих связях [90].

Описание: модель удара, описывает контакт с жесткой преградой ступенчатых стержневых систем различных длин и площадей поперечных сечений с учетом повторных соударений.

Преимущества: модель оперирует геометрической формой бьющего тела (работает со ступенчатыми стержнями, выполненными из двух и трех цилиндрических ступеней различной длины)

Недостатки: Модель работает только с заданными геометрическими формами бьющих тел.

14. *Модель продольного соударения упругих стержней с закругленными торцами – автор Д.З. Ямпольский [91].*

Описание: модель удара, описывающая взаимодействие тела произвольной геометрической формы со стержнем, ударные торцы которых сферические. Взаимодействие тел является упругим, поперечные сечения тел остаются плоскими.

Преимущества: модель оперирует различными геометрическими формами бьющих тел со сплошными поперечными сечениями.

Недостатки: модель не оперирует телами, имеющими внутренние полости.

15. *Авторская модель продольного удара по полубескончному волноводу телом любой сложной геометрической формы.*

Описание: модель удара в стержневой системе, состоящей из двух тел: полубесконечного стержня постоянного сечения и тела сложной геометрической формы конечной длины, представляемым ступенчатым цилиндрическим телом вращения.

Отличительной особенностью является то, что модель оперирует бьющими стержнями не только любой сложной геометрической формы, но и имеющими отверстия, полости, галтели и т.д.

2.7 Сравнение авторского алгоритма численного метода расчета ударного импульса с аналогичными алгоритмами

Для сравнения выберем алгоритмы, предназначенные для расчета ударного импульса, сгенерированного в стержне постоянного сечения и полубесконечной длины, параметры которого (длительность, максимальное значение и характер

роста ударной силы) вычисляются с учетом геометрической формы взаимодействующих стержней:

1. Метод К.И. Иванова и В.Д. Андреева.
2. Метод В.К. Манжосова.
3. Авторский численный метод.

Метод К.И. Иванова и В.Д. Андреева

Описание: метод расчета характеристик генерируемого при ударе волнового импульса в стержневой системе по численной модели бьющего тела, составленного из нескольких цилиндрических ступеней (от 1 до 3 шт.). Метод базируется на представлении о формировании и распространении прямоугольных волновых импульсов, распространяющихся в обе стороны от границы удара вдоль геометрической оси системы. На границах ступеней импульсы частично отражаются, частично проходят в соседнюю ступень, при этом амплитуды импульсов изменяются, а их значения определяют коэффициенты отражения и прохождения, значения которых вычисляются через площади поперечного сечения соседних цилиндрических ступеней составляющих бьющий стержень.

Преимущества: алгоритм позволяет определять и анализировать форму ударного импульса с учетом геометрической формы стержней участвующих в ударном взаимодействии.

Недостатки: геометрическая форма стержней системы является простой и однотипной. Все изменение геометрии, допустимые алгоритмом, сводятся к изменению длин и диаметров цилиндрических ступеней, составляющих бьющее тело.

Метод В.К. Манжосова.

Описание: метод расчета характеристик генерируемого при ударе волнового импульса в стержневой системе по численной модели бьющего тела, представляющего собой сплошное тело вращения переменного сечения с образующей, в виде кривой линию, которое представляется ступенчатым телом, составленным из цилиндров одинаковой длины и различного диаметра. Расчет ударного импульса производится согласно методике, предложенной К.И.

Ивановым и В.Д. Андреевым (здесь автор волновые импульсы называет кусочными волнами, а сам метод – методом кусочных волн).

Преимущества: алгоритм позволяет расширить возможности предыдущего алгоритма путем расчета импульсов от тел вращения более сложной геометрической формы.

Недостатки: метод оперирует стержнями, представленными только сплошными телами вращения, сложность геометрической формы которых зависит от вида линии образующей.

Авторский численный метод расчета ударного импульса

Описание: метод расчета параметров ударного импульса в стержневой системе по численной модели бьющего тела, представленного стержнем любой сложной геометрической формы с внутренними отверстиями, полостями, галтелями и другими элементами, усложняющими его геометрическую форму, которое интерпретируется ступенчатым цилиндрическим телом вращения. Расчет ударного импульса производится согласно методике, предложенной К.И. Ивановым и В.Д. Андреевым.

Основными отличиями метода являются: 1) возможность расчета ударных импульсов практически от всех однородных стержней, применяемых в качестве бойков машин ударного действия; 2) возможность представления результатов вычислений, как в числовом, так и графическом представлении.

2.8. Выводы по разделу

1. Сформирован подход к описанию бойков ударных узлов машин, согласно которому все ударники разделены на две группы: простые и сложные. Это позволило создать алгоритмы для формирования численных моделей ударных узлов машин с данными бойками.
2. Разработаны методы моделирования бойков простой и сложной геометрической формы, которые позволяют сформировать численные модели ударных узлов машин, по которым аналитическим методом определяется генерируемый в узле ударный импульс.

3. Разработан численный метод расчета ударного импульса, позволяющий определять ударные импульсы, генерируемые в волноводе ударной системы бойками любой геометрической формы. Этот метод легко описывается на любом языке программирования, что позволяет автоматизировать расчеты при помощи ЭВМ.
4. Разработан численно-аналитический метод синтеза геометрии ударного узла по форме первой волны ударного импульса, генерируемого в нем. Вычислительный алгоритм метода описывается на языке математического приложения, что позволяет автоматизировать расчет при помощи ЭВМ.

3. КОМПЛЕКС ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ, РАЗРАБОТАННЫХ ДЛЯ АНАЛИЗА ГЕОМЕТРИИ БОЙКОВ УДАРНЫХ СИСТЕМ

3.1 Комплекс программ для аналитического определения ударного импульса от ударников различной геометрической формы

3.1.1 Описание программного обеспечения выбранного для моделирования и анализа ударников

Для реализации на практике численных методов моделирования бойков и расчета ударного импульса была выбрана некоммерческая среда программирования *Lozarus* и язык программирования *Object Pascal*.

Выбор среды программирования связан с особенностями компилятора (специальной программы, переводящей алгоритм, описанный на языке программирования в машинный код), который у данной среды является кроссплатформенным, что позволяет одну и ту же программу переводить в машинный код различных операционных систем:

- 1) *MICROSOFT WINDOWS* во всех, даже в неподдерживаемых производителем, версиях;
- 2) *LINUX* в различных ее модификациях, что является достаточно актуальным, так как платформа данной операционной системы является открытой, а ее использование бесплатным, что делает платформу *LINUX* привлекательной для многих промышленных предприятий;
- 3) *MacOS*.

Подробное описание с возможностями и особенностями среды *Lozarus* дано в [114-116]. Язык *Object Pascal* является собственностью среды *Lozarus*, поэтому его выбор является следствием выбора среды программирования. Возможности этого языка полностью позволили решить задачи, поставленные к первой части работы (раздел 1, п. 1.4). Особенностью программирования в *Lozarus* является

возможность создания визуальных форм, что позволяет пользователю итоговым продуктом оперировать только исходными данными и результатами вычислений.

Для ввода символьных данных с клавиатуры предусмотрено создание специальных текстовых полей с подписью названия вводимой величины рисунок 3.1.1.1. Преобразование вводимого пользователем текста в число производится с использованием встроенных в язык программирования функций [117,118]:

- 1) *StrToFloat* – функция преобразования цифровой строки в вещественный формат данных (вещественное число);
- 2) *StrToInt* – функция преобразования цифровой строки в целочисленный формат данных (целое число).

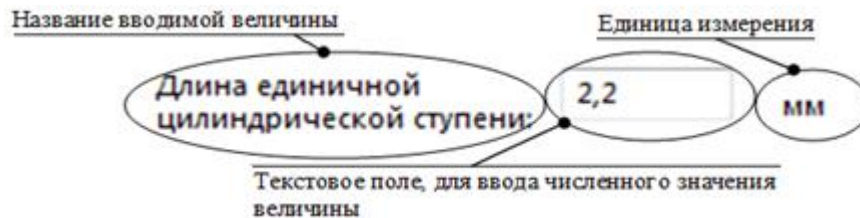


Рис. 3.1.1.1 Текстовое окно для ввода данных с клавиатуры

При вводе числовой строки используются только цифровые символы (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9) арабской записи числа. В качестве десятичного разделителя, при вводе вещественного числа, используется символ «.» или «,». Этот символ определяется параметрами операционной системы установленной на ПК. Для корректного ввода дроби подключается процедура изменения символа десятичного разделителя («.» или «,») – *DecimalSeparator* [119], которая автоматически меняет вводимый десятичный разделитель на установленный в настройках ОС. Использование данного элемента исключает ошибку при вводе десятичных дробей.

Численное моделирование бойков предполагает «произвольный» ввод функции (или нескольких функций), которая задает образующую ударника. Для этого, так же, как и для ввода численного значения создано текстовое поле с соответствующей подписью. В этом поле в строчку, по правилам математики, [120] записывается функция вида $f(x)$. Данная строка может содержать следующие

символы: арабские цифры – 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9; символы «.» или «,» – десятичный разделитель; круглые скобки «(» и «)» – задают приоритет выполнения математических операций; символы математических операций: «+» – сложение, «-» – вычитание, «*» – умножение, «/» – деление; литеры математических функций, определенных языком программирования: *sin* – синус, *cos* – косинус, *arctan* – арктангенс, *sqr* – возведение в квадрат, *sqrt* – извлечение квадратного корня, *exp* – экспонента, *ln* – натуральный логарифм, *abs* – модуль числа, *trunc* – отбрасывание дробной части числа без округления, *fruc* – возвращение дробной части числа, *round* – округление до целых по правилам математики, *pi* – возвращение численного значения числа $\pi=3,14\dots$

Преобразование строки в математическое выражение осуществляется по алгоритму обратной польской нотации (или парсинга функции) [121,122]. Программный код данного алгоритма является открытым (некоммерческим) и находится в свободном доступе в сети Интернет. Для реализации этого алгоритма была написана специальная функция пользователя *parse* (приложение Б), входными параметрами которой являются: строка, задающая функцию вида $f(x)$, численное значение аргумента x (вещественное число) и строковая переменная для вывода ошибки, если такая допущена при вводе строки функции. Результатом выполнения функции *parse* является вещественное число, определяющее значение вводимой функции $f(x)$ в зависимости от величины аргумента x .

При моделировании ударников в стороннем приложении происходит формирование массива численных значений, задающих численную модель бойка. Эти величины записываются в текстовый файл (*.txt) и располагаются в нем определенным образом (в строчку через пробел или в столбец). Для работы с файлом данных в языке программирования *Lozarus* предусмотрен специальный компонент *OpenDialog.execute* [123], позволяющий вызывать окно операционной системы для поиска нужного файла на носителе информации.

Вывод рассчитываемых в программе величин производится двумя способами:

- 1) в строку (рис. 3.1.1.2) для этого используется встроенная функция *FloatToStrF* [124], преобразующая вещественный формат данных (вещественное число) в строковый с использованием форматированного вывода числа;
- 2) графически (рис. 3.1.1.3) для этого используется специальный программный компонент *tChart*, предназначенный для вывода графической информации. [125]. Линии, отображающие графики искомых зависимостей, строятся путем нанесения точек с рассчитанными в ходе выполнения программы координатами. Количество точек подбирается так, чтобы человеческий глаз воспринимал их совокупность как непрерывную линию. Одной из немаловажных особенностей компонента *tChart* является возможность оперативного масштабирования графика функции при помощи мыши. При выделении необходимой области графика происходит ее моментальное увеличение на всю область, отведенную под построение графика функции (рис. 3.1.1.4).

Запись программного кода производилась на языке *Object Pascal* с использованием встроенных операторов и функций, описывающих алгоритмически структуры [126].

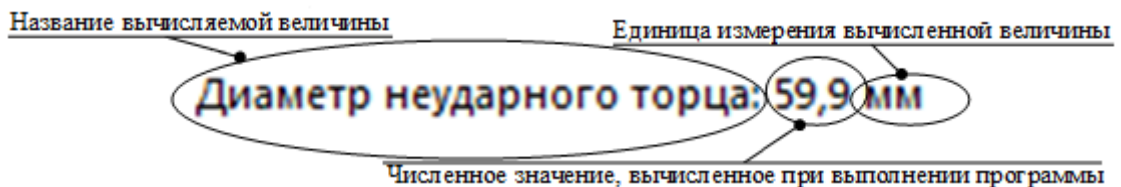


Рис. 3.1.1.2 Вывод в строку численного значения вычисленной величины

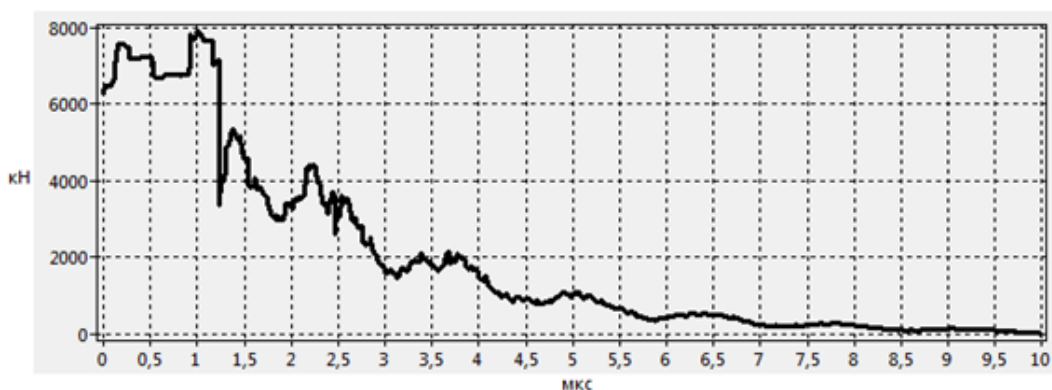


Рис. 3.1.1.3 График, построенный с использованием компонента TChart

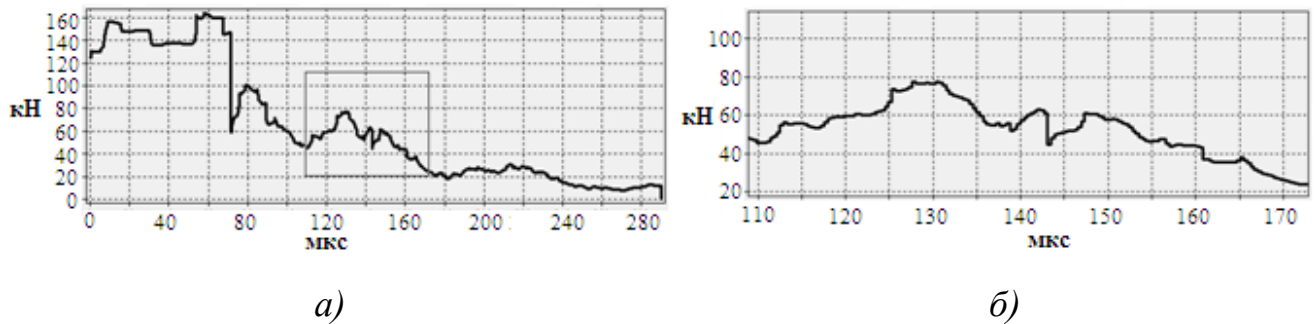


Рис. 3.1.1.4 Оперативное масштабирование графика: а) выделение области графика; б) увеличенное изображение выделенной области графика

3.1.2 Реализация на практике алгоритмов численного моделирования бойков, выполненных в форме тела вращения плоской кривой вокруг геометрической оси ударника

Численное моделирование бойков осуществляется по двум алгоритмам (раздел 2, п. 2.1). Данные алгоритмы позволяют моделировать простые бойки (одноступенчатые или многоступенчатые) и формировать численную модель ударного узла машины. По этой модели производится расчет ударного импульса численным методом (раздел 2, п. 2.4).

Моделирование одноступенчатого ударника и расчет ударного производятся по следующим параметрам: *механическим* (масса (кг); плотность ($\text{кг}/\text{м}^3$) и модуль упругости (МПа) материала элементов ударного узла; предударная скорость бойка (м/с)) и *геометрическим* (длина одной цилиндрической ступени (мм); диаметр волновода (мм) (данная величина вычисляет нулевой элемент S_0 массива S_i , задается при моделировании бойка, не влияет на характеристики ударника и используется при расчете ударного импульса); функция образующей боковой поверхности бойка $f(x)$). Численные значения данных параметров определяются пользователем «произвольно». Для этого посредством совокупности текстовых полей организован ввод этих величин с клавиатуры и создан специальный элемент программного окна «Расчетные параметры бойка», предназначением которого является визуализация данной

операции (рис 3.1.2.1). Для запуска моделирования одноступенчатого ударника, создана процедура, запускаемая при нажатии виртуальной клавиши «Расчет модели бойка» (рис. 3.1.2.1).

В результате выполнения процедуры моделирования строится эскиз бойка и выводятся расчетные характеристики ударника и ударного процесса (рис. 3.1.2.2): количество цилиндрических ступеней (шт), длина бойка (мм), диаметры ударного и неударного торцов (мм), погрешность, допущенная при формировании расчетного (ступенчатого) ударника численным методом (%), скорость звука в материале элементов ударного узла (м/с).

Величиной погрешности моделирования можно варьировать, изменяя величину длины единичной цилиндрической ступени и, как видно по рис. 3.1.2.2, можно добиться исключительного результата: 0,95%. При данном подходе к формированию бойка сразу создается расчетный ударник и формируется массив S_i , позволяющий в дальнейшем произвести расчет ударного импульса.

Расчетные параметры бойка

Масса: 3 кг

Длина единичной цилиндрической ступени: 2,2 мм

Диаметр волновода: 36 мм

Плотность материала бойка и волновода: 7850 кг/м³

Модуль упругости материала бойка и волновода: 2,1 *10⁵ МПа

Предударная скорость бойка: 5 м/с

Функция образующей боковой поверхности бойка:
 $1/195000 * x * x + 16$

Расчет модели бойка

Рис. 3.1.2.1 Элемент программного окна «Расчетные параметры бойка» для ввода параметров одноступенчатого ударника

Моделирование многоступенчатого ударника и расчет ударного импульса происходит по следующим параметрам: физическим (масса (кг), плотность материала бойка и волновода (кг/м³), модуль упругости материала бойка и

волновода (МПа), предупредная скорость бойка (м/с)) и *геометрическим* (количество ступеней ударника (шт), в данном случае, *от одной до трех*; функции образующих каждой ступени ударника, в данном случае, *от одной до трех*; длины каждой ступени ударника (мм); количество единичных (расчетных) цилиндрических ступеней; диаметр волновода (мм).

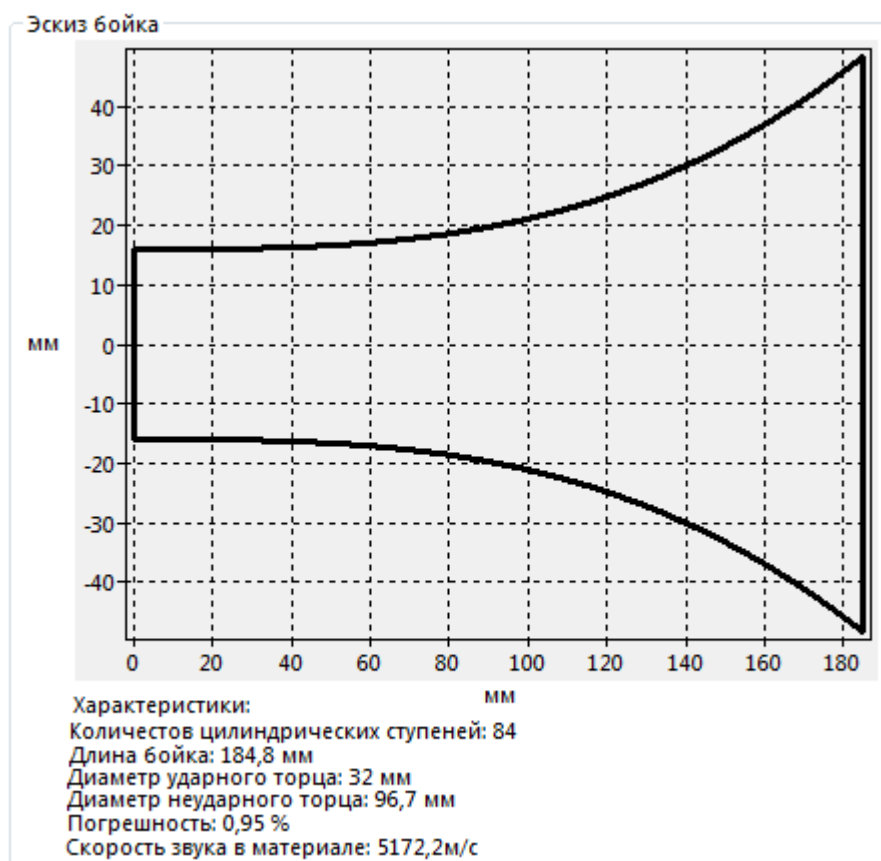


Рис. 3.1.2.2 Элемент программного окна «Эскиз бойка» с моделью одноступенчатого ударника

Численные значения вводимых параметров так же, как и в предыдущем случае, определяется пользователем «произвольно», что предполагает организацию их ввода с клавиатуры (рис. 3.1.2.3). Для запуска моделирования многоступенчатого ударника была создана процедура, запускаемая при нажатии виртуальной клавиши «Расчет модели бойка» (рис. 3.1.2.3). В результате

выполнения процедуры строится эскиз бойка и выводятся расчетные характеристики.

Расчетные параметры бойка

Количество ступеней бойка (1-3):

Функция образующей первой ступени: Длина 1-ой ступени (мм):

Функция образующей второй ступени: Длина 2-ой ступени (мм):

Функция образующей третьей ступени: Длина 3-ей ступени (мм):

Масса: кг

Плотность материала бойка и волновода: кг/м³

Модуль упругости бойка и волновода: *10⁵ Мпа

Предударная скорость бойка: м/с

Количество единичных цилиндрических ступеней:

Диаметр волновода: мм

Рис. 3.1.2.3 Элемент программного окна «Расчетные параметры бойка» для ввода параметров многоступенчатого ударника

Как и в предыдущем случае, погрешностью моделирования можно варьировать путем изменении количества единичных цилиндрических ступеней. Итогом моделирования является формирование массива S_i , необходимого для расчета ударного импульса.

Следует отметить, что каждую ступень многоступенчатого ударника можно сформировать, как одноступенчатый боек, используя алгоритм численного моделирования одноступенчатого бойка. Для этого достаточно знать распределение массы по ступеням в ударнике.

Алгоритм моделирования многоступенчатого бойка позволяет моделировать и одноступенчатый ударник, для этого необходимо знать общую длину бойка (рис. 3.1.2.5). Оба алгоритма численного моделирования ударников являются взаимодополняющими. Их вполне достаточно для численного моделирования ударников простых бойков с образующей, заданной несколькими функциями вида $f(x)$ (от 1 до 3).

Недостатком данного подхода к формированию ударников является то, что бойки обязательно должны представлять собой сплошные тела вращения правильной геометрической формы (без выступов, прорезей, внутренних полостей и т.д. и т.п.)

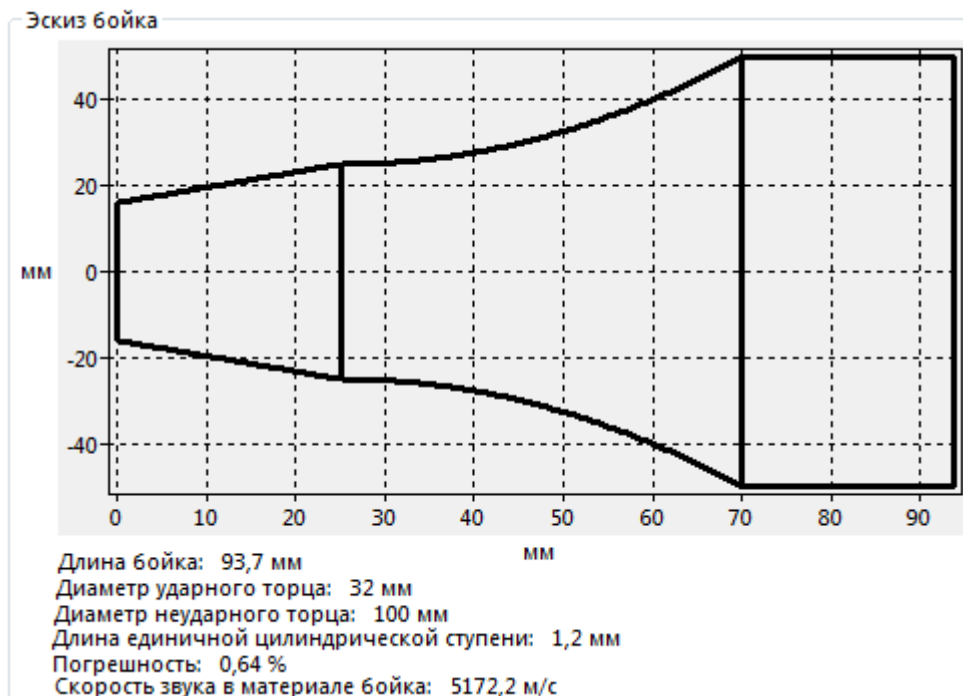


Рис. 3.1.2.4 Элемент программного окна «Эскиз бойка» с моделью многоступенчатого ударника

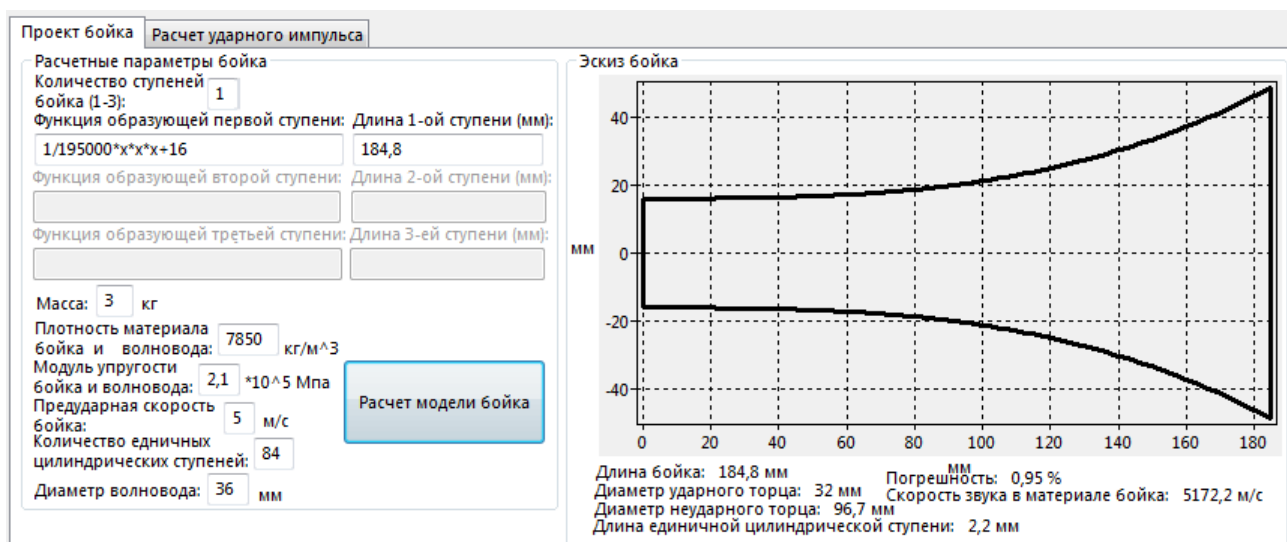


Рис. 3.1.2.5 Моделирование одноступенчатого бойка по алгоритму моделирования многоступенчатого ударника

3.1.3 Метод моделирования ударников «произвольной» формы и способ формирования приведенного бойка

Как было сказано ранее (раздел 2, п. 2.2), бойки погружных пневмоударников представляют собой тела произвольной формы, симметрия в которых может быть нарушена. Моделирование таких тел (да и практически всех ударников) на практике осуществляется в компьютерных САД системах (например, КомпАс, T-Flex и др.), где итогом работы является 3D модель бойка. Для расчета ударного импульса аналитическим методом, ее необходимо представить в приведенном виде. Используя внутренние ресурсы среды моделирования, 3D модель ударника рассекают секущими плоскостями, расположенными на одинаковом расстоянии друг от друга [113]. Величина этого расстояния зависит от сложности боковой поверхности моделируемого объекта (обычно варьируется в пределах 0,1-2мм). Площади ударного торца и всех сечений вычисляются автоматически и записываются в текстовый файл, являющийся одним из исходных данных для формирования приведенной модели бойка. Получается, что на данном этапе формируется массив S_i без нулевого элемента.

Моделирование приведенной модели бойка производится численно, по следующим параметрам: *механическим* (масса бойка (кг); плотность (кг/м^3) и модуль упругости (МПа) материала элементов ударного узла; предупредительная скорость бойка (м/с)) и *геометрическим* (длина одной цилиндрической ступени (мм), численное значение которой должно быть обязательно равно расстоянию между секущими плоскостями, рассекающими 3D модель ударника; диаметр волновода (мм), данная величина является нулевым элементом S_0 массива S_i , задается при моделировании бойка, не влияет на характеристики ударника и используется при расчете ударного импульса; текстовый файл, содержащий численные значения площадей ударного торца и всех сечений, на которые рассечена 3D модель реального ударника).

Численные значения вводимых с клавиатуры параметров выбирается «произвольно», а содержимое файла зависит от геометрических характеристик реального бойка. Для работы с исходными данными был спроектирован элемент программного окна, позволяющий визуализировать операцию ввода численных значений исходных величин (рис. 3.1.3.1). Виртуальная клавиша «Обзор» позволяет запустить диалог [127, 128] для поиска файла данных, записанный на диск. Для запуска моделирования приведенного ударника была создана процедура, запускаемая при нажатии виртуальной клавиши «Расчет приведенной модели бойка» (рис. 3.1.3.1).

Результатом выполнения расчетной процедуры является построение приведенной модели бойка и вывод численных значений, рассчитываемых параметров ударника, и ударного процесса: количество цилиндрических (расчетных) ступеней (шт) (*обязательно должно совпадать с количеством чисел записанных в файл данных*); длина бойка (мм) (*обязательно должна совпадать с длиной ударника на 3D модели*); диаметр ударного торца (мм); диаметр неударного торца (мм); скорость звука в материале бойка и волновода (м/с) (рис. 3.1.3.2).

Расчетные параметры бойка

Масса: 3 кг

Длина единичной цилиндрической ступени: 1 мм

Диаметр волновода: 36 мм

Плотность материала бойка и волновода: 7850 кг/м³

Модуль упругости материала бойка и волновода: 2,1 *10⁵ МПа

Предударная скорость бойка: 5 м/с

Выберите файл, со значениями площадей цилиндрических ступеней определяющих геометрию приведенного бойка:

Рис. 3.1.3.1 Элемент программного окна «Расчетные параметры бойка» для ввода параметров приведенной модели бойка

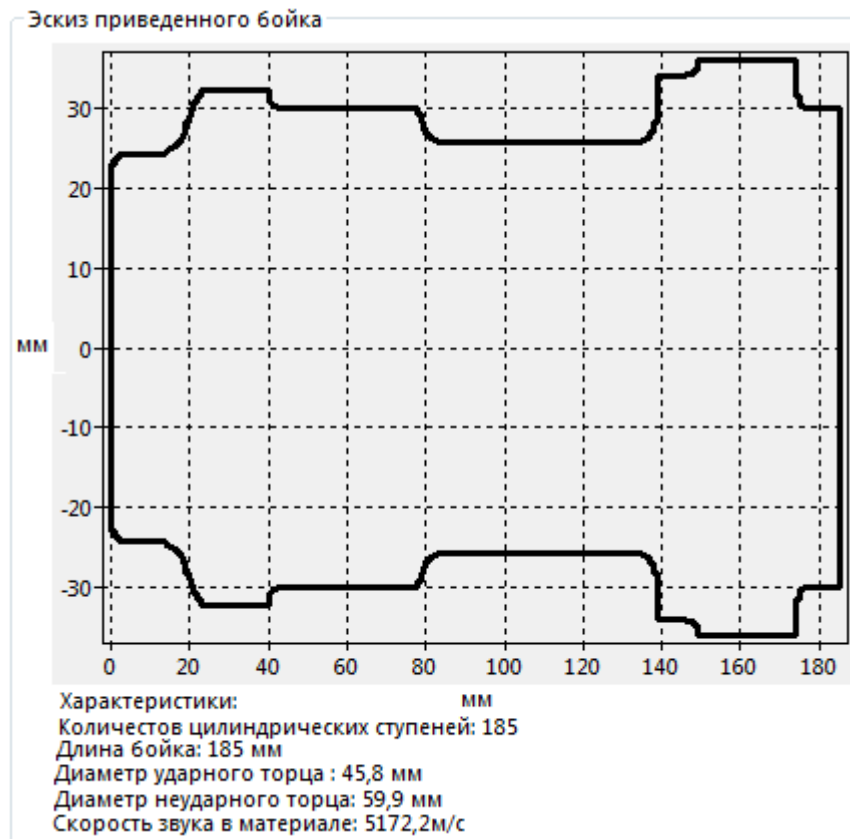


Рис. 3.1.3.2 Элемент программного окна «Эскиз приведенного бойка» с приведенной моделью сложного бойка

3.1.4 Реализация на практике алгоритма численного метода расчета ударного импульса и его основных характеристик

Для визуализации расчета ударного импульса был создан элемент программного окна «Расчет и построение ударного импульса». Запуск расчета ударного импульса численным методом производится путем нажатия виртуальной кнопки «Генерация ударного импульса», которая запускает процедуру, работающую по алгоритму, рассмотренному ранее (рис. 2.4.7, раздел 2, п. 2.4). Входными параметрами данной процедуры являются:

- 1) одномерный массив S_i , формируется при моделировании расчетного или приведенного бойка. Элементы массива пользователю не выводятся и хранятся в памяти компьютера, на котором производится расчет;

- 2) численное значение коэффициента k , рассчитываемого по формуле (2.3.1.5). Численное значение коэффициента пользователю не выводится и хранится в памяти компьютера, на котором производится расчет;
- 3) количество расчетных шагов – обязательно целое число, вводимое с клавиатуры в специально предусмотренном для этого поле. При вводе данной величины, следует помнить, что ее численное значение не должно быть меньше $2N$ (здесь N количество расчетных цилиндрических ступеней, на которые разбит боек при численном моделировании; количество элементов массива S_i).

Результатом расчета ударного импульса является его график, построенный в специальном графическом поле (рис. 3.1.4.1).

Далее по графику производится численный анализ ударного импульса. Для этого создана виртуальная кнопка: «Расчет параметров ударного импульса» (рис. 3.1.4.2), запускающая процедуру расчета величин, характеризующих ударный импульс и определяемых по правилам, описанным выше (раздел 2, п. 2.4): начальное значение силы удара (кН); максимальное значение силы удара (кН); коэффициент усиления (раз); время первой волны ударного импульса (мкс); импульс силы первой волны от удара смоделированным бойком (кН·мкс); импульс силы двух первых волн от удара смоделированным бойком (кН·мкс).

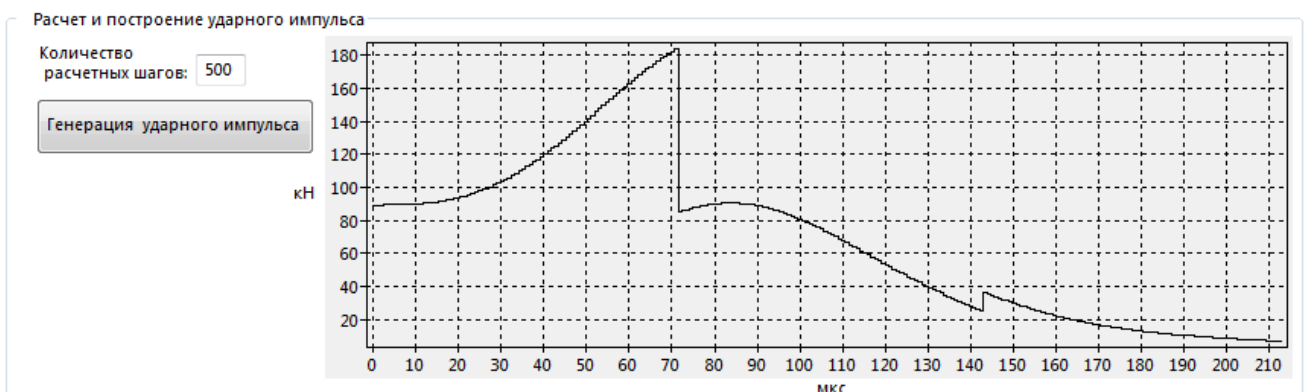


Рис. 3.1.4.1 Элемент программного окна «Расчет и построение ударного импульса»

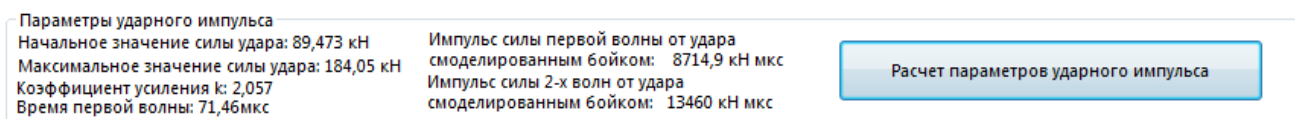


Рис. 3.1.4.2 Элемент программного окна «Параметры ударного импульса»

3.2 Комплекс программ, предназначенных для анализа бойков сложной геометрической формы

3.2.1 Общий подход к созданию комплекса программ

В итоге работы по разработке алгоритмов численного моделирования ударных узлов машин и расчета ударного импульса был создан комплекс инженерно-расчетных программ, позволяющих аналитически определять и анализировать ударные импульсы от бойков любой геометрической формы. Он состоит из трех программ, отличающихся друг от друга методами моделирования ударников:

1. *Программа, моделирующая одноступенчатый, цельнотельный однородный боек и рассчитывающая ударный импульс им генерируемый*
Свидетельство ПВМ №2015662766. Ударный импульс 2.0 / Тимофеев Е.Г., Жуков И.А. (РФ) – №2015619792; поступление 13.10.2015; зарегистр. 01.12.2015 (приложение В).
2. *Программа, моделирующая многоступенчатый цельнотельный однородный боек и рассчитывающая ударный импульс им генерируемый*
Свидетельство ПЭВМ №2017613900 Удар многоступенчатым бойком / Тимофеев Е.Г., Жуков И.А. – №2016662568 поступление 22.11.2016; зарегистр. 03.05.2017 (приложение В).
3. *Программа, моделирующая приведенную форму цельнотельного однородного бойка по данным импортируемым из файла, созданного в стороннем приложении и рассчитывающая ударный импульс им генерируемый*

Свидетельство ПЭВМ №2019619495. Удар бойком сложной геометрической формы / Тимофеев Е.Г., Жуков И.А. – №20196118226; поступление 05.07.2019; зарегистр. 18.07.2019. (приложение В).

Листинги программ приведены в *приложении Г*. Программы имеют схожий интерфейс, выполненный из двух вкладок:

- I. *Проект бойка* – здесь производится ввод численных значений, описывающих физические и геометрические параметры ударника (раздел 3, п. 3.1.2 и п. 3.1.3), строится эскиз бойка, выводятся расчетные параметры процесса моделирования и сопутствующих величин, необходимых для расчета ударного импульса;
- II. *Расчет ударного импульса* – здесь производится расчет и построение графика ударного импульса, а так же производится его анализ и вывод численных значений расчетных характеристик.

Алгоритмическая схема работы с каждой программой комплекса представлена на рисунке 3.2.1.1. Она имеет линейную структуру, задающую строго определенный порядок выполнения процедур, составляющих программы. Для удобства пользователя с целью предотвращения ошибок и сбоев при работе с комплексом программ, была введена блокировка исполнения последующих операций.

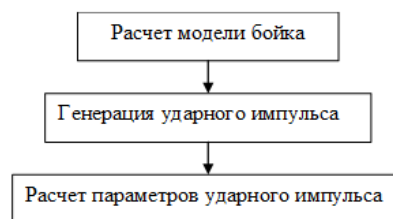


Рис. 3.2.1.1 Алгоритмическая схема работы программ комплекса

3.2.2 Расчетная программа «Ударный импульс 2.0»

Интерфейс программы «Ударный импульс 2.0» состоит из двух вкладок, которые логически разделяют этапы работы:

I. *Проект бойка*. На данной вкладке происходит моделирование ударника, для удобства ее область разбита на две логические части, где разделены вводимые и расчетные параметры бойка (рис. 3.2.2.1):

1. *Расчетные параметры бойка* – элемент программного окна, предназначенный для ввода параметров ударника и ударного процесса с клавиатуры.
2. *Эскиз бойка* – элемент программного окна, предназначенный для построения эскиза бойка и вывода численных значений расчетных параметров ударника и ударного процесса.

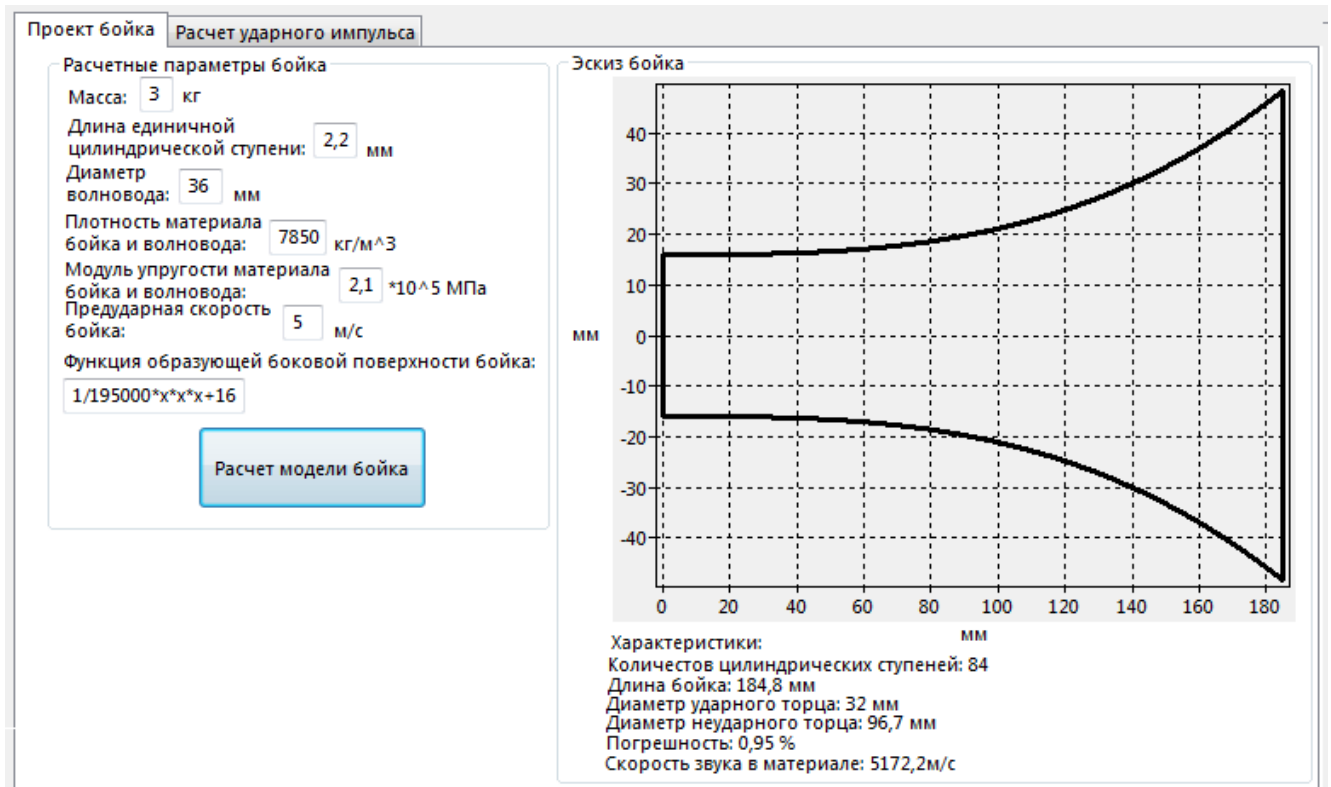


Рис. 3.2.2.1 Вкладка «Проект бойка» программы «Ударный импульс 2.0»

II. *Расчет ударного импульса*.^{*} Здесь происходит расчет ударного импульса и его характеристик от смоделированного бойка. Для удобства область вкладки разбита на две логические части (рис. 3.2.2.2):

^{*} Данная вкладка во всех программах комплекса совершенно одинакова, поэтому ее описание и внешний вид приводится только при рассмотрении первой программы комплекса «Ударный импульс 2.0»

1. *Расчет и построение ударного импульса* - элемент программного окна, предназначенный для расчета и построения графика ударного импульса.
2. *Параметры ударного импульса* – элемент программного окна, предназначенный для вывода численных значений параметров рассчитанного ударного импульса.

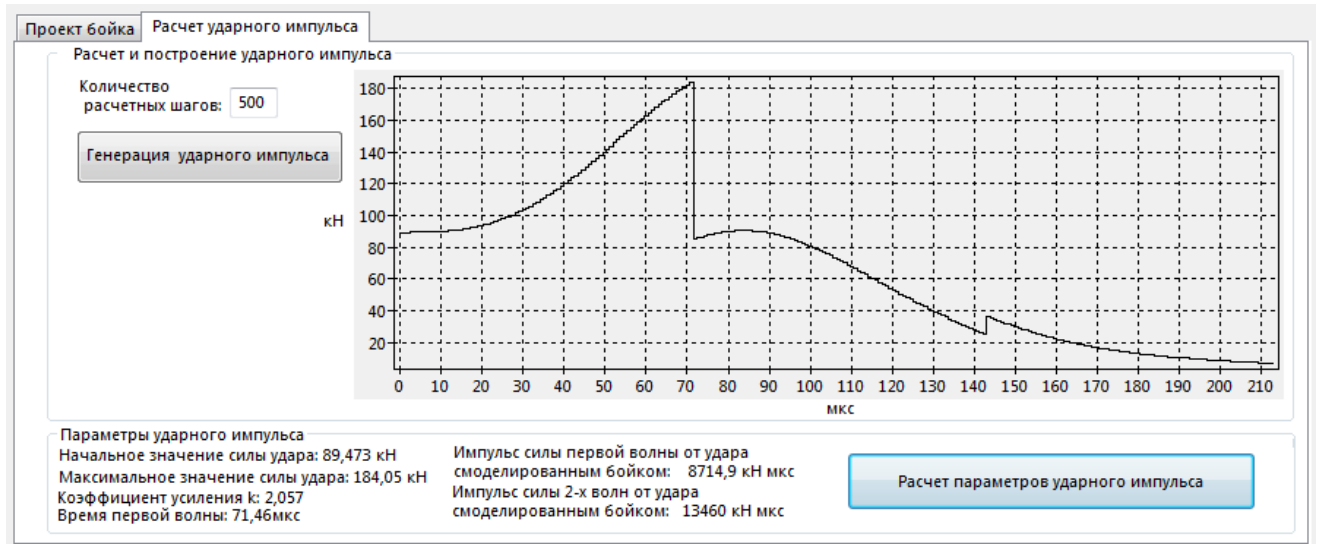


Рис. 3.2.2.2 Вкладка «Расчет ударного импульса» (общая для всех программ комплекса)

3.2.3 Расчетная программа «Удар многоступенчатым бойком»

Интерфейс программы «Удар многоступенчатым бойком» состоит из двух вкладок, которые логически разделяют этапы работы:

1. *Проект бойка*. На данной вкладке происходит моделирование ударника, для удобства ее область разбита на две логические части, где происходит разделение вводимых и расчетных параметров ударника (рис. 3.2.3.1):
 1. *Расчетные параметры бойка* – элемент программного окна, предназначенный для ввода параметров ударника и ударного процесса с клавиатуры.
 2. *Эскиз бойка* – элемент программного окна, предназначенный для построения эскиза бойка и вывода численных значений расчетных параметров ударника и ударного процесса.

II. *Расчет ударного импульса.* Данная вкладка во всех программах комплекса идентична, ее описание и внешний вид приведен при рассмотрении программы «Ударный импульс 2.0» (раздел 3, п. 3.2.2).

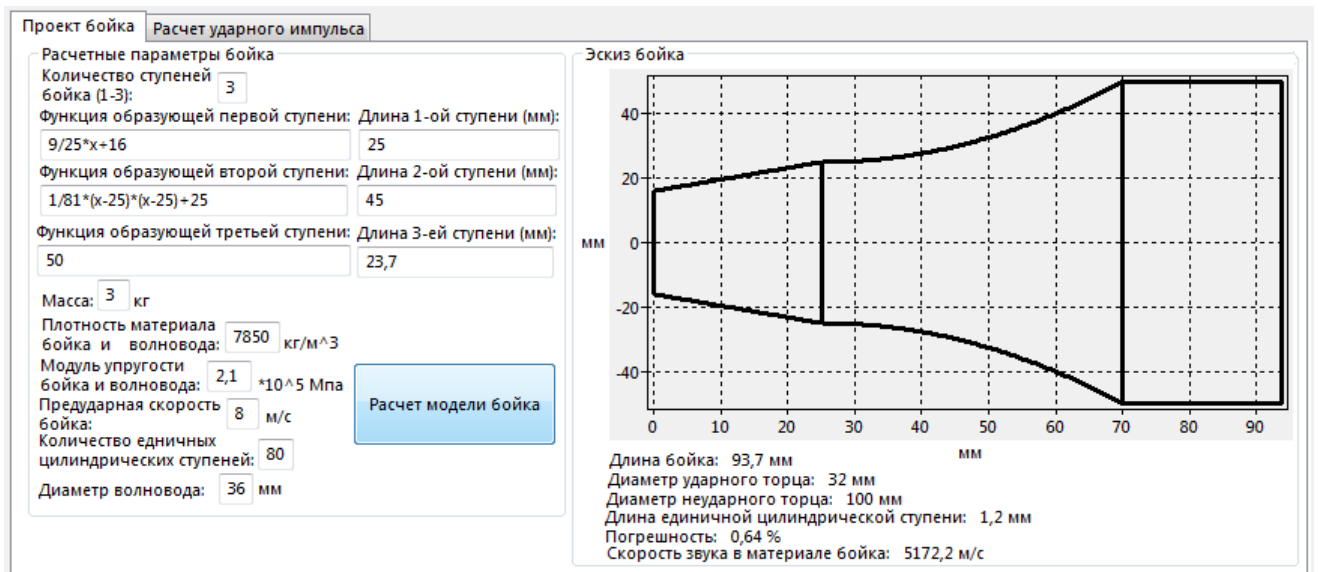


Рис. 3.2.3.1 Вкладка «Проект бойка» программы «Удар многоступенчатым бойком»

3.2.4 Расчетная программа «Удар бойком сложной геометрической формы»

Интерфейс программы «Удар бойком сложной геометрической формы» состоит из двух вкладок, которые логически разделяют этапы работы:

I. *Проект бойка.* На данной вкладке происходит моделирование ударника, для удобства ее область разбита на две логические части, где происходит разделение вводимых и расчетных параметров ударника (рис. 3.2.4.1):

1. *Расчетные параметры бойка* – элемент программного окна, предназначенный для ввода параметров ударника и ударного процесса с клавиатуры, а также для определения местонахождения файла, содержащего параметры смоделированного в стороннем приложении ударника.
2. *Эскиз бойка* – элемент программного окна, предназначенный для построения эскиза приведенного бойка и вывода численных значений расчетных параметров ударника и ударного процесса.

II. *Расчет ударного импульса.* Данная вкладка во всех программах комплекса идентична, ее описание и внешний вид приведены при рассмотрении программы «Ударный импульс 2.0» (раздел 3, п. 3.2.2).

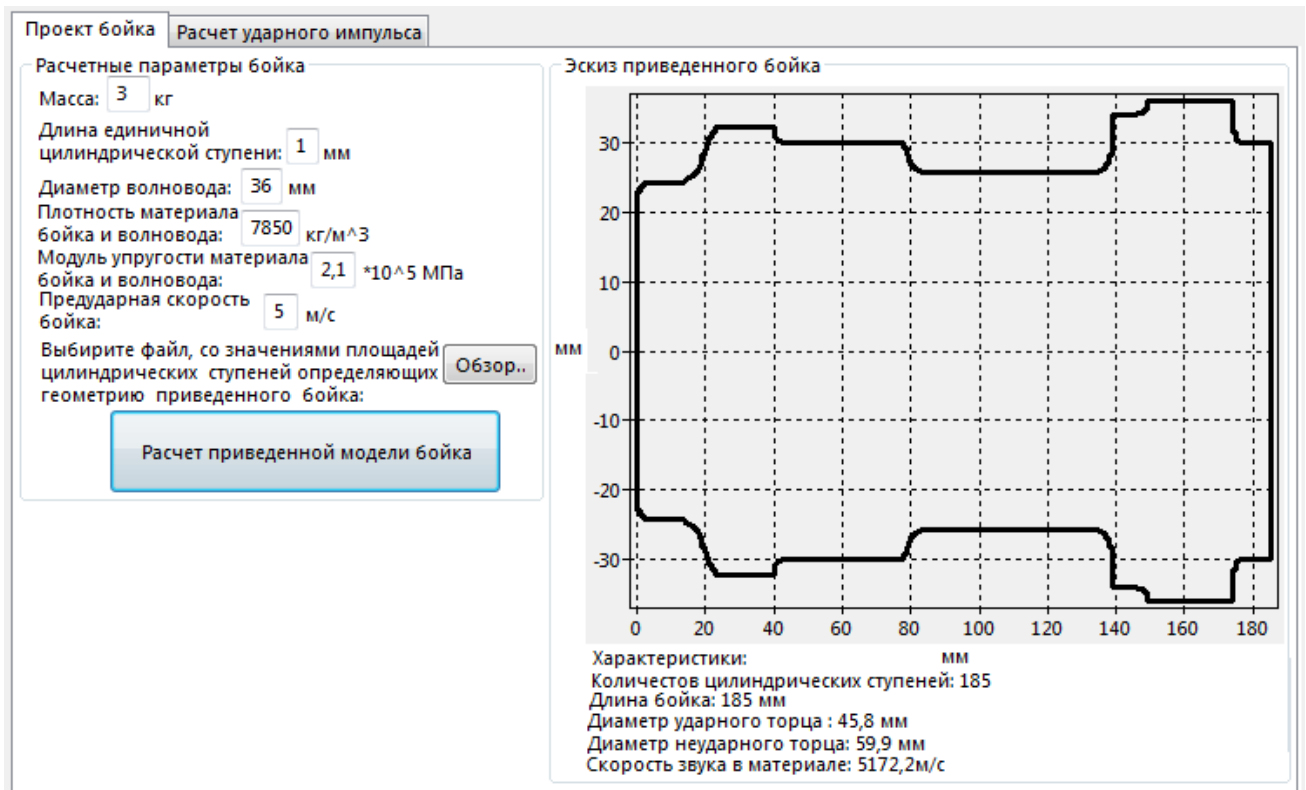


Рис. 3.2.4.1 Вкладка «Проект бойка» программы «Удар бойком сложной геометрической формы»

3.3 Сравнительный анализ теоретических результатов расчета ударных импульсов, генерируемых бойками различных форм

Для проверки достоверности результатов, получаемых при использовании разработанного комплекса программ, был произведен ряд расчетов, результаты которых были сопоставлены с ранее полученными теоретическими зависимостями. Для простоты расчетов в каждом случае ограничимся определением первой волны ударного импульса.

3.3.1 Удар цельнотельным бойком, выполненным в виде тела вращения простой линии вокруг геометрической оси ударника

3.3.1.1 Цилиндрический боек постоянного сечения (классическая задача теории удара)

Решение относится к классической задаче, базирующейся на теории Сен-Венана для случая ударного контакта бойка с волноводом всей соприкасающейся поверхностью [129]. *Постановка задачи:* удар наносится однородным ударником массой 3 кг правильной цилиндрической формы постоянного сечения диаметром 32 мм, изготовленного из стали (плотность 7800 кг/м³; модуль упругости 210 ГПа), движущегося с предударной скоростью 5 м/с. Удар производится по стальной, однородной, полубесконечной штанге равного с ударником постоянного сечения. Решение этой задачи представлено в таблице 3.3.1.1.1.

Таблица 3.3.1.1.1 – Определение ударного импульса от бойка цилиндрической формы

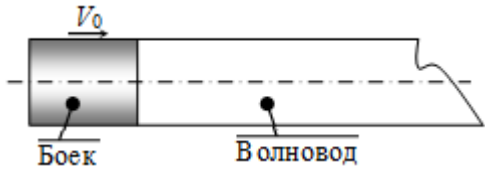

Исходные данные	Масса: $m=3$ кг; диаметр ударника: $d = 32$ мм; диаметр волновода: $d_0=32$ мм; длина бойка: $L=479$ мм; Плотность материала бойка и волновода (сталь): $\rho=7800$ кг/м ³ ; Модуль упругости материала бойка и волновода (сталь): $E=210$ ГПа; Предударная скорость бойка: $V_0=8$ м/с.	
Схема ударной системы		
Внешний вид ударного импульса (аналитическое решение)		
Параметры ударного импульса (аналитическое решение)	Амплитуда ударного импульса: $F_0 = F_{max} = \frac{ESV_0}{2a},$ с учетом подстановки известных значений: $F_0 = F_{max} = \frac{\pi d^2 V_0 \sqrt{E\rho}}{8}$	Численное значение амплитуды ударного импульса: $F_0 = F_{max} = 130,13$ кН

Таблица 3.3.1.1.1 – Определение ударного импульса от бойка цилиндрической формы (продолжение таблицы)

	<p>Длительность первой волны ударного импульса:</p> $t_I = \frac{2L}{a},$ <p>с учетом подстановки известных значений:</p> $t_I = 2L\sqrt{\frac{\rho}{E}}$	<p>Численное значение длительности первой волны ударного импульса:</p> $t_I = 184,6 \text{ мкс}$
<p>Сравнение ударных импульсов аналитического, выполненного в Maple-14 (пунктир) и численного, выполненного в программе: «Ударный импульс 2.0» (сплошная линия)</p>		
<p>Параметры ударного импульса (численный расчет в программе «Ударный импульс 2.0»)</p>	<p>Численное значение амплитуды ударного импульса:</p> $F_0 = F_{\max} = 127,72 \text{ кН}$ <p>Численное значение длительности первой волны ударного импульса:</p> $t_I = 185 \text{ мкс}$	
<p>Погрешность расчета</p>	<p>Относительная погрешность расчета амплитуды ударного импульса:</p> $\varepsilon_F = 1,85\%$ <p>Относительная погрешность расчета длительности первой волны ударного импульса:</p> $\varepsilon_{t_I} = 0,33\%$	

3.3.1.2 Конический боек равнопеременного сечения

Аналитическое решение, рассчитывающее ударный импульс, генерируемый бойком этого вида, выполнено в 70-х годах XX века Л.Т. Дворниковым и И.-И.Д. Шапошниковым для случая ударного контакта бойка с волноводом всей соприкасающейся поверхностью [130]. *Постановка задачи:* удар наносится однородным ударником массой 3 кг, выполненным в виде тела вращения равнопеременного сечения (диаметр ударного торца 32 мм, неударного - 92 мм), изготовленного из стали (плотность 7800 кг/м³; модуль упругости 210 ГПа),

движущегося с предупредной скоростью 8 м/с. Удароприемником (волноводом) является однородная, стальная, полубесконечная штанга диаметром равным диаметру ударного торца бойка. Решение этой задачи представлено в таблице 3.3.1.1.2.

Таблица 3.3.1.2.1- Определение ударного импульса от конического бойка равнопеременного сечения


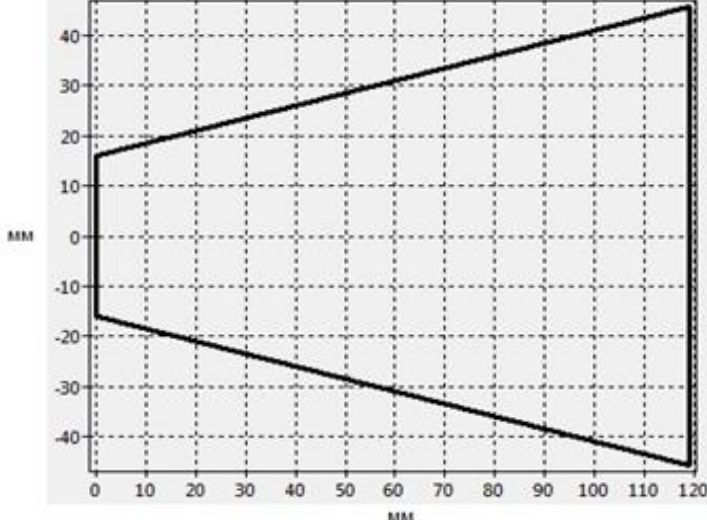
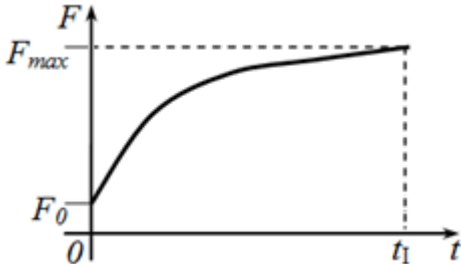
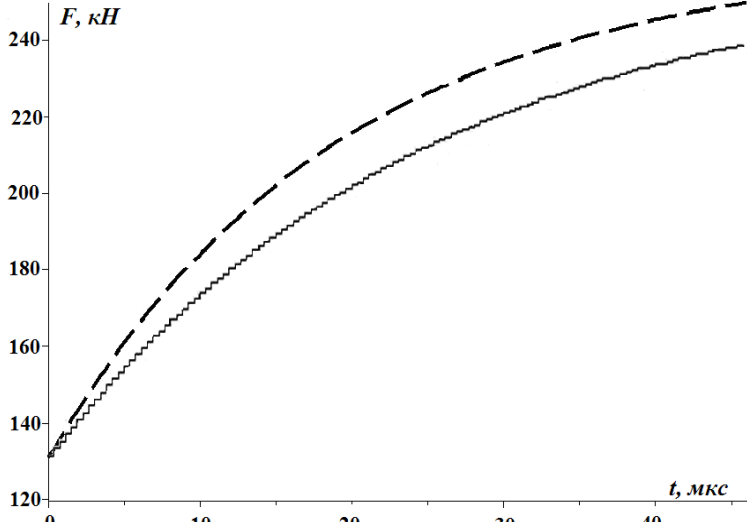
Исходные данные	<p>Масса: $m = 3\text{кг}$; Диаметр ударного торца бойка: $d_1 = 32\text{мм}$; Диаметр неударного торца бойка: $d = 92\text{мм}$; Диаметр волновода: $d_0=32\text{мм}$; длина бойка: $L=119\text{мм}$; Плотность материала бойка и волновода (сталь): $\rho=7800\text{кг/м}^3$; Модуль упругости материала бойка и волновода (сталь): $E=210\text{ГПа}$; Предварная скорость бойка: $V_0=8\text{м/с}$.</p>
Схема ударной системы	 <p>Схема ударной системы. На рисунке изображены конический боек (слева) и цилиндрический волновод (справа). Боек движется со скоростью V_0 вправо. Диаметр ударного торца бойка обозначен как d_1, а диаметр неударного торца как d. Диаметр волновода обозначен как d_0. Длина бойка обозначена как L. Материал бойка и волновода обозначен как сталь.</p>
Моделирование ударника численным методом в программе «Ударный импульс 2.0»	<p>Характеристики: Количество цилиндрических ступеней: 119 Длина бойка: 119мм Диаметр ударного торца: 32,3 мм Диаметр неударного торца: 91,5мм Погрешность: 0,47% Скорость звука в материале: 5172,2 м/с</p>
	<p>Эскиз бойка:</p>  <p>Эскиз бойка. На графике показана зависимость диаметра (мм) от длины (мм). Диаметр увеличивается от 32,3 мм при длине 0 мм до 91,5 мм при длине 119 мм.</p>

Таблица 3.3.1.2.1- Определение ударного импульса от конического бойка равнопеременного сечения (продолжение таблицы)

<p>Внешний вид ударного импульса (схематическое представление аналитического решения)</p>	 <p>Важным фактом является то, что F_{\max} достигается в момент окончания первой волны импульса.</p>	
<p>Функция, рост амплитуды в первой волне сгенерированного импульса (аналитическое решение)</p>	$F(t) = 2F_0 \left(1 - \frac{1}{r+1} e^{-\frac{2r^2}{3(r+1)(n^2-1)} \frac{t}{t_1}} \right),$ <p>где: $F_0 = \frac{\pi d_1^2 V_0}{2} \sqrt{\frac{\rho}{E}}$; $r = \frac{d_1}{d_0}$ (в данной задаче равно 1); $n = \frac{d}{d_1}$, в данной задаче равно 2,9; $t_1 = 2L \sqrt{\frac{\rho}{E}}$, в данной задаче равно 46 мкс.</p>	
<p>Сравнение ударных импульсов аналитического, выполненного в Maple-14 (пунктир) и численного, выполненного в программе: «Ударный импульс 2.0» (сплошная линия)</p>		
<p>Сравнение аналитического и численного решения (численные значения)</p>	<p>Аналитическое решение</p> <p>$F_0 = 130 \text{ кН};$ $F_{\max} = 249 \text{ кН};$ $t_1 = 46 \text{ мкс};$</p>	<p>Численное решение</p> <p>$F_0 = 129 \text{ кН};$ $F_{\max} = 236 \text{ кН};$ $t_1 = 46 \text{ мкс};$</p>
<p>Погрешность расчета</p>	<p>Среднее значение относительной погрешности (определенной по выборке из 11 точек) равно: 6%.</p>	

3.3.1.3 Полукатенoidalный боек переменного сечения

Аналитическое и численное решения, рассчитывающие ударный импульс, генерируемый бойком этого вида, были выполнены И.А. Жуковым и Л.Т. Дворниковым [131]. Они сопровождаются не только расчетом ударного импульса, но и моделированием бойка. Это позволяет легко оценить погрешность результатов вычислений полученных при использовании описанного выше комплекса программ, без анализа аналитического решения данной задачи.

Постановка задачи: удар наносится однородным ударником массой 3кг цилиндрической формы переменного сечения (диаметр ударного торца 32 мм, неударного - 242 мм), изготовленного из стали (плотность 7800 кг/м³; модуль упругости 210 ГПа), движущегося с предупдарной скоростью 8 м/с. Удароприемником (волноводом) является однородная, стальная, полубесконечная штанга диаметром равным диаметру ударного торца бойка. Решение данной задачи будет состоять из двух частей: 1) моделирование ударника; 2) расчет и анализ ударного импульса. Для удобства обе части решения оформим в виде таблиц (3.3.1.3.1 и 3.3.1.3.2).

Таблица 3.3.1.3.1- Моделирование бойка с образующей, заданной цепной линией (катеной)

Моделирование ударника	
<p><i>Аналитический подход:</i></p> <p>Масса: 3 кг Плотность материала бойка и волновода: $\rho=7850\text{кг/м}^3$ Диаметр ударного торца: $d_1=32\text{мм}$ Длина бойка: $l=43\text{мм}$ Диаметр неударного торца: $d=242\text{ мм}$</p>	<p><i>Численный метод:</i> (реализован в программе «Ударный импульс 2.0») Масса: 3кг Плотность материала бойка и волновода: $\rho=7850\text{кг/м}^3$ Диаметр ударного торца: $d_1=32\text{мм}$ Длина бойка: $l= 43,4\text{мм}$ Диаметр неударного торца: $d= 242\text{мм}$</p>
<p>Диаметр волновода: $d=32\text{мм}$ Функция, задающая образующую ударника: $y = 16ch \frac{x}{16}$ Количество расчетных цилиндрических ступеней: 43 шт.</p>	<p>Диаметр волновода: $d=32\text{мм}$ Функция, задающая образующую ударника: $y = 8(\exp(\frac{x}{16}) + \exp(-\frac{x}{16}))$ Количество расчетных цилиндрических ступеней: 217 шт.</p>

Таблица 3.3.1.3.1- Моделирование бойка с образующей, заданной цепной линией (катеной) (продолжение таблицы)

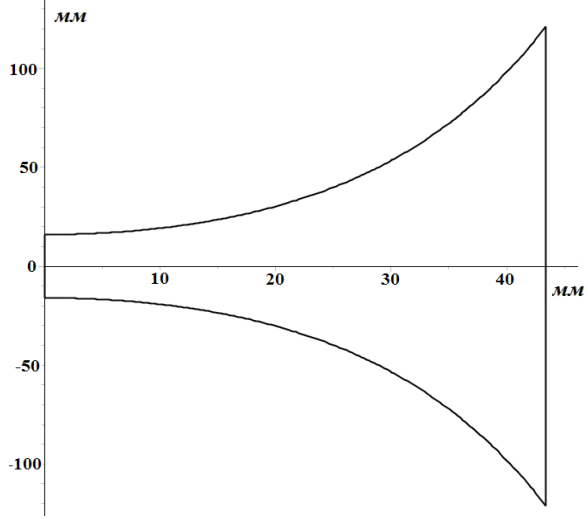
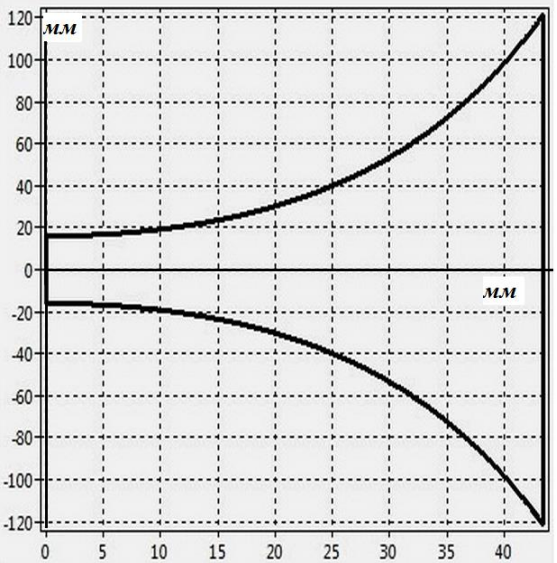
<p>Длина одной расчетной цилиндрической ступени: $l_1=1\text{мм}$</p>	<p>Длина одной расчетной цилиндрической ступени: $l_1=0,2\text{мм}$ Погрешность моделирования, заложенная алгоритм: $\varepsilon=0,11\%$ Погрешность расчета длины бойка: $\varepsilon_l=1\%$</p>
<p>Внешний вид модели ударника, выполненной в декартовой системе координат (длины по осям указаны в мм)</p> 	<p>Внешний вид модели ударника, выполненной в декартовой системе координат (длины по осям указаны в мм)</p> 

Таблица 3.3.1.3.2 - Определение ударного импульса от бойка с образующей, заданной цепной линией (катеной)

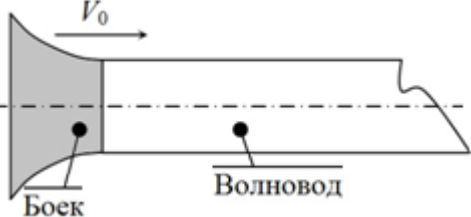
Расчет и анализ ударного импульса	
Исходные данные	<p>Масса: $m = 3\text{кг}$; Диаметр ударного торца бойка: $d_1 = 32\text{мм}$; Диаметр неударного торца бойка: $d = 242\text{мм}$; Диаметр волновода: $d_0=32\text{мм}$; Длина бойка: $L=43,4\text{мм}$; Плотность материала бойка и волновода (сталь): $\rho=7800\text{кг/м}^3$; Модуль упругости материала бойка и волновода (сталь): $E=210\text{ГПа}$; Предударная скорость бойка: $V_0=8\text{м/с}$.</p>
Схема ударной системы	

Таблица 3.3.1.3.2 - Определение ударного импульса от бойка с образующей, заданной цепной линией (катеной) (продолжение таблицы)

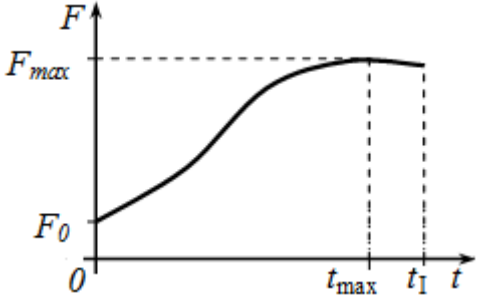
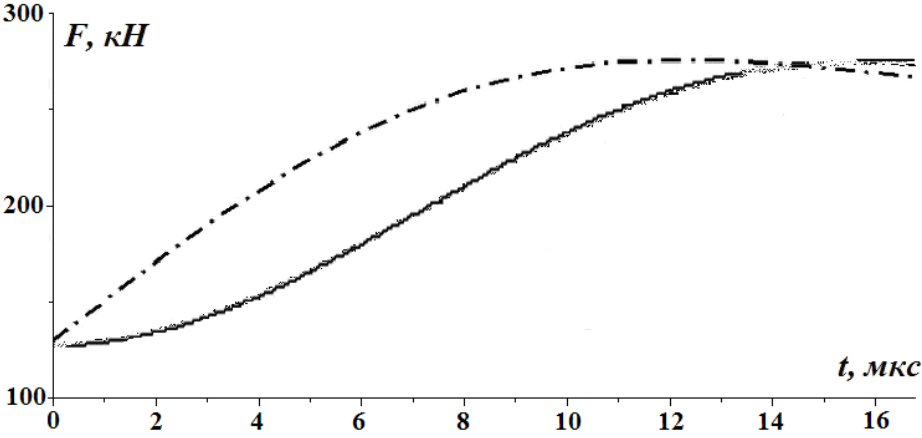
<p>Внешний вид ударного импульса (схематическое представление аналитического решения)</p>	 <p>Важным фактом является то, что F_{max} достигается до момента окончания первой волны импульса.</p>
<p>Функция, рост амплитуды в первой волне сгенерированного импульса (аналитическое решение)</p>	$F(t) = \frac{ES_0V_0}{c} \left[1 - \frac{1}{2} cth \frac{L}{a} J_1\left(\frac{ct}{a}\right) + \frac{J_0\left(\frac{ct}{a}\right)}{4sh^2 \frac{L}{a}} - \frac{ct h^2 \frac{2L}{a}}{2a th \frac{L}{a}} \right]$ $\int_0^{ct} \left(J_0\left(\frac{U}{a}\right) e^{\frac{ct U}{a sh^2 \frac{2L}{a}}} \right) dU - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{sh^2 \frac{L}{a}} \right) e^{\frac{ct}{a sh^2 \frac{2L}{a}}} J_1$ <p>где: S_0 – площадь ударного торца волновода (по условию задачи равна площади ударного торца бойка); $a = \frac{d_0}{2}$ - параметр катены; $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ - скорость звука в материале бойка и волновода; J_0 – функция Бесселя 1-го рода нулевого порядка, J_1 – функция Бесселя 1-го рода первого порядка, при условии, что $t \in [0; \frac{2L}{c}]$.</p>
<p>Сравнение импульсов: 1) Аналитического, решение в программе MAPLE 14 (точка – тире); 2) численно-аналитического, решение в программе MAPLE 14 (пунктир) 3) Численного, решение в программе «Ударный импульс 2.0» (сплошная линия)</p>	 <p>Важно: решения, выполненные численно-аналитическим и численными методами совпадают (линии графиков лежат друг на друге)</p>

Таблица 3.3.1.3.2 - Определение ударного импульса от бойка с образующей, заданной цепной линией (катеной) (продолжение таблицы)

Сравнение численно-аналитического и численного решения (численные значения контрольных точек)	Аналитическое	Численно-аналитическое и численное решение
	$F_0=132\text{кН};$ $F_{\max}=277\text{кН};$ $t_{\max}=12,28\text{мкс}$ $t_I=16,9\text{мкс};$	$F_0=128\text{кН};$ $F_{\max}=273\text{кН};$ $t_{\max}=15,83\text{мкс}$ $t_I=16,9\text{мкс};$
Погрешность расчета	Среднее значение относительной погрешности (определенной по выборке из 17 точек) равно: 12%.	

3.3.2 Удар бойком, выполненным в виде тела вращения составной линии вокруг геометрической оси ударника

3.3.2.1 Боек отбойного пневматического молотка

На практике, для обеспечения бесперебойной работы ударного механизма его боек должен быть обязательно центрирован. Для этого в конструкцию ударника вводят дополнительные ступени, которые позволяют удерживать ось бойка в заданном направлении. Для примера, рассмотрим ударник отбойного молотка МО-1Б (рис. 3.3.2.1.1-а), серийно выпускаемого Томским электромеханическим заводом им. Вахрушева (ТЭМЗ).



Рис. 3.3.2.1.1 а) Внешний вид отбойного молотка МО-1Б; б) Ударник отбойного молотка МО-1Б

Ударник данного бетонолома изготовлен из стали ($\rho=7850$ кг/м³, $E=2100$ ГПа) в виде цельного тела вращения массой 0,43 кг, состоящего из трех ступеней (рис. 3.3.2.1.1-б). Две ступени выполнены в виде цилиндров правильной геометрической формы постоянного сечения, осуществляющих центрирование бойка в процессе работы.

Для анализа ударного импульса, с целью последующей модернизации, боек моделируется программе «Удар многоступенчатым бойком». При этом допускаются следующие допущения: не учитываются фаска на малой цилиндрической ступени и желоба для уплотнительных колец на большой. Параметры модели ударника указаны на схеме, представленной на рис. 3.3.2.1.2.

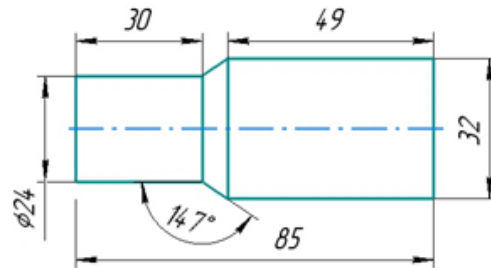


Рис. 3.3.2.1.2 Чертеж бойка от отбойного молотка МО-1Б

Образующая ударника в данном случае является составной линией, заданной тремя простыми функциями вида $f(x)$ (3.3.2.1.1). Проект бойка представлен на рисунке 3.3.2.1.3. Массовая погрешность моделирования бойка составила 3,5%.

$$y = \begin{cases} 12, [0;30); \\ \frac{4}{6}(x-30)+12, [30,36); \\ 16, [36;85]. \end{cases} \quad 3.3.2.1.1$$

Вид первой волны ударного импульса от смоделированного бойка показан на рисунке 3.3.2.1.4.

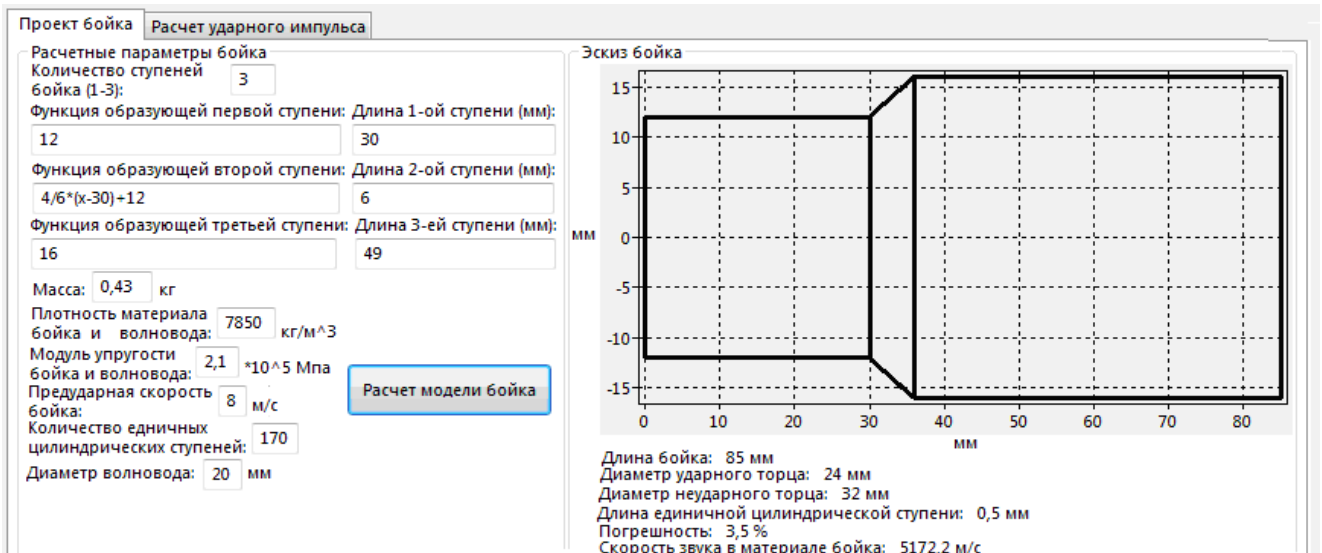


Рис. 3.3.2.1.3 Проект модели серийного ударника отбойного молотка МО-1Б, выполненный в программе «Удар многоступенчатым бойком»

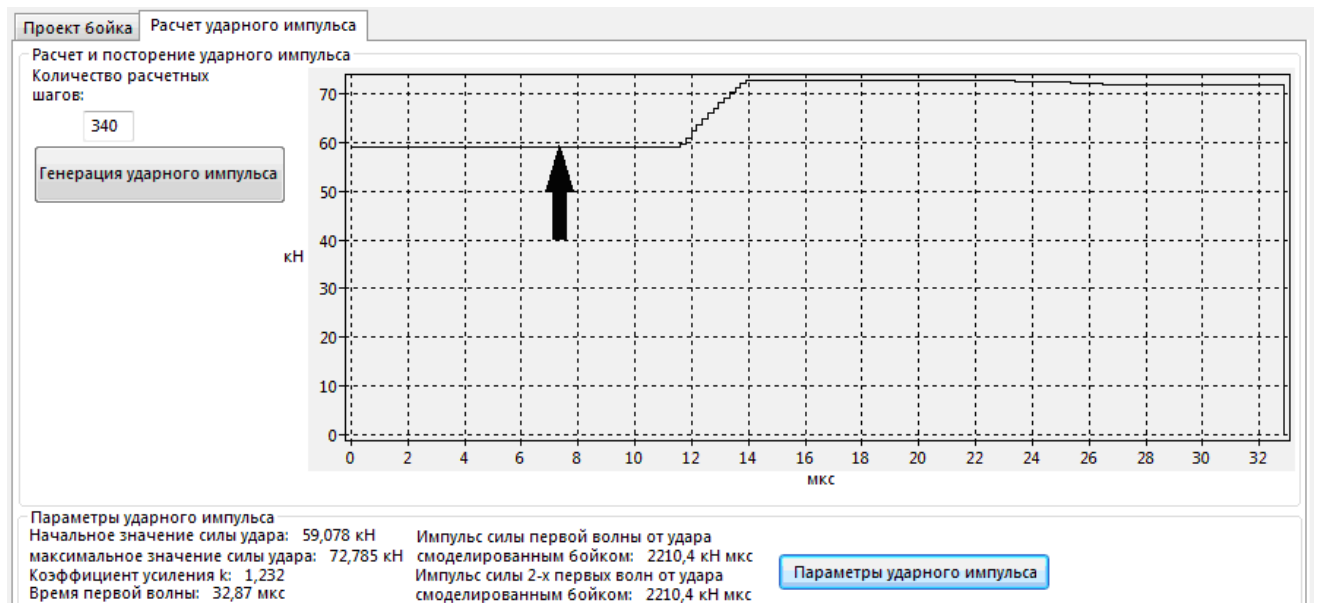


Рис. 3.3.2.1.4 Ударный импульс, генерируемый серийным бойком отбойного молотка МО-1Б

3.3.2.2 Модернизация бойка отбойного пневматического молотка

Исходя из того, что величина силы ударного импульса должна увеличиваться пропорционально росту силы сопротивления со стороны обрабатываемого объекта (открытие №13 СССР, Е.В. Александров), получается, что горизонтальный участок импульса (стрелка на рисунке 3.3.2.1.4) негативно

сказывается на передаче энергии к объекту воздействия. Для исключения этого форму бойка необходимо изменить таким образом, чтобы амплитуда импульса, им генерируемого, имела плавный рост.

Ресурсы расчетной программы «Удар многоступенчатым бойком» позволили видоизменить форму ударника, чтобы она удовлетворяла описанным выше критериям. Боек трансформировался в двухступенчатый с образующей, состоящей из двух функций вида $f(x)$ (3.3.2.2.1). Проект данного ударника представлен на рисунке 3.3.2.2.1. Массовая погрешность моделирования составила 0,15%.

$$y = \begin{cases} \frac{1}{7770}x^3 + 10, [0;36); \\ 16, [36;49] \end{cases} \quad (3.3.2.2.1)$$

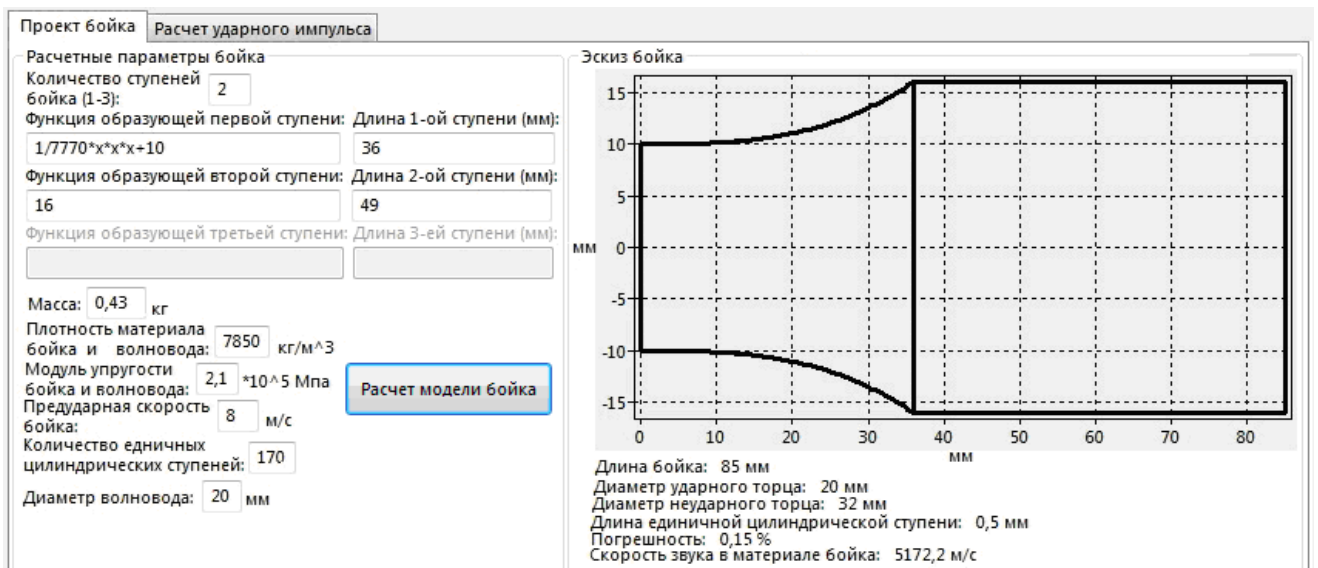


Рис. 3.3.2.2.1 Проект модифицированного двухступенчатого ударника для отбойного молотка МО-1Б

Так как не изменилась длина ударника и его масса, следовательно, сохранилась длина хода бойка внутри инструмента, что не изменяет предупредной скорости и энергии удара.

Вид первой волны ударного импульса, генерируемого смоделированным модифицированным бойком, показан на рисунке 3.3.2.2.2. Из сравнения ударных импульсов исходного и модифицированного ударников видно, что желаемый

результат был достигнут. Плавное нарастание силы удара (стрелка на рис. 3.3.2.2.2) позволяет более эффективно использовать генерируемую ударную энергию. Увеличение коэффициента геометрического усиления связано с уменьшением площади ударного торца бойка. Следует отметить, что новая форма бойка не внесет существенных изменений в конструкцию ударного механизма.

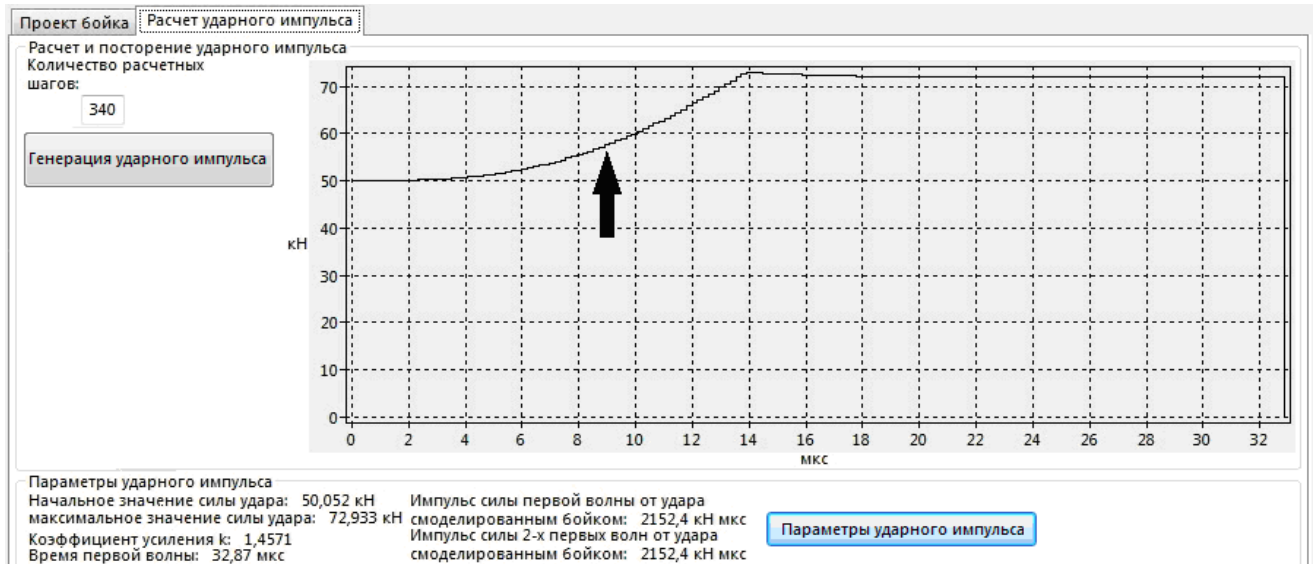


Рис. 3.3.2.2.2 Ударный импульс, генерируемый модифицированным бойком

3.3.3 Удар бойком, выполненным в виде тела сложной геометрической формы

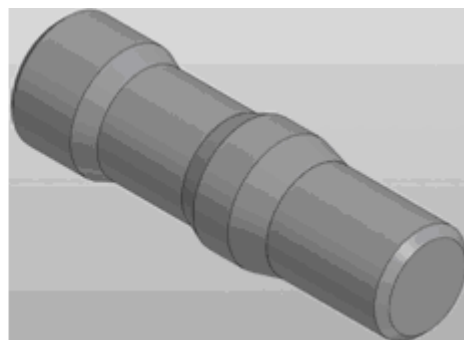
3.3.3.1 Сложный боек пневматического отбойного молотка

Для примера ударный импульс от ударника отбойного пневматического молотка МО-6П, рисунок 3.3.3.1.1-А. Ударник данного бетонолома представляет собой сложное цельное тело вращения, модель которого изображена на рис. 3.3.3.1.1-Б. Боек имеет массу 0,4 кг и изготовлен из стали ($\rho=7850\text{кг/м}^3$, $E=2100\text{МПа}$). С использованием ресурсов 3D-редактора *T-Flex*, по алгоритму, описанному выше (раздел 2 п. 2.2), боек рассекается 960 секущими плоскостями, расположенными на расстоянии 0,1 мм друг от друга, и определяются значения площадей полученных сечений (в данном случае это круги различного диаметра). Они записываются в текстовый файл, поступающий в программу «Удар бойком сложной геометрической формы», где производится расчет приведенной формы

бойка (рис. 3.3.3.1.2), определение ударного импульса и его параметров (рис. 3.3.3.1.3).



а)



б)

Рис. 3.3.3.1.1а) Внешний вид отбойного пневматического молотка МО-6П; б) ударник отбойного молотка МО-6П (модель выполнена в САД системе T-Flex)

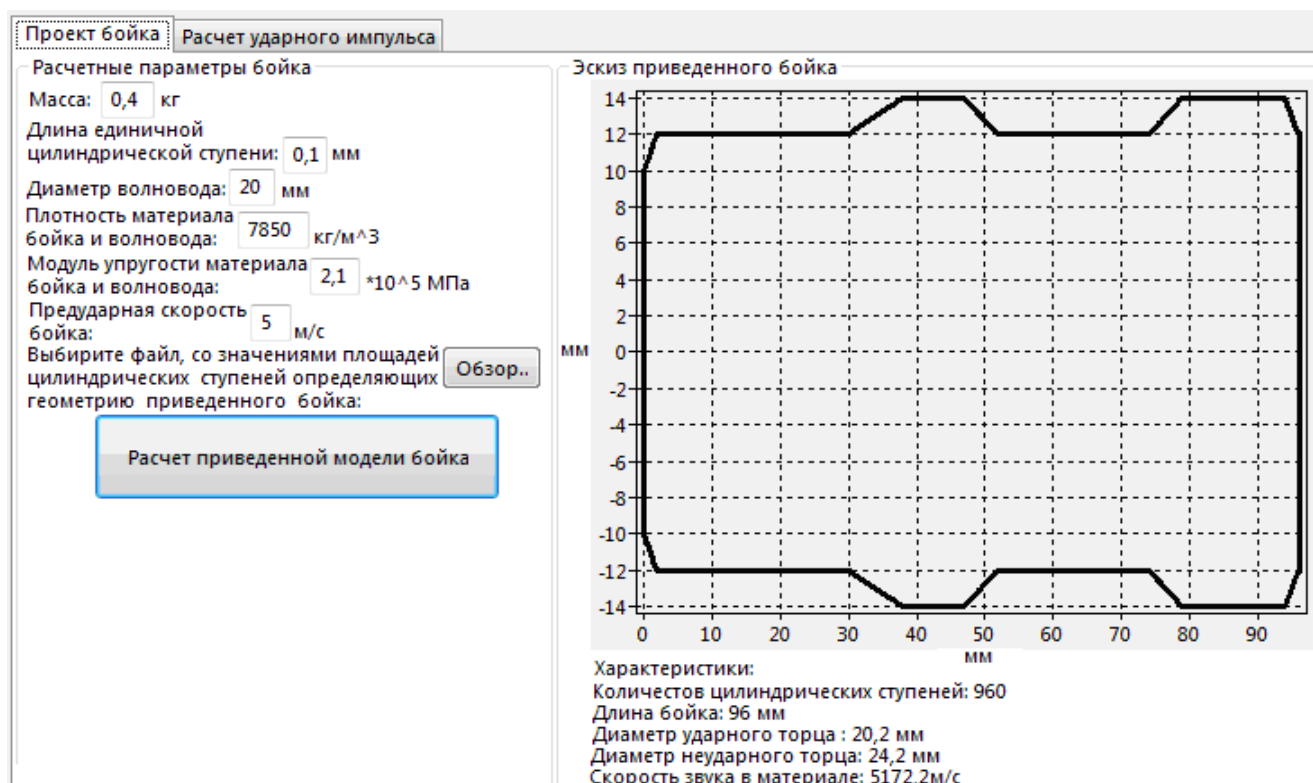


Рис. 3.3.3.1.2 Эскиз приведенной формы бойка от отбойного молотка МО-6П, выполненный в программе «Удар бойком сложной геометрической формы»

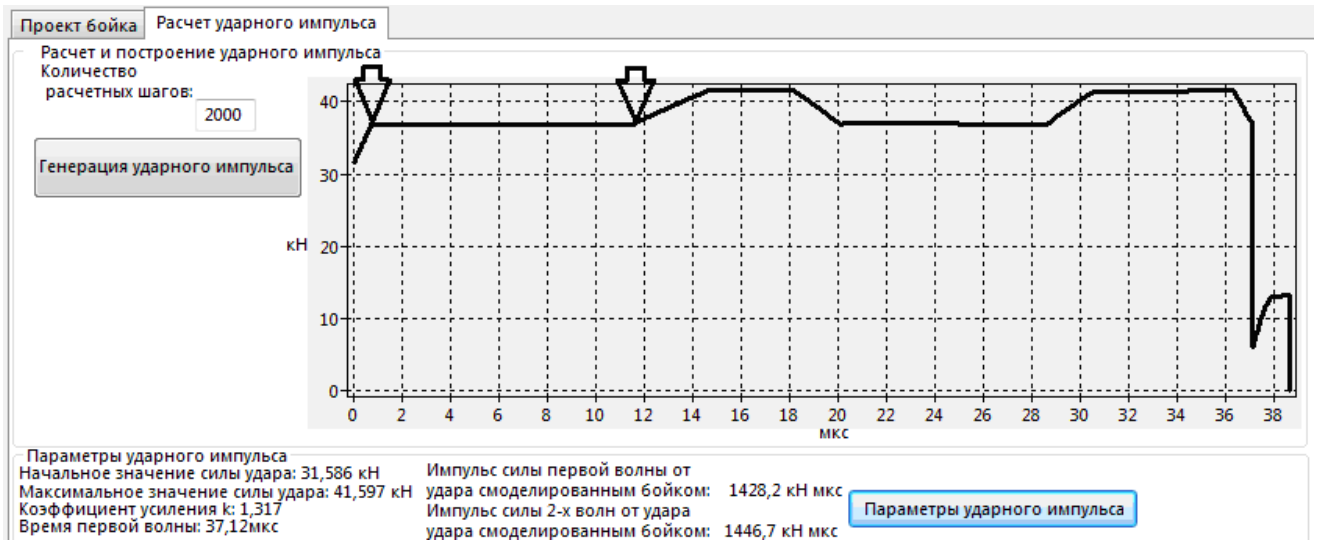


Рис. 3.3.3.1.3 Ударный импульс от серийного бойка отбойного молотка МО-6П, выполненный в программе «Удар бойком сложной геометрической формы»

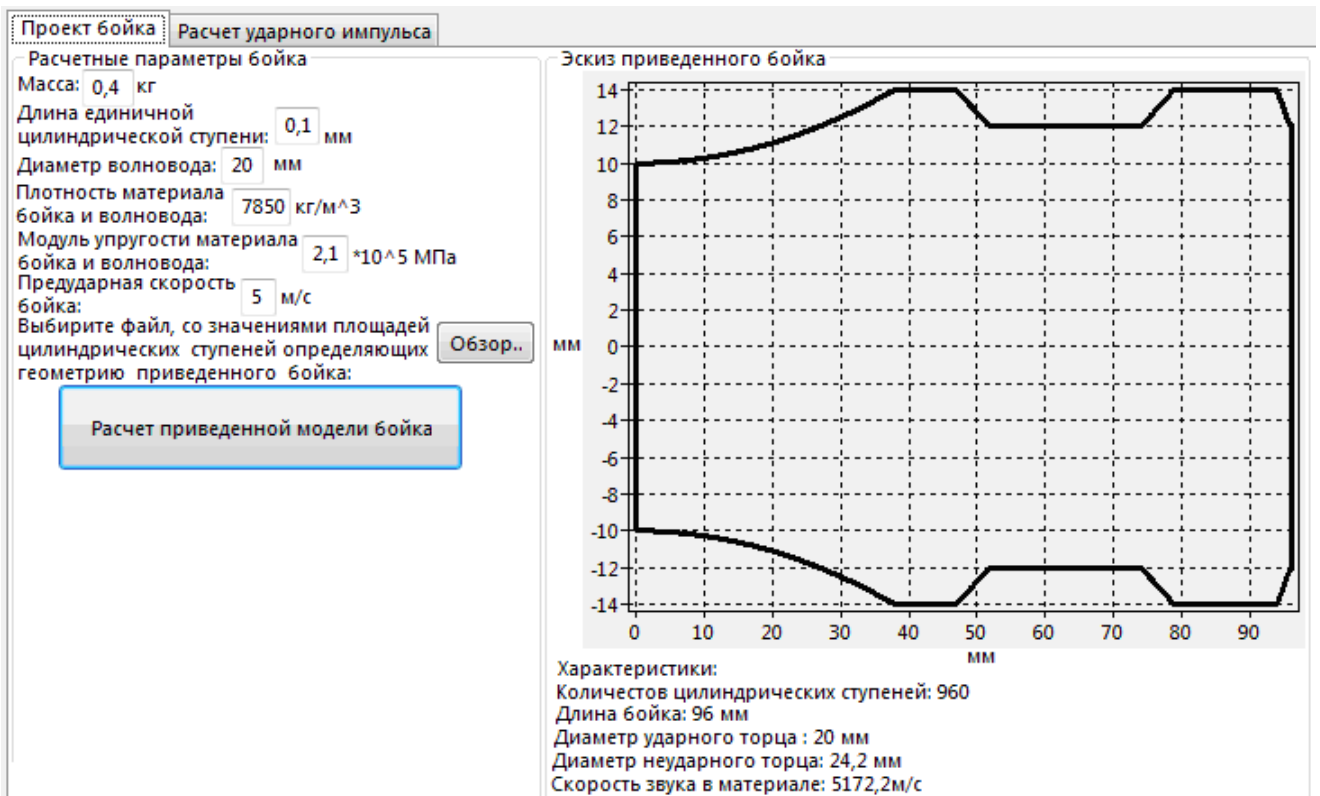


Рис. 3.3.3.1.4 Эскиз приведенной формы модернизированного бойка

Рост амплитуды ударного импульса от серийного бойка не является плавным и на участке от 0 – 12 мс имеет два излома (стрелки на рис. 3.3.3.1.3), данный факт негативно сказывается на передаче энергии к разрушаемому объекту, что приводит к ее отражению назад в машину. Для повышения

эффективности передачи энергии необходимо убрать эти изломы, обеспечив плавный рост амплитуды импульса. Поэтому передняя часть бойка, состоящая из трех ступеней (двух конических и одной цилиндрической), была заменена на новую. Эта ступень выполнена в виде тела вращения переменного сечения, образующая которого задана дугой окружности радиусом 182,5 мм (рис. 3.3.3.1.4).

В результате изменений, внесенных в геометрическую форму ударника, удалось изменить характер роста амплитуды ударного на промежутке от 0 – 12 мкс (рис. 3.3.3.1.5), что согласно теории удара приводит к повышению эффективности работы отбойного молотка.

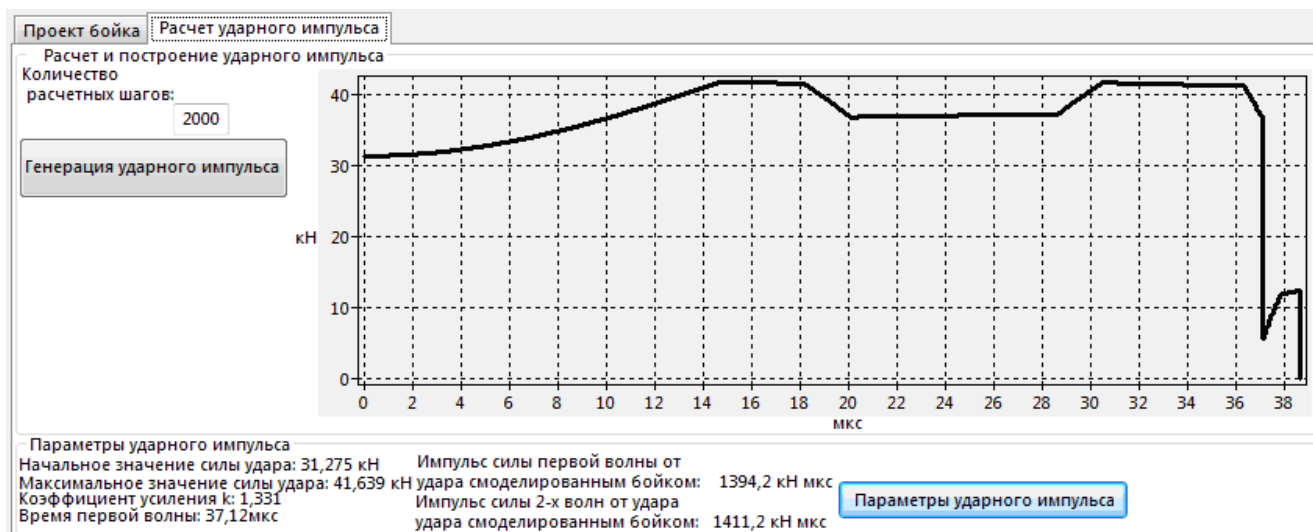


Рис. 3.3.3.1.5 Ударный импульс, генерируемый модернизированным бойком

3.3.3.2 Ударник погружного пневмоударника ИГД СОРАН

Оценка достоверности и точности разработанного численного метода расчета ударных импульсов в зависимости от геометрических параметров ударной системы, содержащей сложный ударник, производилась путем сопоставления результатов теоретических вычислений с экспериментальными данными, полученными в процессе исследования динамических процессов в погружной пневмоударной машине.

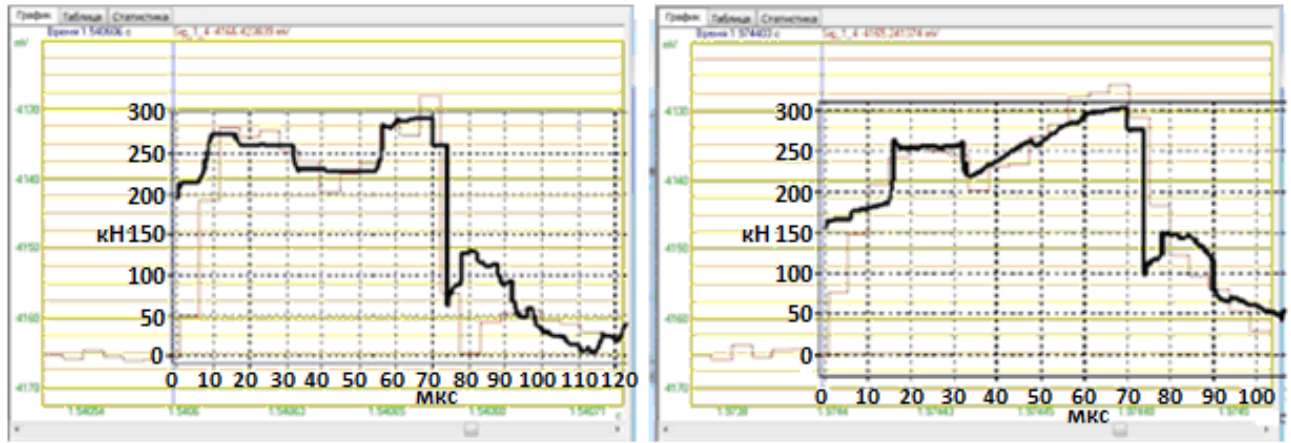
Конструкции наиболее распространенных на практике пневмоударников разработаны учеными Института горного дела Сибирского отделения Российской академии наук (г.Новосибирск). Одним из перспективных вариантов на сегодняшний день является модель *ПП 110 ЭН*. В рамках сотрудничества с Институтом была решена задача совершенствования конструкции ударного узла машины с целью повышения эффективности разрушения горной породы пневмоударником. На рисунке 3.3.3.2.1 приведены традиционно применяемый поршень-боек и его модернизированный вариант, в котором образующая свободных боковых поверхностей выполнена с применением цепной линии – катены.



Рис. 3.3.3.2.1 Опытные образцы бойков ПП 110 ЭН

Экспериментальное исследование проводилось на ударном вертикальном копре, конструкция которого позволяет производить бурение практически с любой энергией удара. В качестве измерительного прибора применялся цифро-аналоговый преобразователь *ZET 230*, осциллограммы ударных импульсов с которого фиксировались специализированным программным обеспечением *ZetLAB*. Масштаб получаемых осциллограмм определялся с помощью тарировочного прямоугольного импульса, генерируемого в штанге цилиндрическим бойком, равного с ней сечения.

На рис. 3.3.3.2.2 приведены осциллограммы ударных импульсов от старого (А) и нового (Б) бойков с наложенными на них теоретическими решениями, полученными в программе: «Удар бойком сложной геометрической формы».



а)

б)

Рис. 3.3.3.2.2. Теоретические и экспериментальные импульсы (сравнение путем наложения)

Результаты статистической обработки данных свидетельствуют о том, что теоретические и экспериментальные исследования имеют удовлетворительную сходимость. Погрешность результатов составляет $7,3 \pm 2,1\%$.

3.4 Сравнение комплекса программ с известными аналогами

Сравнения разработанного комплекса программ проведем с программными продуктами, моделирующими продольный удар в стержневых системах:

1. Программа «ModeRod01».

Описание: программа разработана для исследования распространения волн в неоднородном стержне, сгенерированными двумя способами: при действии постоянного давления на его торце; при ударе стержня о жесткую преграду.

2. Программа «Моделирование волновых процессов в ступенчатом стержне при действии постоянного давления на торце и последующим ударом о жесткую преграду».

Описание: программа разработана для исследования распространения волн, сгенерированных в однородных стержнях при соударении с абсолютно жесткой преградой.

3. Программа «Моделирование волновых процессов при ударе однородного стержня о жесткую преграду».

Описание: программа разработана для исследования волновых процессов в однородном стержне при внезапно возникающем давлении на его торце.

4. Открытая *maple*-процедура «Ударный импульс».

Описание: процедура предназначена для расчета ударного импульса, генерируемого в полубесконечном стержне постоянного сечения при ударе по ней бойком, представляющим собой сплошное тело вращения с образующей заданной одной или несколькими математическими функциональными зависимостями.

5. Авторский комплекс программ

Описание: программный комплекс предназначен для расчета ударного импульса, генерируемого полубесконечном стержне постоянного сечения при ударе по нему бойком любой сложной геометрической формы, описываемой как функциональными математическими зависимостями, так и трехмерной компьютерной моделью.

Программы 1-3 моделируют волновые процессы, возникающие в стержнях при нанесении удара, их основным недостатком является отсутствие стержневой системы вида: ударник – волновод.

Процедура 4 не позволяет моделировать ударники, имеющие: сложную форму боковой поверхности, внутренние отверстия не цилиндрической формы. Наряду с этим, процедура является собственностью математического приложения *Maple-14* и выполнена с открытым программным кодом, поэтому каждый новый расчет предусматривает изменения текста части программы.

Основной отличительной особенностью, разработанного программного комплекса, является возможность моделировать динамические процессы в стержневых системах с бойками, имеющими не только сложную форму боковую поверхность, но и внутренние полости с канавками, галтелями и т.д. При этом программы комплекса позволяют оперативно вносить корректировки в геометрическую форму простых бойков.

3.5 Выводы по разделу

1. На базе методов формирования численных моделей ударных узлов машин, содержащих бойки простой и сложной геометрических форм, написаны программные модули, автоматизирующие этот процесс.
2. На базе численного метода расчета ударного импульса от бойков любой геометрической формы написан программный модуль, позволяющий автоматизировать определение ударного импульса по элементам численной модели ударного узла машины.
3. Путем комбинирования программных модулей, формирующих численные модели ударных узлов машин, с программным модулем расчета ударного импульса создан комплекс кроссплатформенных инженерно-расчетных программ, позволяющих проводить расчет ударных импульсов в зависимости от геометрических параметров ударной системы.
4. Проведена оценка погрешности результатов вычислений, полученных с использованием комплекса программ, с теоретическими и экспериментальными исследованиями, которая показала удовлетворительную сходимость, что позволяет внедрить данный комплекс программ к применению на практике.

4 СИНТЕЗ ГЕОМЕТРИИ БОЙКОВ ДЛЯ УДАРНЫХ УЗЛОВ МАШИН В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СВОЙСТВ РАЗРУШАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

4.1 Постановка задачи синтеза и определение путей ее решения

При проектировании и совершенствовании машин ударного действия большое значение уделяется их прочности и долговечности. На эти параметры значительное влияние оказывает процесс восприятия горной породой энергии, идущей на ее разрушение. Данная энергия генерируется в ударном узле машины и передается к разрушаемому объекту в виде волнового импульса определенной формы, длительности и амплитуды. От характера роста амплитуды в импульсе (его формы) зависит коэффициент передачи энергии, переносимой импульсом к разрушаемому объекту. Известно, что для эффективного разрушения характер роста амплитуды импульса должен соответствовать характеру роста сил сопротивления среды при внедрении в нее инструмента (буровой коронки) [132]. Достигая этого соответствия, часть энергии, отраженной от объекта назад в машину, будет минимальной, что существенно снизит нагрузки на все элементы ударного механизма и продлит срок его службы. Ударный импульс, соответствующий этому критерию, называется *оптимальным ударным импульсом*.

В 2005 году на кафедре теории механизмов и машин СибГИУ профессором Л.Т. Дворниковым была сформулирована задача, получившая название: Синтез геометрии бойка ударного узла машины по физико-механическим свойствам разрушаемого объекта.

Решение задачи состоит из трех основных 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. Создание способа образования бойка, встраиваемого в корпус ударной машины, приведенная форма которого полностью совпадает с формой синтезированного ударника.

Итогом всей работы является проектирование бойка для ударного узла машины, который встраивается в ее корпус и в ходе работы генерирует оптимальный для данного разрушаемого объекта волновой импульс.

4.2 Оптимальный ударный импульс и его характеристики

Оптимальный ударный импульс начинается с некоторого определенного значения F_0 и изменяется с интенсивностью, соответствующей росту сил сопротивлений разрушаемого объекта при внедрении в него инструмента, заданной функциональной зависимостью вида $f(t)$ (рис. 4.2.1).

Его математической моделью является функция вида:

$$F(t) = f(t) + F_0, \quad (4.2.1)$$

с областью определения, ограниченной промежутком: $[0; t_1]$, t_1 – промежуток времени равный длительности первой волны импульса.

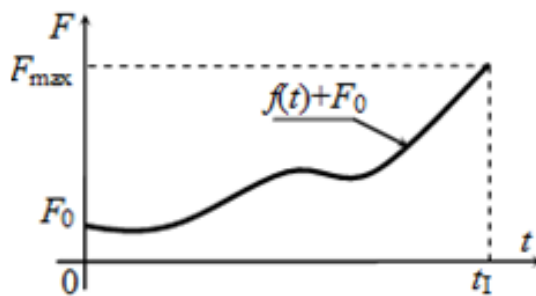


Рис. 4.2.1 Математическая модель оптимального ударного импульса.

Значения F_0 и t_1 определяются по характеристикам ударного узла машины, согласно выражениям:

$$F_0 = \frac{S_0 V_0 \sqrt{\rho E}}{2}, \quad (4.2.2)$$

где: S_0 – площадь поперечного сечения волновода; V_0 – предупредная скорость бойка; ρ – плотность материала бойка и волновода*; E – модуль упругости материала бойка и волновода.

$$t_I = 2L\sqrt{\frac{\rho}{E}}, \quad (4.2.3)$$

где: L – длина бойка.

Функция $f(x)$, задающая рост амплитуды в первой волне ударного импульса определяется по физико-механическим свойствам разрушаемого объекта по методике, описанной в следующем пункте данной работы.

Максимальное значение силы удара F_{\max} – это максимальное значение функции $F(t)$ на промежутке $t \in [0; t_I]$, определяется в последнюю очередь после решения задачи по определению зависимости $f(t)$ и зависит от общего вида функции $F(t)$.

4.3 Определение функции, задающей рост амплитуды в первой волне оптимального ударного импульса по физико-механическим свойствам разрушаемого объекта.

Задача определения функции, задающей рост амплитуды в первой волне ударного импульса, получила название: *Синтез ударного импульса по зависимости «сила – внедрение» для разрушения горной породы ударом* [133-135]. Решением этой задачи является функция $f(t)$, задающая рост амплитуды в первой волне оптимального ударного импульса.

Характеристикой физико-механических свойств материалов (гранит, базальт, мрамор и др.), входящих в состав разрушаемой горной породы, является диаграмма: «сила – внедрение», которую получают при статической нагрузке образца на испытательном комплексе типа ИК-500.01 (рис. 4.3.1 а,б). Эта диаграмма представляет собой зависимость величины нагружения образца породы P от глубины внедрения инструмента h (рис. 4.3.1 в).

* Во всех задачах, решения которых представлены в данной работе, материалы бойка и волновода (удароприемника) ударной машины одинаковы.

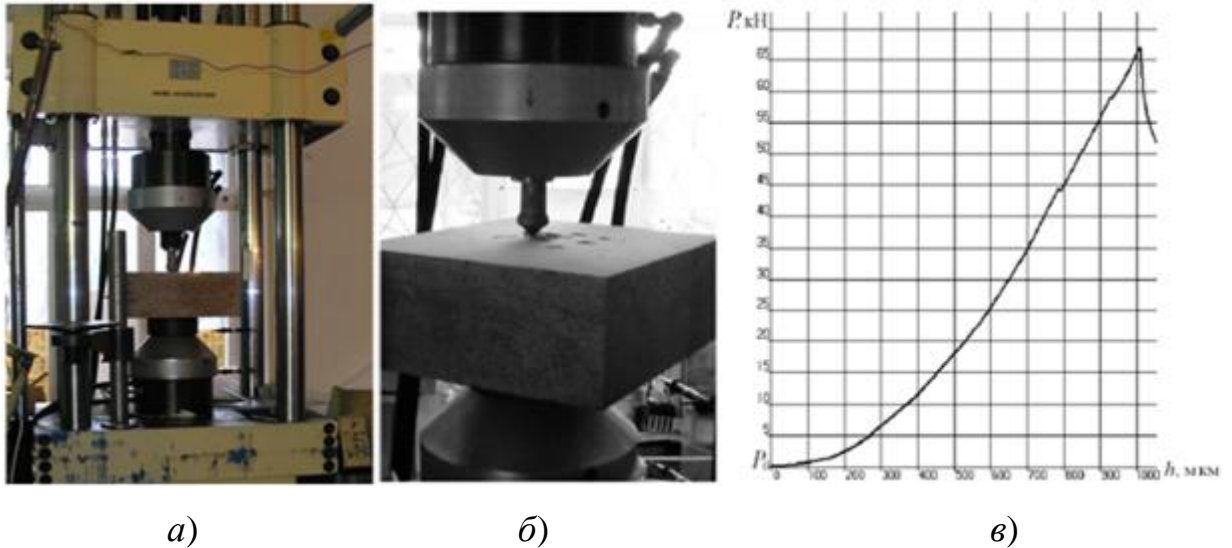


Рис. 4.3.1 а) испытательный комплекс ИК-500.01, б) проведение эксперимента, в) диаграмма «сила-внедрение».

Кривая диаграммы подвергается аппроксимации любым известным методом, в результате чего ей сопоставляется зависимость, вид которой определяется крепостью разрушаемой породы [136]:

для породы средней крепости – выбирается линейная зависимость вида:

$$P(h) = P_0 + kh, \quad (4.3.1)$$

для породы высокой крепости – выбирается зависимость вида:

$$P(h) = P_0 e^{kh}, \quad (4.3.2)$$

в обоих случаях: P_0 – это усилие, с которым инструмент прижат к породе непосредственно перед ударом; k – коэффициент, характеризующий объект разрушения, определяемый экспериментально.

Процесс внедрения инструмента в породу описывается системой уравнений, допустив упрощение, что отраженного от разрушаемого объекта импульса не возникает:

$$P = S\sigma, \quad (4.3.3)$$

$$\frac{dh}{dt} = \sqrt{\frac{1}{E\rho}} \sigma, \quad (4.3.4)$$

где P – усилие вызываемое падающей волной продольных колебаний; S – площадь контакта «инструмент-образец»; E и ρ модуль упругости и плотность материала инструмента; h – глубина внедрения инструмента в образец; σ – амплитудное значение напряжения на торце инструмента, контактирующего с породой, вызываемое действием ударного импульса.

Исключив из системы значение σ , получается выражение:

$$P = S\sqrt{E\rho} \frac{dh}{dt}. \quad (4.3.5)$$

Преобразуя выбранное для решения задачи выражение (4.3.1) или (4.3.2) к виду $h=h(P)$ и продифференцировав его по времени, получается выражение:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{dh(P)}{dP} \frac{dP}{dt}. \quad (4.3.6)$$

Подставив (4.3.6) в выражение (4.3.5) получаем обыкновенное дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными:

$$P = S\sqrt{E\rho} \frac{dh(P)}{dP} \frac{dP}{dt}. \quad (4.3.7)$$

Разделив переменные имеем:

$$\frac{dt}{S\sqrt{E\rho}} = \frac{dh(P)}{dP} \frac{dP}{P}, \quad (4.3.8)$$

Интегрируя (4.3.8) получаем уравнение:

$$\int_{t_0}^t \frac{dt}{S\sqrt{E\rho}} = \int_{P_0}^P \frac{dh(P)}{dP} \frac{dP}{P}, \quad (4.3.9)$$

где t_0 – начальное время, P_0 – значение силы в момент времени t_0 . Решая уравнение (4.3.9) определяется зависимость $P(t)$, определяющая рост сопротивления разрушаемой среды при внедрении в нее инструмента. Как было сказано ранее, эта же зависимость определяет рост амплитуды в падающем ударном импульсе, поэтому имеет место равенство:

$$f(t) = P(t). \quad (4.3.10)$$

Объединяя выражения (4.2.1) и (4.3.10) и учитывая значения выражений (4.2.2) и (4.2.3), получаем математическую модель первой волны оптимального

ударного импульса, полученной по диаграмме «сила-внедрение», снятой для испытуемого образца.

Решение данной задачи автоматизировано, оно выполнено в математическом приложении MAPLE-14 и представляет собой открытую *maple*-процедуру [137], написанную на встроенном в приложение языке программирования. Данная процедура получила название «Синтез ударного импульса по зависимости «сила-внедрение» для разрушения горной породы ударом» и зарегистрирована как программа для ЭВМ [138].

4.4 Решение задачи синтеза геометрии по форме первой волны падающего ударного импульса

Решением задачи по определению геометрических параметров приведенной формы ударника переменного сечения, генерирующего оптимальный ударный импульс, является функция вида $y=f(x)$, задающая кривую, линия которой представляет собой образующую сплошного однородного бойка переменного сечения (рис. 4.4.1), полученной по функции (4.2.1), задающей первую волну оптимального ударного импульса.

Решение задачи происходит по следующему алгоритму:

1. Формирование численной модели оптимального ударного импульса.

Область определения функции, задающей первую волну оптимального ударного импульса, разбивается на N одинаковых участков:

$$t_1 = \frac{t_I}{N}, \quad (4.4.1)$$

где t_1 – длительность первой волны ударного импульса; N – число цилиндрических ступеней, из которых будет синтезирован боек (выбирается произвольно в пределах 100). Далее под графиком функции $F(t)$, задающей первую волну оптимального ударного импульса, строится силовая гистограмма (рис. 4.4.2), состоящая из N столбцов.

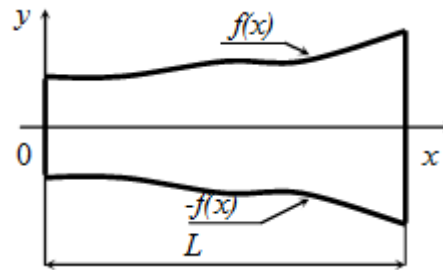


Рис. 4.4.1 Модель сплошного однородного боя, генерирующего оптимальный ударный импульс.

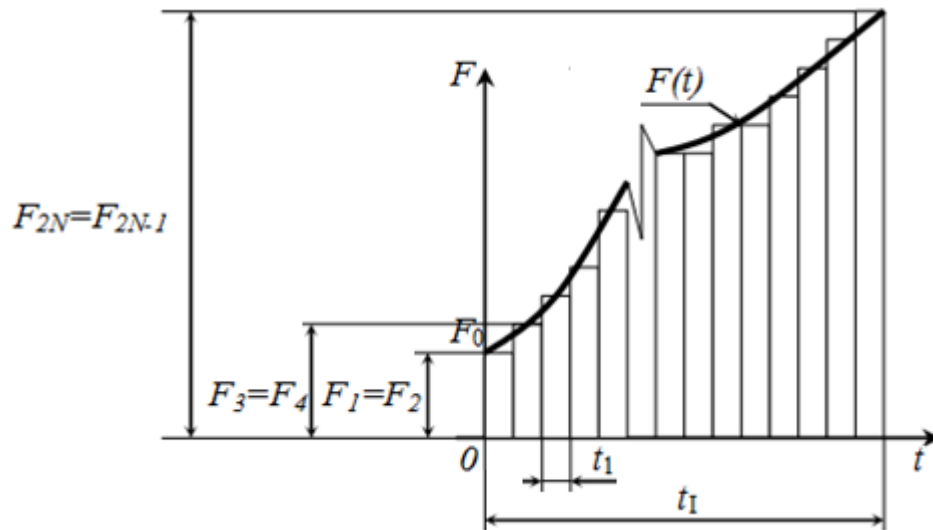


Рис. 4.4.2 Силовая гистограмма, построенная под графиком функции $F(t)$.

Численная модель оптимального ударного импульса представляет собой одномерный числовой массив F_i , содержащий значения высот столбцов силовой гистограммы. Расчет высоты каждого столбца происходит из равенства площадей соответствующего столбца гистограммы и площади криволинейной трапеции под графиком $F(t)$, ограниченной прямыми: $t=(i-1)t_1$, $t=it_1$ (здесь i - порядковый номер столбца силовой гистограммы) и осью Ot :

$$F_i t_1 = \int_{(i-1)t_1}^{it_1} F(t) dt \quad (4.4.2)$$

Число элементов числового массива F_i равно $2N$, их значения попарно равны и вычисляются согласно выражению:

$$F_{2i-1} = F_{2i} = \frac{1}{t_1} \int_{(i-1)\tau}^{i\tau} F(t) dt. \quad (4.4.3)$$

II. Анализ ударного узла машины.

На данном этапе определяются численные значения, характеризующие элементы ударного узла, для которого синтезируется боек:

S_0 – площадь поперечного сечения волновода (штанги, представляющей собой цилиндр постоянного сечения);

E и ρ – модуль упругости и плотность материала бойка и волновода;

V_0 – предударная скорость бойка.

III. Синтез бойка генерирующего оптимальный ударный импульс.

По алгоритму (раздел 2, п. 2.5), производится расчет диаметров цилиндрических ступеней синтезируемого бойка и заполняется числовой массив d_i . Длина каждой ступени вычисляется согласно выражению:

$$l_i = \frac{t_1}{2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (4.4.4)$$

Далее происходит непосредственный синтез бойка. Цилиндрические ступени располагаются на одной оси без промежутков друг за другом, получается боек (рис. 4.4.3), являющийся цилиндрическим телом со ступенчатой образующей, которая в результате аппроксимации заменяется линией вида $f(x)$. Из рисунка видно, что чем из большего числа ступеней синтезируется боек, тем более точно будет определена функция образующей.

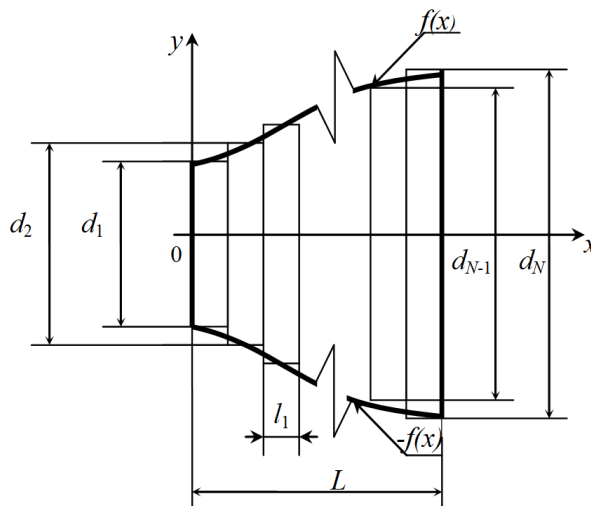


Рис. 4.4.3 Синтез бойка, генерирующего оптимальный ударный импульс

4.5 Описание программного обеспечения, выбранного для синтеза геометрии бойка

Алгоритм численно - аналитического метода синтезирования бойков по ударному импульсу был создан для его дальнейшей реализации на ЭВМ в виде расчетной программы или подпрограммы (процедуры). Для этого было выбран математический редактор MAPLE-14 (или более высокая версия). Это связано с тем, что на каждом шаге алгоритма необходимо вычислять степенное уравнение и упрощать элементы матрицы сил, где содержатся величины, описывающие процесс удара.

Математическая составляющая пакета MAPLE содержит более двух тысяч встроенных процедур и функций, позволяющих решать задачи алгебры и геометрии; математического анализа, дифференциального исчисления, теории графов, статистики, техники, физики и др. [139, 140]. Наряду с этим, данная среда снабжена востранным собственным алгоритмическим языком программирования, который снабжен всеми средствами необходимыми для разработки программ: структуры ветвления, циклы, массивы [141, 142]. Одним из особенностей программного кода MAPLE, определившей выбор среды, является возможность присвоения переменной аналитического выражения, позволяющего вычислить некую величину.

Программа, написанная в приложении MAPLE, называется *maple*-процедурой. Существует два вида *maple*-процедур: а) с открытым программным кодом (или открытая *maple*-процедура); б) с закрытым программным кодом (закрытая *maple*-процедура). При разработке программы удобно использовать открытый вариант процедуры, а после отладки и устранения всех ошибок процедуру удобно закрыть. Это связано с тем, что при проведении расчетов пользователю достаточно видеть входные данные и результаты расчета.

При разработке *maple*-процедуры текст записывается построчно с использованием встроенных операторов программирования и математических процедур. Для проведения расчета с использованием открытой *maple*-процедуры

пользователю необходимо находить и менять значения переменных, которые для этого снабжаются пояснениями (рис. 4.5.1), это является недостатком, но после закрытия процедуры данная операция упрощается.

```

скорость звука в материале стержней, мм/с
> a:=5*10^6;
5000000

предударная скорость бойка, мм/с
> v0:=8*10^3;
8000

Расчет коэффициента k:
> k :=  $\frac{E \cdot v_0}{2 \cdot a}$ ;
 $\frac{43}{250}$ 

Параметры расчета
количество расчетных шагов
> T:=160;
160

Зависимость, характеризующая первую волну ударного импульса: f=[кН], t=[мкс]
> f(t) := -149/36*t+132.5;
 $\frac{149}{36} t + 132.5$ 

```

Рис. 4.5.1 Фрагмент программного кода открытой *maple*-процедуры

Для ввода численных значений переменных с клавиатуры используется оператор присваивания «:=» [143], пользователь, пользуясь комментариями, находит необходимую строку и вносит изменения путем замены значения. Как было сказано выше, переменной можно присвоить аналитическое выражение, записанное в виде формулы. В этом случае оператор присваивания работает следующим образом:

1. Все элементы формулы имеют численные значения (вычисленные или определенные заранее), в данном случае результатом работы оператора будет число, вычисленное по введенной формуле согласно правилам математики;
2. Часть элементов формулы имеют численные значения (вычисленные или определенные заранее), в данном случае оператор подставит имеющиеся числа в аналитическое выражение, а неопределенные элементы оставит в виде переменных, в результате переменной присвоится формула. Ее можно упростить, используя функция упрощения «*simplify*» [144], который из

имеющейся базы среды MAPLE «собственноручно» выберет необходимый алгоритм и упростит выражение.

Вывод введенных, рассчитываемых и упрощенных в программе величин производится следующим образом:

1. В виде числа или аналитического выражения сразу после строки, где описан ввод, расчет или упрощение величины, для этого необходимо строку закончить символом «;» (рис. 4.5.2);
2. В виде графика некоторой зависимости, используя процедуру «plot» [145] (рис. 4.5.3).

$$\begin{array}{ll}
 > k := \frac{E \cdot V_0}{2 \cdot a}; & > f(t) := 149/36 \cdot t + 132.5; \\
 \frac{43}{250} & \frac{149}{36} t + 132.5 \\
 a) & б)
 \end{array}$$

Рис. 4.5.2 Ввод данных: а) в виде числа; б) в виде аналитического выражения.

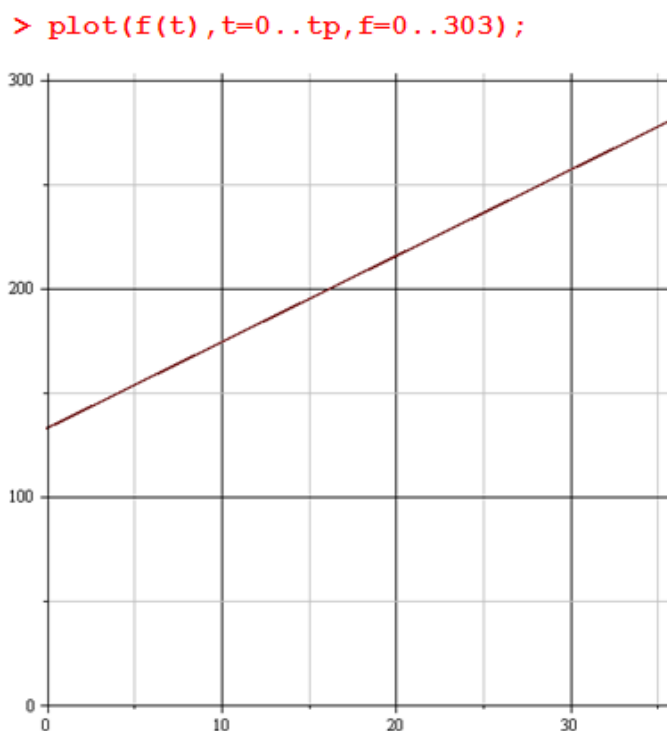


Рис. 4.5.3 Вывод графика с использованием процедуры «plot»

Запись программного кода производилась на встроенном в среду языке программирования с использованием стандартных операторов и функций описывающих алгоритмические структуры [146].

4.6 Описание расчетного модуля для синтеза геометрических параметров ударных узлов машин по физико-механическим свойствам разрушаемых объектов

Итогом алгоритмической части работы является создание расчетного модуля, написанного на языке программирования математического приложения MAPLE-14. Он синтезирует ступенчатый цилиндрический боек переменного сечения, генерирующий оптимальный ударный импульс, рассчитанный по физико-механическим свойствам разрушаемого объекта. Данный модуль получил название: *Синтез геометрических параметров ударных узлов машин в зависимости от физико-механических свойств разрушаемого объекта* и защищен свидетельством как программа для ЭВМ (свидетельство ПЭВМ №2019619331, Тимофеев Е.Г., Жуков И.А. - №2019618249; поступление 05.07.2019; зарегистрировано 16.07.2019) (приложение В).

Расчетный модуль состоит из двух последовательно выполняющихся *maple*-процедур, запускающихся пользователем непосредственно друг за другом:

I процедура: *Синтез ударного импульса по зависимости «сила-внедрение» для разрушения горной породы ударом;*

II процедура: *Синтез геометрии бойков ударных механизмов.*

Алгоритмическая схема работы программного модуля представляет собой линейную структуру, приведенную на рис. 4.6.1.

Системные требования: IBM PC-совместимый ПК, математическое приложение MAPLE-14 или более высокая версия (Windows 7, 10 64-bit; 1.4 GHz CPU, 1Gb RAM, 2Gb HDD.). Расчетный модуль записан в файл, являющийся собственностью среды MAPLE-14 (*.mws), требующий наличия 500Mb HDD свободного места.

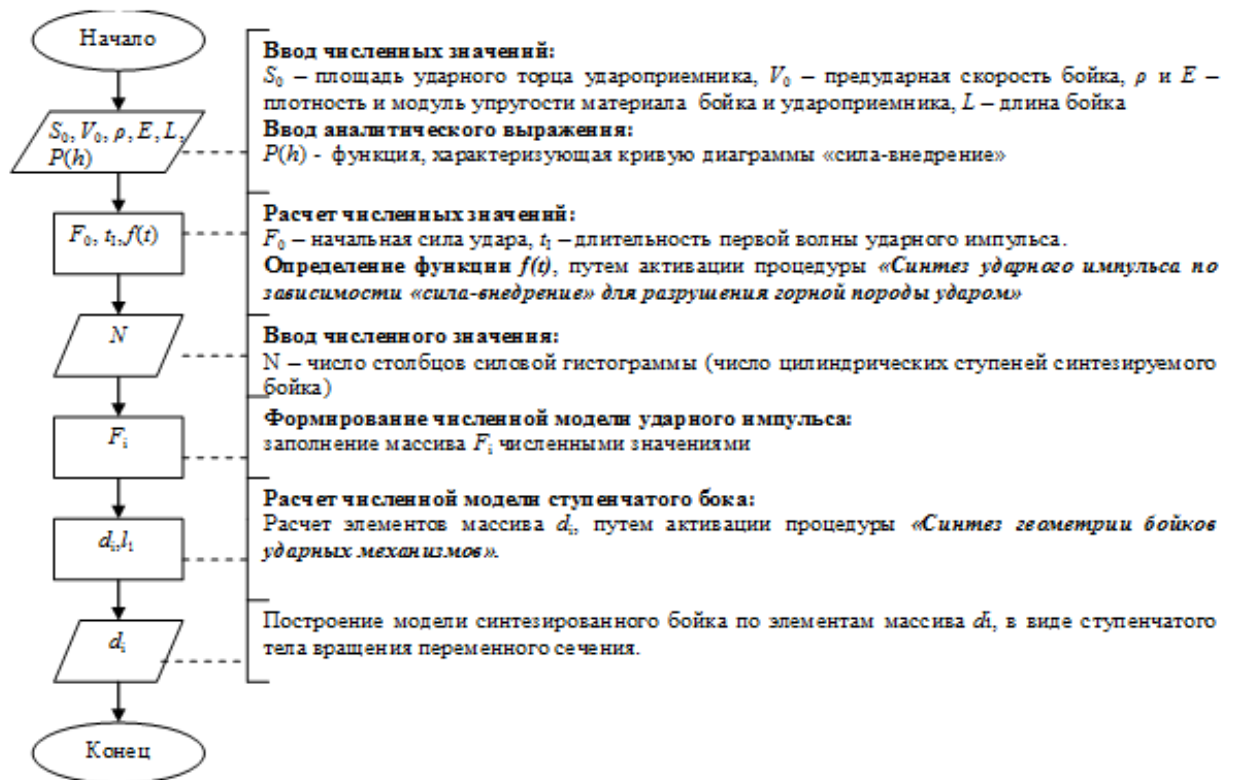


Рис. 4.6.1 Блок – схема алгоритма работы расчетного модуля «Синтез геометрических параметров ударных узлов машин в зависимости от физико-механических свойств разрушаемого объекта»

4.7 Пример синтезирования бойка по физико-механическим свойствам породы гранит

Апробация алгоритма синтезирования ударника была произведена на примере разрушения гранита. Поэтапная схема этого процесса выглядит следующим образом:

I этап. Получение диаграммы: «сила – внедрение» и аналитической зависимости задающей ее

Определения физико-механических свойств гранита было произведено по части диаграммы «сила-внедрение» (рис. 4.7.1) (до первого скола), снятой на испытательном комплексе типа ИК-500.01. Она подверглась аппроксимации методом наименьших квадратов, результат показал, что ей можно сопоставить степенную:

$$P(h) = k_1 + k_2 \sqrt{k_3^2 + h^2}, \quad (4.7.1)$$

или гиперболическую:

$$P(h) = k_4(1 + (k_5 h)^{k_6}), \quad (4.7.2)$$

зависимости (для другого материала, эти зависимости могут быть иного вида). Здесь значения коэффициентов k_i определяются экспериментально, они характеризуют объект разрушения, в работе [104] этим коэффициентам дается физический смысл.

Для данного случая (рис. 4.7.1) зависимость $P(h)$ представляет собой степенную зависимость вида:

$$P(h) = -18,4 + 5,9 \cdot 10^4 \sqrt{3,37 \cdot 10^{-4} + h^2} \quad (4.7.3)$$

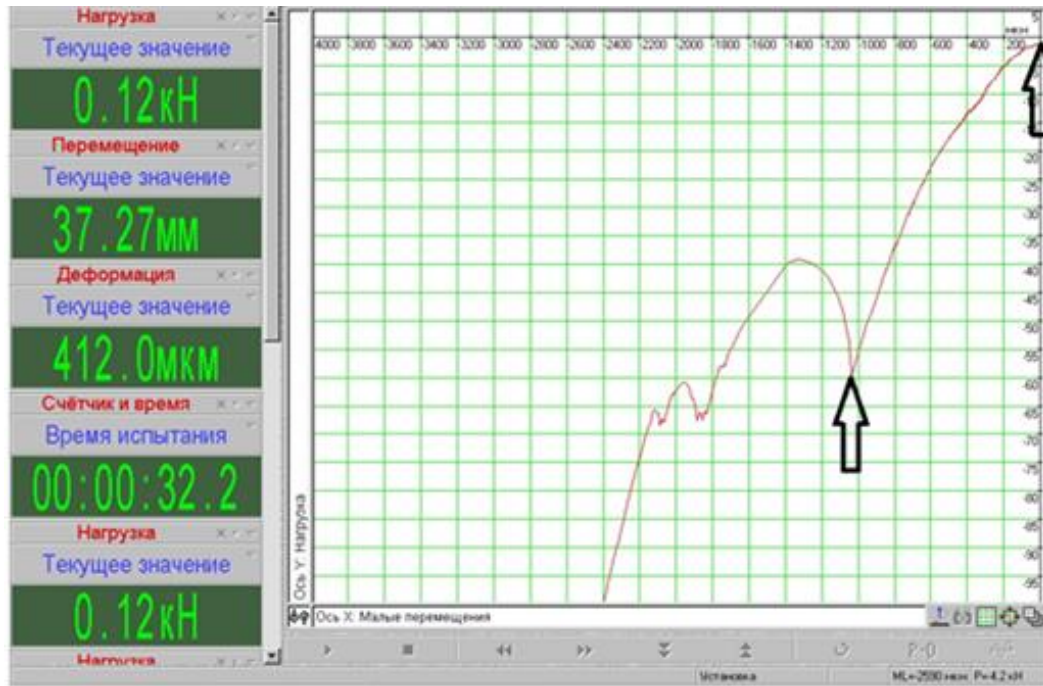


Рис. 4.7.1 Диаграмма «сила-внедрение» для гранита, участок до первого скола выделен стрелками

II этап «Анализ ударной системы»

Определение численных значений параметров характеризующих ударную систему: $S_0 = 803,84 \text{ мм}^2$ (для цилиндрического волновода постоянного сечения диаметром $d_0 = 32 \text{ мм}$); $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$ и $E = 200 \text{ ГПа}$ (инструментальная сталь); $V_0 = 8 \text{ м/с}$; $L = 99 \text{ мм}$.

III этап «Синтез ударного импульса по зависимости, задающей диаграмму: «сила – внедрение»».

Выполняя *maple*-процедуру «Синтез ударного импульса по зависимости «сила-внедрение» для разрушения горной породы ударом» определяется зависимость $f(t)$, задающая рост амплитуды в первой волне оптимального ударного импульса для гранита:

$$f(t) = -2,8586t + 11,24t^2 - 14,95t^3 + 9,7746t^4 - 2,9562t^5 + 0,3741t^6. \quad (4.7.4)$$

Используя выражения (4.2.2) и (4.2.3), согласно численным значениям величин, определенных на предыдущем этапе, вычисляются: начальное значение силы удара и длительность первой волны оптимального ударного импульса:

$$F_0 = 128,9 \text{ кН}; t_1 = 3,95 \text{ мкс}.$$

Объединяя полученные результаты согласно (4.2.1) формируется функция, задающая рост амплитуды в первой волне оптимального ударного импульса для гранита:

$$F(t) = 128,9 - 2,8586t + 11,24t^2 - 14,95t^3 + 9,7746t^4 - 2,9562t^5 + 0,3741t^6, \quad (4.7.5)$$

ее график представлен на рис. 4.7.2.

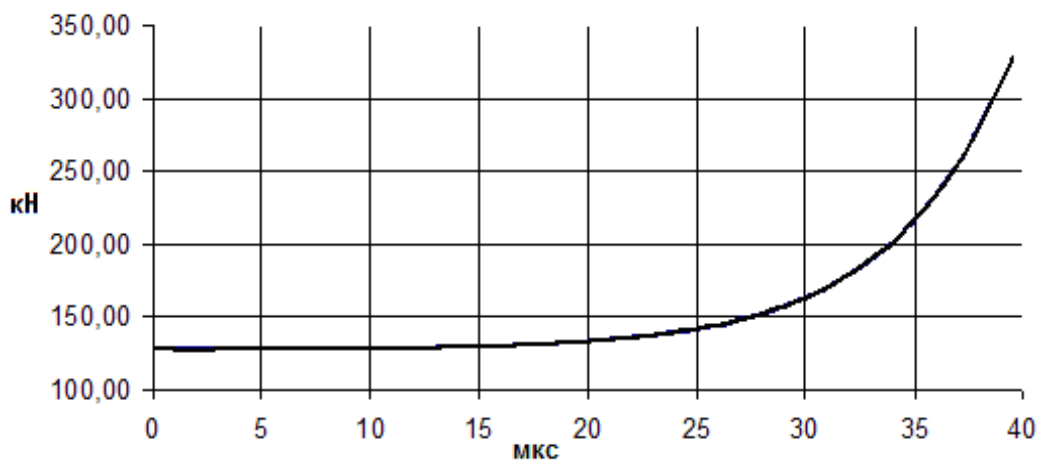


Рис. 4.7.2 График функции, задающей оптимальный ударный импульс для гранита

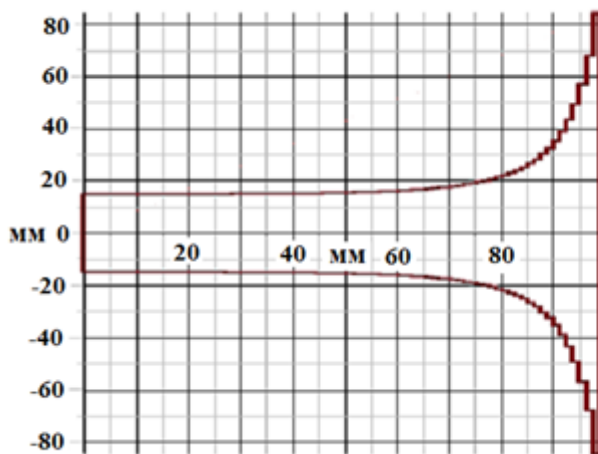
IV этап «Синтез ступенчатого бойка генерирующего оптимальный ударный импульс»

По функции, задающей первую волну оптимального ударного импульса, согласно выражению (4.4.3), определив численное значение числа

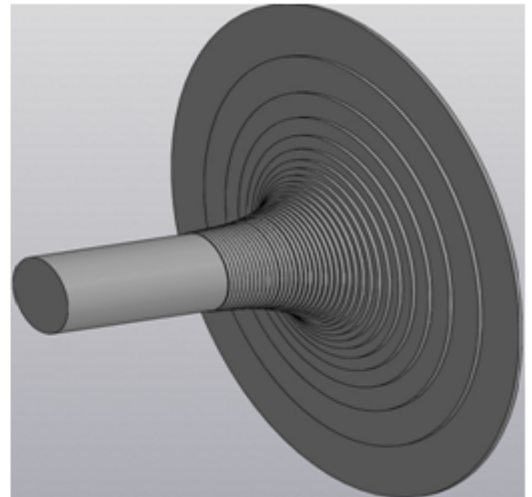
цилиндрических ступеней, из которых будет произведен синтез бойка ($N=80$), формируется численная модель оптимального ударного импульса. Выполняя *table*-процедуру *Синтез геометрии бойков ударных механизмов* рассчитывается численная модель ступенчатого бойка и строится ее эскиз, представляющий собой сечение, полученное путем рассечения секущей плоскостью, проходящей через ось бойка (рис. 4.7.3-а). Используя САД приложения 3D моделирования (такие как: КомпАс или Т-Flex) можно получить данную модель в объеме (рис. 4.7.3-б).

Аппроксимируя ступенчатую линию, задающую образующую синтезированного бойка, получаем функцию, сглаживающую боковую поверхность ударника:

$$f(x)=7\cdot 10^{-6}x^4-1,2\cdot 10^{-3}x^3+5,8\cdot 10^{-2}x^2-0,96x+16. \quad (4.7.6)$$



а)



б)

Рис. 4.7.3 а) эскиз ступенчатого бойка; б) 3D модель ступенчатого бойка

4.8 Практическая реализация синтезируемых бойков, как части ударного узла машины

Большим недостатком синтезируемых бойков является то, что они не встраиваются в корпус реальной машины. Для того чтобы стать частью ударного узла, необходимо снабдить ударник поршневой ступенью, обеспечивающей запас продольной устойчивости бойка. Существует несколько путей решения этой проблемы, они описаны в [147].

Наиболее перспективным, является способ, когда ударник снабжается оболочкой, которая выполняется таким образом, что приведенная форма бойка остается неизменной, это гарантирует сохранность генерируемого ударного импульса. Для этого боек выполняется в виде тела вращения вогнутой линии вокруг геометрической оси (функция, задающая линию, и ее область определения вычислены по алгоритму, описанному в разделе 4, п. 4.4). Ударник снабжается коническо цилиндрической оболочкой, постоянной толщины (рис. 4.8.1), обеспечивающей его устойчивость в корпусе машины.

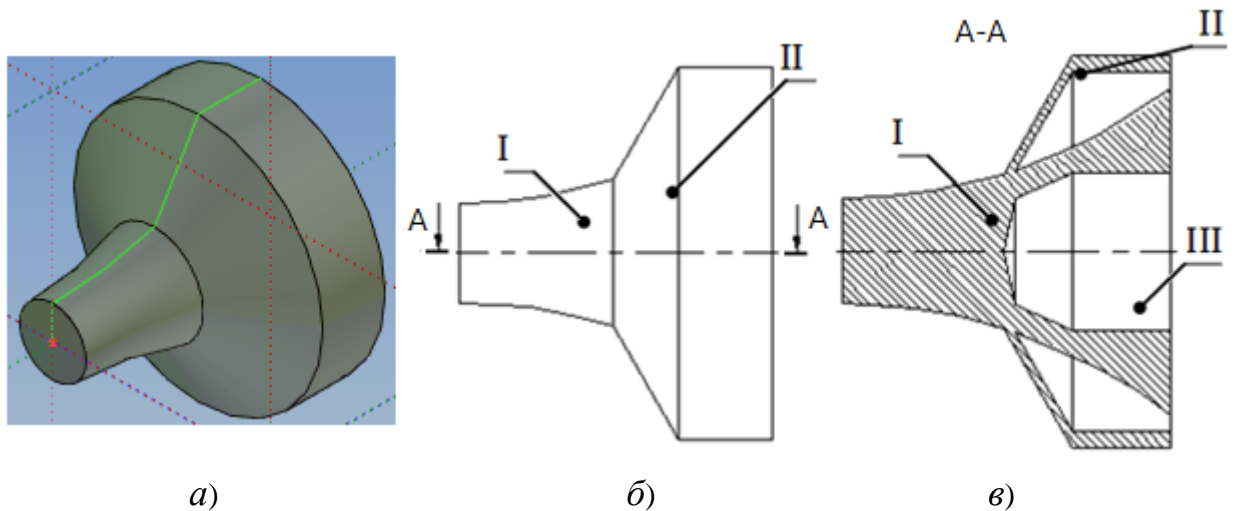


Рис. 4.8.1 а) 3D модель бойка с коническо цилиндрической оболочкой; б) вид с боку (I – тело вращения вогнутой линии; II – коническо цилиндрическая оболочка); в) разрез бойка А-А (III – коническо цилиндрическое отверстие)

Для сохранности массы и приведенной формы ударник снабжается коническо цилиндрическим отверстием, объем которого равен объему оболочки. При этом необходимо обеспечить равенство площадей поперечных сечений в любой координате по длине встраиваемого бойка и ударника, представляющего его приведенную форму. Чтобы проследить это равенство, боек и его приведенную форму удобно разделить по длине на четыре части, каждую линию, описывающую боковую поверхность бойка, задать простой функцией вида $y=f(x)$ (всего восемь штук), каждая из которых имеет свою область определения (рис. 4.8.2).

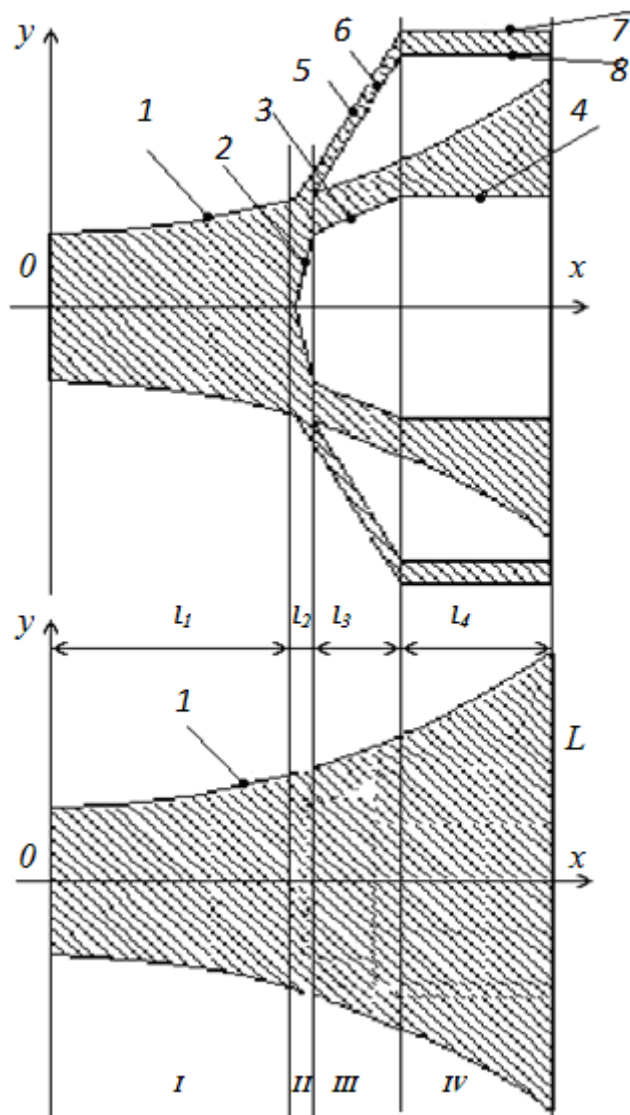


Рис. 4.8.2 Схематические изображения продольных разрезов встраиваемого бойка и ударника приведенной формы, (здесь номерами 1-8 указаны линии, задающие образующие боковых поверхностей)

В итоге, получается четырехступенчатый ударник, для каждой ступени которого должно выполняться два равенства:

1. Равенство площадей поперечных сечений для любой координаты по длине бойка: $S_{\text{приведенной формы}} = S_{\text{встраиваемого ударника}}$;

2. Равенство объемов: $V_{\text{оболочки}} = V_{\text{отверстия}}$.

Выпишем эти равенства для каждой ступени (табл. 4.8.1), предварительно определив виды функций, задающих боковую поверхность встраиваемого бойка:

1. $f_1(x) = f(x)$ – функция, полученная в результате аппроксимации ступенчатой

линии, задающей боковую поверхность синтезированного бойка; 2. $f_2(x)=k_2(x-l_1)$; 3. $f_3(x)=k_3(x-l_1-l_2)+f_2(l_1+l_2)$; 4. $f_4(x)=f_3(l_1+l_2+l_3)$; 5. $f_5(x)=k_5(x-l_1)+f_1(l_1)$; 6. $f_6(x)=k_6(x-l_1-l_2)+f_1(l_1+l_2)$; 7. $f_7(x)=f_5(l_1+l_2+l_3)$; 8. $f_8(x)=f_6(l_1+l_2+l_3)$.

Здесь: $k_2, k_3, k_5=k_6$, коэффициенты равные тангенсам углов наклона соответствующих функций, задающих образующие конических поверхностей; l_1, l_2, l_3, l_4 – длины ступеней встраиваемого бойка.

Таблица 4.8.1- Геометрические параметры встраиваемого бойка

№ ступени	Длина	Равенство площадей поперечных сечений в координате x_i	Равенство объемов цилиндрической оболочки и коническо-цилиндрического отверстия на текущей ступени
I	l_1	$\pi f^2(x_i) = \pi f_1^2(x_i)$, где $x_i \in [0; l_1]$	$\pi \int_0^{l_1} f^2(x) dx = \pi \int_0^{l_1} f_1^2(x) dx$
II	l_2	$\pi f^2(x_i) = \pi(f_5^2(x_i) - f_2^2(x_i))$, где $x_i \in [l_1; l_1+l_2]$	$\pi \int_{l_1}^{l_1+l_2} f^2(x) dx = \pi \int_{l_1}^{l_1+l_2} f_2^2(x) dx$
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 $x_i \in [l_1+l_2; l_1+l_2+l_3]$	$\pi \int_{l_1+l_2}^{l_1+l_2+l_3} (f_5^2(x) - f_6^2(x)) dx =$ $= \pi \int_{l_1+l_2}^{l_1+l_2+l_3} f_3^2(x) dx$
IV	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 $x_i \in [l_1+l_2+l_3; l_1+l_2+l_3+l_4]$	$\pi \int_{l_1+l_2+l_3}^{l_1+l_2+l_3+l_4} (f_7^2(x) - f_8^2(x)) dx =$ $\pi \int_{l_1+l_2+l_3}^{l_1+l_2+l_3+l_4} f_4^2(x) dx$

Работа бойка осуществляется следующим образом, на неударный торец бойка и в отверстия подается реагент, боек разгоняется и ударным торцом наносит удар по волноводу. Оболочки обеспечивает бойку устойчивое положение в корпусе машины. В силу того, что приведенная форма ударника представляет собой сплошное тело вращения кривой вогнутой линии, боек генерирует в волноводе ударный импульс с точно такими же характеристиками (длительностью, амплитудой и характером роста

амплитуды), который генерирует ударник, представляющий собой тело вращения переменного сечения приведенной формы.

На новое техническое решение конструкции бойка ударной машины подана заявка на получение патента на изобретение

4.9 Выводы по разделу

1. Разработана и протестирована численно-аналитическая *maple*-процедура, автоматизирующая синтез геометрии бойка по первой волне ударного импульса с высокой точностью.
2. Разработан и протестирован расчетный модуль, состоящий из двух *maple*-процедур, вычисляющий параметры ступенчатого бойка, способного сгенерировать оптимальный ударный импульс, параметры которого определены по физико-механическим свойствам разрушаемого объекта, который позволяет автоматизировать процесс синтеза.
3. Разработан и протестирован, алгоритм работы программного модуля, приводящий от диаграммы «сила-внедрение» к однородному телу вращения с образующей, заданной функциональной зависимостью $y=f(x)$, представляющий собой ударник переменного сечения, генерирующий оптимальный ударный импульс.
4. Проведен синтез бойка по физико-механическим свойствам гранита, демонстрирующий работоспособность программного модуля применительно к реальному объекту разрушения.
5. Разработан метод реализации синтезированного бойка, как элемента ударного узла машины, выполненного в виде ударника, имеющего монтажную оболочку, наличие которой не изменяет приведенной формы бойка, что не изменяет генерируемый им ударный импульс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения диссертационного исследования были решены актуальные научно-практические задачи, связанные с математическим моделированием, разработкой численных методов и программного обеспечения для исследования динамических волновых процессов в ударных системах с соударяющимися стержнями любой сложной геометрической формы. Согласно целям и задачам, поставленным в работе, 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 цилиндроконической 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимов О.Д. Бурильные машины / О.Д. Алимов, Л.Т. Дворников – М.: Машиностроение, 1976. – 295с.
2. Батуев Г.С. Инженерные методы исследования ударных процессов / Г.С. Батуев, Ю.В. Голубков, А.К. Ефремов и др. – М.: Машиностроение, 1977. – 240с.
3. Соколимнский В.Б. Машины ударного разрушения. – М.: Машиностроение, 1982. – 184 с.
4. Мигиренко Г.С. Ударные стенды для испытания малогабаритных изделий / Г.С. Мигиренко, В.Н. Ефграфов, А.А. Рыков и др. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1987. – 215 с.
5. Еремьянц В.Э. Расчет ударных процессов в машинах. Часть 4. Коромысловые ударные системы с неторцевым соударением элементов. Учебно-методическое пособие / Кыргызско-Российский Славянский университет. – Бишкек, 2003. – 56с.
6. Красников Ю.Д. Мощные нетрадиционные ударные машины как основа экологически чистых, безопасных технологий и роста прибыли горных строительных предприятий // Горное оборудование и электромеханика. – 2008. – №1. – С. 33-36.
7. Шапошников И.И.Д. Лом конический, или цилиндрический? Волновые процессы // Отраслевые аспекты технических наук. – 2011. – № 6. – С. 16-20.
8. Керимов З.Э. Гидравлические машины ударного действия и их практическое применение // Известия Тул.ГУ. Технические науки. – 2019. – Вып. 10. – С.481-489.
9. Репин А.А. Создание исполнительного органа для бурения скважин малого диаметра в крепких породах / А.А. Репин, Д.И. Кокоулин, И.О. Шахторин // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2015. – № 5. – С.102-107.
10. Кондратенко А.С. Перспективы направленного бурения прочных горных пород / А.С. Кондратенко, В.В. Тимонин, А.В. Патутин // Физико-

- технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 1. – С. 124-131.
11. Юнгмейстер Д.А. Экспериментальные исследования погружного пневмоударника бурового станка / Д.А. Юнгмейстер, А.И. Исаев, А.И. Ячейкин, П.Д. Соболева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 3. – С. 28-36.
 12. Бурак А.Я. Стендовые исследования ручного перфоратора с ударной системой «поршень-боек» / А.Я. Бурак, Д.А. Юнгмейстер, А.Ю. Васильев, Ю.В. Судьенков // Записки Горного института. – 2008. – Т. 178. – С. 175-180.
 13. Толстунов С.А. Определение эффективности применения машин ударного действия при добыче горных пород / С.А. Толстунов, А.В. Половинко // Записки горного института – 2013. – Т. 205. – С. 36-39.
 14. Исманов О.М. Ручные перфораторы с ударно-поворотным механизмом – новое направление в области создания машин на основе механизмов переменной структуры // Машиноведение. – 2017. – №1(5). – С. 3-11.
 15. Жукова Е.В. Историческая ретроспектива исследований проблем теории продольного удара, применительно к машинам технологического назначения / Е.В. Жукова, И.А. Жуков, Л. Б. Подгорных // Машиностроение. – 2014. – № 23. – С. 21-34.
 16. Манжосов В.К. Продольный удар / В.К. Манжосов; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования Ульяновский гос. технический ун-т. – Ульяновск : УлГТУ, 2007. – 357 с.
 17. Тимошенко С. Д. Колебания в инженерном деле / С. Д. Тимошенко. – М.: Физматгиз, 1959. – 440 с.
 18. Николаи Е.Л. К теории продольного удара упругих стержней / Е.Л. Николаи // Труды Ленингр. индустр. ин-та. Вып. 3 Ленинград, 1939. – С. 85-93.
 19. Бержерон Л. От гидравлического удара в трубах до разряда в электрической сети / Л. Бержерон. – М.: Машгиз, 1961. – 347 с.

20. Герсеванов Н.М. Теория продольного удара с применением к определению сопротивления свай / Н.М. Герсеванов. – Собр. соч. – Т. I. – М.: Стройвоенмориздат, 1948. – С. 70-94.
21. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний / В.Л. Бидерман. – М.: Высш. шк., 1972. – 416 с.
22. Кильчевский Н. А. Продолжительность соударения упругих тел и неньютоновский коэффициент восстановления / Н. А. Кильчевский, Л. М. Шальда // ПМ. – 1974. – Т. X. – Вып. 5. – С. 123-126.
23. Кильчевский Н. А. Теория соударения твердых тел / Н. А. Кильчевский. – М.: Наукова думка, 1969. – 431 с.
24. Гольдсмит В. Удар и контактные явления при средних скоростях. Физика быстропротекающих процессов / В. Гольдсмит. – М. : Мир, 1971. – С. 153–203.
25. Кольский Г. Волны напряжений в твердых телах / Г. Кольский. – М. : Изд-во иностр. лит., 1955. – 192 с.
26. Александров Е.В. Прикладная теория и расчет ударных систем /Е.В. Александров, В.Б. Соколинский. – М. : Наука, 1969. – 199 с.
27. Беляев Ю.В. Возможности упрощенной постановки задач о соударении упругих тел / Ю.В. Беляев // Сб. трудов Московского инженерно-строительного института. – М., 1978. – № 156. – 41-58.
28. Беляев Ю.В. Приложение теории упруго-пластических волн к определению потерь энергии при погружении свай / Ю.В. Беляев, Л. А. Бойко // Изв. вузов. Машиностроение. – 1973. – № 4. – С. 21-26.
29. Беляев Ю.В. Продольный удар по упругому стержню с амортизатором при действии сухого трения / Ю.В. Беляев // Изв. вузов. Машиностроение. – 1982. – № 7. – С. 33-38.
30. Саймон Р. Расчет на вычислительных машинах волн напряжений от удара бойка в бурильных машинах / Р. Саймон // Механика горных пород. – М. : Недра, 1966. – С. 76-94.

31. Фишер Г. Определение импульсов напряжений при ударном бурении / Г. Фишер // Разрушение и механика горных пород. – М. : Госгортехиздат, 1962. – С. 278–300.
32. Флавицкий Ю.В. Определение импульсов напряжения при продольном соударении упругих тел / Ю.В. Флавицкий, К.С. Хомяков. – М. : ИГД им. А.А. Скочинского, 1964. – 31 с.
33. Хомяков К. С. Разработка и исследование методики моделирования системы ударного действия на ЭЦВМ / К. С. Хомяков : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1965. – 16 с.
34. Хоукс И. Поведение волны деформации в штангах станков ударного бурения / И. Хоукс, П. Чакраварти // Разрушение и механика горных пород. – М. : Госгортехиздат, 1962. – С. 311-337.
35. Зегжда С.А. Продольное соударение двух систем стержней / С.А. Зегжда // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1969. – № 4. – С. 132-143.
36. Алимов О.Д. Графодинамический метод расчета ударных систем с использованием ЭЦВМ / О. Д. Алимов, В. К. Манжосов, В. Э. Еремьянц. – Фрунзе : Илим, 1975. – 39 с.
37. Алимов О.Д. Удар. Распространение волн деформаций в ударных системах / О.Д. Алимов, В.К. Манжосов, В.Э. Еремьянц. – М. : Наука, 1985. –354 с.
38. Алимов О.Д. Гидравлические виброударные системы / О.Д. Алимов, С.А. Басов. – М. : Наука, 1990. – 352 с.
39. Дворников Л.Т. Формирование ударного импульса в полубесконечном стержне бойком, имеющем форму гиперboloида вращения / Л.Т. Дворников, А.А. Мясников // Труды Фрунзенского политехнического института. Вып. 104. – Фрунзе, 1977. – С. 70–82.
40. Дворников Л.Т. Исследование влияния длительности и амплитуды ударного импульса на эффективность процесса бурения / Л.Т. Дворников, Б.Т. Тагаев // Труды Фрунзенского политехнического института. Вып. 104. – Фрунзе, 1977. – С. 62–69.

41. Дворников Л.Т. К вопросу о влиянии формы бойков ударных механизмов на эффективность разрушения горных пород / Л.Т. Дворников, Б.Т. Тагаев. – Фрунзе : Илим, 1981. – С. 16–21.
42. Дворников Л.Т. Конечно-разностный метод решения задачи о продольном соударении стержней / Л.Т. Дворников, А.А. Мясников // Исследования в области буровой техники. Сборник научных трудов Фрунзенского политехнического института. – Фрунзе, 1981. – С. 86- 93.
43. Дворников Л.Т. Некоторые прикладные задачи теории продольного удара // Научные основы механики машин, конструкций и технологических процессов. Тезисы докладов совещания Проблемной комиссии многостороннего научного сотрудничества Академий наук социалистических стран, Фрунзе, 24-28 мая 1982. – Фрунзе: Илим, 1982. – С. 23-24.
44. Шапошников И.-И.Д. К исследованию волн деформаций в элементах вращательно-ударного механизма бурильной машины / И.Д. Шапошников, Л.Т. Дворников, Г. С. Леонтьев // Тр. ФПИ. Вып. 38. – Фрунзе, 1969. – С. 71–81.
45. Шапошников И.-И.Д. Некоторые задачи продольного соударения стержней // МашиноСтроение. – 2010. – №20. – С. 84-90.
46. Шапошников И.-И.Д. Бурение продольным ударом. Осциллограммы // Отраслевые аспекты технических наук. – 2011. – № 11. – С. 35-40.
47. Шапошников И.-И.Д. Бурение продольным ударом. Влияние формы штанги // Отраслевые аспекты технических наук. – 2011. – № 3. – С. 06-12.
48. Шапошников И.-И.Д. Лом конический, или цилиндрический? Волновые процессы // Отраслевые аспекты технических наук. – 2011. – № 6. – С. 16-20.
49. Еремьянц В.Э. Расчет ударных процессов в машинах. Часть 1. Модели продольного соударения тел с дискретными параметрами и их анализ. Учебно-методическое пособие / Кыргызско-Российский Славянский университет. – Бишкек, 2001. – 52 с.
50. Еремьянц В.Э. Исследование коэффициента восстановления скорости бойка при ударе по упругому волноводу, опирающемуся на металлическую плиту /

- В.Э. Еремьянц, Е.С. Дандыбаев, Т.Д. Умербеков // Материалы II международного научного симпозиума «Механизмы и машины ударного, периодического и вибрационного действия». – Орел : ОрелГТУ, 2003. – С. 103–108.
51. Еремьянц В.Э. Моделирование рабочих процессов в кривошипнокоромысловых ударных механизмах с гидроприводом / В.Э. Еремьянц, Е.С. Дандыбаев // Проблемы механики современных машин / Матер. II межд. конф. Т. 3. – Улан-Удэ : Изд-во ВСГТУ, 2003. – С. 147–151.
52. Еремьянц В.Э. Волновые процессы в волноводе ударной системы «боёк – волновод – пластина» // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2011. – №1(53). – С. 35-38.
53. Eremjants V.E. About selection of parameters of hydraulic vibro-impact machines for surface cleaning / V.E. Eremjants, V.V. Niu // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2016. № 2. P. 20-24.
54. Манжосов В.К. Алгоритм расчета ударного взаимодействия инструмента с обрабатываемой средой / В.К. Манжосов, В.Э. Еремьянц, Ю.В. Невенчанный // Тр. НКИ. Вып. 169. – Николаев, 1980. – С. 44–52.
55. Манжосов В.К. Динамика и синтез кулачковых ударных механизмов / В.К. Манжосов. – Ульяновск, 2006. – 218 с.
56. Манжосов В.К. Модели удара в стержневых системах / В.К. Манжосов : методические указания. – Ульяновск : УлГТУ, 1998. – 60 с.
57. Манжосов В.К. Модель продольного удара неоднородного стержня о жесткую преграду / В.К. Манжосов, А.А. Битюрин // Механика и процессы управления: сборник научных трудов. – Ульяновск, 2004. – С. 79–88.
58. Манжосов В.К. Продольный удар неоднородного стержня о жесткую преграду / В.К. Манжосов, А.А. Битюрин // Актуальные вопросы промышленности и прикладных наук : сборник статей Международной заочной научно-технической конференции (1 октября – 20 декабря 2004 года). – Ульяновск, 2004. – С. 135–140.

59. Стихановский Б.Н. КПД передачи энергии при упругом соударении стержней / Б.Н. Стихановский // труды межвузовской научной конференции по электрическим машинам ударного действия : сб. докл. – Новосибирск : НЭТИ, 1967. – С. 119–121.
60. Стихановский Б.Н. Приближенный метод определения времени, коэффициента восстановления, силы и передачи энергии при свободном прямом ударе тел / Б.Н. Стихановский // Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. – 1971. – № 1. – С. 70–83.
61. Стихановский Б.Н. Передача энергии ударом / Б.Н. Стихановский. – Омск, 1995. – Ч. 2/3. – 146 с. – Деп. в ВИНТИ, № 1729. – В 95.
62. Мясников А.А. О гипотезе плоских сечений для уравнений продольных колебаний стержней / А.А. Мясников // Механизмы переменной структуры и вибрационные машины. Материалы 2-й международной конференции. – Бишкек, 1995. – С. 124–127.
63. Мясников А.А. Обоснование рациональной конструкции механического генератора волн продольных колебаний машин ударного действия для разрушения горных пород : автореф. дис. канд. техн. наук / А.А. Мясников. – Алма-Ата, 1983. – 19 с.
64. Малков О.Б. Расчет ударных импульсов в ступенчатых стержневых системах / О.Б. Малков. – Омск, 2000. – 112 с.
65. Малков О.Б. Общий способ расчета параметров плоского удара в ступенчатых стержневых системах / О.Б. Малков. – Омск, 2000. – 112 с.
66. Малков О.Б. Математическое моделирование продольного удара в ступенчатых ударных системах / О.Б. Малков, Б.Н. Стихановский // Прикладные задачи механики. – Омск : ОмГТУ, 1999. – С. 118–121.
67. Саруев Л.А. Рабочие процессы и выбор параметров станков для бурения взрывных скважин малого диаметра / Л.А. Саруев : автореф. дис. докт. техн. наук. – Томск, 1986. – 24 с.

68. Слистин А.П. Расчет параметров процесса передачи продольного ударного воздействия по составным стержням / А.П. Слистин, А.И. Авдеева // Томский политехн. ун-т. – Томск, 1998. – 155 с. – Деп. в ВИНТИ, № 2347–В 98.
69. Доронин С.В. Оценка конструктивных решений и расчетное обоснование рациональных параметров деталей машин ударного действия для разрушения горных пород / С.В. Доронин, Д.В. Косолапов // Горное оборудование и электромеханика. – 2008. – №10. – С. 47-53.
70. Доронин С.В. Напряженно-деформированное состояние деталей машин импульсного действия / С.В. Доронин, Д.В. Косолапов // Тяжелое машиностроение. – 2009. – №6. – С. 25-27.
71. Ушаков Л.С. Гидравлические машины ударного действия / Л.С. Ушаков, Ю.Е. Котылев, А.В. Кравченко. – М.: Машиностроение, 2000. – 416 с.
72. Ушаков Л.С. Импульсные технологии и гидравлические ударные механизмы. – Орел: ОрелГТУ, 2009. – 250 с.
73. Юнгмейстер Д.А. Исследования ударной системой «поршень-боёк-инструмент» для расширения области использования процесса дребезга / Д.А. Юнгмейстер, Ю.В. Судьенков, В.А. Пивнев и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – №8. – С. 288-294.
74. Юнгмейстер Д.А. Модернизация ударных буровых механизмов / Д.А. Юнгмейстер, Л.К. Горшков, В.А. Пивнев и др. – СПб.: Изд-во «Политехника-сервис», 2012. – 149 с.
75. Жуков И.А. Анализ форм Бойков ударных систем графоаналитическим методом / И.А. Жуков, Л.Т. Дворников // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2009. – № 1(55). – С. 15-19.
76. Жуков И.А. Продольные колебания стержней применительно к ударным системам технологического назначения // Машиностроение и инженерное образование. – 2016. – № 1(46). – С. 40-49.
77. Davidyants M.P. Breaking up unsized material with an impulse hydraulic hammer / M.P. Davidyants, G.P. Davidyants // Refractories. 1973. Vol. 13. № 3-4. P. 164-167.

78. Melamed Y. Hydraulic hammer drilling technology: developments and capabilities / Y. Melamed, A. Kiselev, M. Gelfgat, D. Dreesen, J. Blacic // Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME. 2000. Vol. 122. № 1. P. 1-7.
79. Xu T.L. Simulation Research on Affecting Hydraulic Hammer Working Performance / T.L. Xu // Lubrication Engineering. 2006. No. 5. P. 108-110.
80. Gavril Axinti. Dynamic aspects of percussion equipments / Axinti. Gavril // The Annals of "Dunarea De Jos" University of Galati Fascicle XIV Mechanical Engineering. 2009. P. 39-43.
81. Wang L. Test Method of Impact Property for Hydraulic Breaking Hammer / L. Wang, G.-P. Yang, C.-P. Liang, C.-C. Ding // Construction Machinery. 2009. No. 6. P. 98-100.
82. Xu Q. Present Situation and Development Trends of Hydraulic Impactors Research / Q. Xu, Y.Y. Huang, X.Y. Tian // Construction Machinery and Equipment. 2010. No. 6. P. 47-62.
83. Ding W.-S. Analysis of dynamic characteristic of transient impact from hydraulic hammer / W.-S. Ding, L. Tian, K. Liu // Huanan Ligong Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban). 2016. Vol. 44. № 11. P. 63-70. DOI: 10.3969/j.issn.1000-565X.2016.11.010.
84. Huang X. Development Status of Hydraulic Hammers and Development Trends of Hydraulic Hammers Used in Oil and Gas Well Drilling / X. Huang, G. Hu, Q. Meng, X. Zheng // Electronic Journal of Geotechnical Engineering. - 2016. - Vol. 21. - P. 5453-5464.
85. Benatar A. Theoretical and experimental analysis of longitudinal wave propagation in cylindrical viscoelastic rods / A. Benatar, D. Rittel, A. L. Yarin // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2003. – Vol. 51. – No 8. – P. 1413-1431. – DOI 10.1016/S0022-5096(03)00056-5. – EDN BJEWWB.
86. Chakraborty, A. Various numerical techniques for analysis of longitudinal wave propagation in inhomogeneous one-dimensional waveguides / A. Chakraborty, S. Gopalakrishnan // Acta Mechanica. – 2003. – Vol. 162. – No 1-4. – P. 1-27. – EDN ESKGKJ.

87. Náprstek, J. Wave propagation in semi-infinite bar with random imperfections of density and elasticity module / J. Náprstek // Journal of Sound and Vibration. – 2008. – Vol. 310. – No 3. – P. 676-693. – DOI 10.1016/j.jsv.2007.03.048. – EDN LQQKFL.
88. Манжосов В. К. Моделирование продольного удара в стержневых системах неоднородной структуры / В. К. Манжосов, В.В. Слепухин. – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – 208 с.
89. Слепухин В.В. Моделирование волновых процессов при продольном ударе в стержневых системах неоднородной структуры: специальность 05.13.18 "Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Слепухин Виталий Владимирович. – Ульяновск, 2009. – 251 с.
90. Битюрин А.А. Продольный удар неоднородного стержня о жесткую преграду / А.А. Битюрин, В.К. Манжосов. – Ульяновск : УлГТУ, 2009. – 164 с.
91. Ямпольский, Д. З. Численное моделирование продольного удара. Сравнение с экспериментом / Д. З. Ямпольский // Вестник научно-технического развития. – 2019. – № 9(145). – С. 30-51. – DOI 10.18411/vntr2019-145-4. – EDN VFUDBB.
92. Иванов К.И. Разрушение горных пород ударными импульсами, генерируемыми поршнями различной формы / К.И. Иванов, В.Д. Андреев // Взрывное дело, 58/15. – М. Недра, 1966. – С. 244-253.
93. Иванов К.И. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых. Изд. 2, перераб. / К.И. Иванов, М.С. Варич, В.И. Дусев и др. – М.: Недра, 1974, – 408 с.
94. Дворников Л.Т. Продольный удар полукатеноидальным бойком / Л.Т. Дворников, И.А. Жуков. – Новкузнецк: СибГИУ. – 2006. – 80 с.
95. Ляпцев С.А. Параметры многомассового ударного механизма для разрушения горных пород / С.А. Ляпцев, Н.Р. Степанова // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12-8. – С. 1649-1651.

96. Еремьянц В.Э. К вопросу О рациональной форме бойков ударно-вращательных бурильных машин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 5. – С. 74-82.
97. Еремьянц В.Э. Динамика ударных систем. Моделирование и методы расчета. Саарбрюккен. Palmarium academic publishing. 2012. 586 с.
98. Открытие 13 СССР / Е.В. Александров. – Приоритет от 30.10.1957, опубли. 19.03.1964, Бюл. №7 – С.7-12.
99. Clebsch A. Theorie de l'elasticite des corps solides / V.F. Saint-Venant. – Paris: Dunod, 1883. – 980 p. 78.
100. Кильчевский Н.А. Динамическое контактное сжатие твердых тел. Удар. – Киев: Наукова думка, 1976. – 320с.
101. Жуков И.А. Исходные основания к изучению влияния форм бойков на форму ударного импульса в машинах ударного действия // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – №5(105). – С. 25-27.
102. Дворников Л.Т. Метод конечных разностей при описании процесса продольных колебаний стержней / Л.Т. Дворников, А.А. Мясников // Совершенствование содержания и методики преподавания курса теории механизмов и машин. Тезисы докладов и сообщений III зонального научно-методического совещания-семинара вузов Средней Азии и Казахстана. – Фрунзе. 1985. – С. 37-39.
103. Мясников А.А. Использование метода конечных разностей для расчета систем бурильных и грунтопроходческих машин / А.А. Мясников, Г.В. Федотов // Вопросы совершенствования горных машин. Сборник научных трудов Фрунзенского политехнического института. – Фрунзе, 1985. – С. 28-38.
104. Жуков И.А. Зависимость "сила - внедрение" горной породы как исходный параметр для синтеза машин ударного действия // Журнал передовых исследований в области естествознания. – 2018. – № 4. – С. 42-48.

105. Сараханова Е.В. Алгоритм определения форм ударного импульса по зависимости "сила-внедрение" для крепких горных пород / Е. В. Сараханова, И. А. Жуков // МашиноСтроение. – 2010. – № 20. – С. 93-98.
106. А.с. № 208608 А1 СССР, МПК E21B 1/00, B25D 17/02, E21B 3/00. Боек для машин ударного действия / В. Д. Андреев, К. И. Иванов, Г. Г. Манзиенко и др. – № 1007501/22-3, заявл. 13.05.1965; опубл. 17.01.1968.
107. А.с. № 1004093 А1 СССР, МПК B25D 17/02. Поршень-ударник для машин ударного действия / В. Б. Соколинский, Г. М. Захариков, С. И. Доброборский, В. М. Васильев – № 2351792, заявл. 21.04.1976; опубл. 15.03.1983.
108. А.с. № 1362572 А1 СССР, МПК B25D 17/02. Боек / Л. Т. Дворников, Г. В. Федотов – № 4097162; заявл. 22.05.1986; опубл. 30.12.1987.
109. Патент № 2041792 С1 Российская Федерация, МПК B25D 17/02. Боек : № 5027301/28 : заявл. 17.02.1992 : опубл. 20.08.1995 / Л. Т. Дворников, Ю. А. Прядко, С. Н. Гудимов; заявитель Сибирский металлургический институт им.Серго Орджоникидзе.
110. Патент № 2484943 С1 Российская Федерация, МПК B25D 17/02, E21B 1/38. Боек цилиндрикоконический : № 2011152123/02 : заявл. 20.12.2011 : опубл. 20.06.2013 / Л. Т. Дворников, И. А. Жуков, В. В. Молчанов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский государственный индустриальный университет".
111. Патент № 2433242 С1 Российская Федерация, МПК E21B 4/14. Погружной пневмоударник : № 2010116405/03 : заявл. 26.04.2010 : опубл. 10.11.2011 / А. А. Липин, А. В. Белоусов, Н. Н. Заболоцкая ; заявитель Учреждение Российской академии наук Институт горного дела Сибирского отделения РАН.
112. Свидетельство на БД №20111660044; Полный состав форм бойков для машин ударного действия / Жуков И.А., Андреева Я.А. (РФ) - №2012620225; поступление 02.04.2012; зарегистр. 13.06.2013.

113. Жуков И.А. Автоматизация определения приведенной формы бойков ударных механизмов // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2016. – № 4. – С. 50-54.
114. Алексеев Е.Р. Free pascal и Lozarus : учебник по программированию/ Алексеев Е.Р., Чеснокова О.В., Кучер Т.В. – Москва: ALT Linux; Издательский дом ДМК-пресс, 2010. – 440с.
115. Мансуров К.Т. Основы программирования в среде в среде Lozarus, 2010. – 772с.
116. Ачкасов В.Ю. Программирование на Lozarus – Москва: Институт, 2016. – 520с.
117. StrToFloat – Функция. Справочник – основы Delphi [электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <http://www.delphibasics.ru/StrToFloat.php>, свободный.
118. StrToInt – Функция. Справочник – Основы Delphi [электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <http://www.delphibasics.ru/StrToInt.php>, свободный.
119. DecimalSeparator – Переменная – Справочник – Основы Delphi [электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <http://www.delphibasics.ru/DecimalSeparator.php>, свободный.
120. Трубников С.В. Компьютерное моделирование: Учебное пособие для студентов вузов. – Брянск: Брянский государственный университет, 2004. – 336 с.
121. Алгоритм парсинга арифметических выражений / Хабр [электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/263775/>, свободный.
122. Обратная польская запись/ Хабр [электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/100869/>, свободный.
123. Компонент Delphi OpenDialog, [электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://www.h-delphi.ru/opendialog/>, свободный.
124. FloatToStrF – Функция. Справочник – основы Delphi [электронный ресурс]: сайт. - Режим доступа: <http://www.delphibasics.ru/FloatToStrF.php>, свободный.

125. Построение графиков с помощью компонента tChart [электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/5514386/page:33/>, свободный.
126. Язык программирования Паскаль [электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://phys.bspu.by/static/um/inf/prg/lec/pdf/pascal1s.pdf>, свободный.
127. Урок 21. Диалог для открытия файла – Delphi 7 – Каталог статей – Borland Russian Community [электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://bdrc.ru/articles/delphi-7/urok-21-dialog-dlya-otkritiya-fayla.html>, свободный.
128. Компонент Delphi OpenDialog, [электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://www.h-delphi.ru/opendialog/>, свободный.
129. Александров Е.В. Прикладная теория и расчеты ударных систем / Е.В. Александров, В.Б. Соколинский. – М.: Изд-во «Наука», 1969. – 201с.
130. Дворников Л.Т. К вопросу о рациональном проектировании ударных систем горно-технологического назначения // Матер. VI научно - практ. конф. по секции машиностроения и горных машин / Под ред. проф. Л.Т. Дворникова. – Новокузнецк, 1995. – С. 70-82.
131. Жуков И.А. Формирование упругих волн в волноводах при ударе по ним полукатеноидальными бойками: дисс. канд. тех. наук / Жуков Иван Алексеевич. – Новокузнецк, 2005. – 132 с.
132. Жуков И.А. Научно-методические основы определения физико-механических свойств горной породы при исследовании разрушения хрупких сред ударом // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сб. науч. статей. – Новокузнецк: СибГИУ, 2009. – С. 96-100.
133. 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.
134. Сараханова Е.В. Алгоритм определения форм ударного импульса по зависимости «сила-внедрение» для крепких горных пород / Сарханова Е.В,

- Жуков И.А. // Материалы двадцатой научно-практической конференции по проблемам механики и машиностроения / под ред. Л.Т. Дворникова и И.А. Жукова; Сиб. гос. индустр. ун-т. –Новокузнецк, 2010. – 146 с.
135. Жуков И.А. Зависимость «сила – внедрение» горной породы как исходный параметр для синтеза машин ударного действия // Journal of Advanced Research In Natural Science. – 2018. – №4. – С. 42-48.
136. Дворников Анализ и обобщение закономерностей внедрения инструмента в горные породы при ударном воздействии / Л.Т. Дворников, И.А. Жуков // Матер. XVI научно практ. конф. По проблемам механики и машиностроения / под. ред. проф. Л.Т. Дворникова и проф. Э.Я. Живаго. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – С. 225-229.
137. Аладьев В.З. Программирование и разработка приложений в MAPLE : монография / В.З. Аладьев, В.К. Бойко, Е.А. Ровба ; В.З. Аладьев, В. К. Бойко, Е.А. Ровб ; М-во образования Республики Беларусь, Учреждение образования "Гродненский гос. ун-т им. Янки Купалы", Международная акад. ноосферы, Балтийское отд-ние. – Гродно;: [Б. и.], 2007. – 454 с.
138. Свидетельство ПЭВМ №2012611835. Синтез ударного импульса по зависимости «сила-внедрение» для разрушения горной породы ударом/ Жуков И.А., Сараханова Е.В. - №2011660043; поступление 26.12.2011; зарегистр. 17.02.2012.
139. Основные объекты и команды MAPLE [электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/3617012/page:6/>, свободный.
140. Кирсанов М.Н. Maple и MapleT. Решение задач механики: учебное пособие. – Санкт Петербург: Издательство «Лань», 2012. – 512с.
141. Аладьев В.З. Программирование и разработка приложений в Maple: монография/ Аладьев В.З., Бойко В.К., Ровба Е.А. – Гродно: ГрГУ; Таллин: Межд. Акад. Ноосферы, Балт. отд. – 2007. – 458с.
142. Введение в программирование на языке Maple [электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <http://www.apmath.spbu.ru/ru/structure/depts/is/Maple-Programming.pdf>, свободный.

143. Maple V Power Edition Б.М. Манзон [электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа:
http://old.exponenta.ru/SOFT/MAPLE/manson/poweredition/chapter4/4_2_5.asp, свободный
144. Методы решения математических задач в Maple. Преобразование математических выражений [электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа:
http://old.exponenta.ru/educat/systemat/SAVOTCHENKO/1_4.asp, свободный.
145. Методы решения математических задач в Maple. Двумерные графики [электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа:
http://old.exponenta.ru/EDUCAT/SYSTEMAT/SAVOTCHENKO/3_1.asp, свободный.
146. Программирование в среде Maple – стр. 8 [электронный ресурс] : сайт. – Режим доступа: <https://gigabaza.ru/doc/14075-p8.html>, свободный.
147. Жуков И. А. К проблеме учёта и встраивания сложных форм бойков ударных систем / И. А. Жуков, В. В. Молчанов, Я. А. Андреева // Современные проблемы теории машин. – 2014. – № 2. – С. 6-9.

Список опубликованных работ 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, 134 (2018), 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. 259 – 271. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_259.

в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных 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.

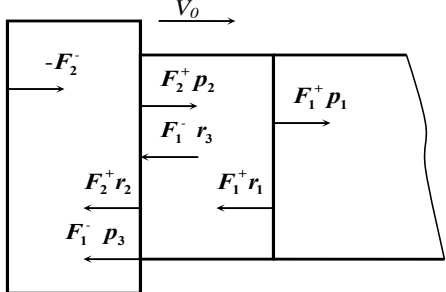
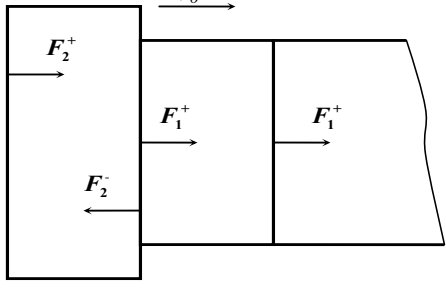
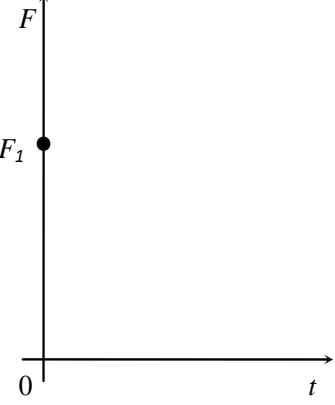
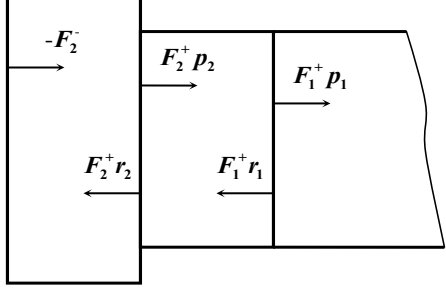
8. Жуков И.А. Математическое и компьютерное моделирование ударных процессов в стержневой системе сложной геометрической формы / И.А. Жуков, Е.Г. Тимофеев, В.В. Молчанов // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2015. – №3. – С. 7-11.
9. Тимофеев Е.Г. К разработке численного метода исследования 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: Из-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.

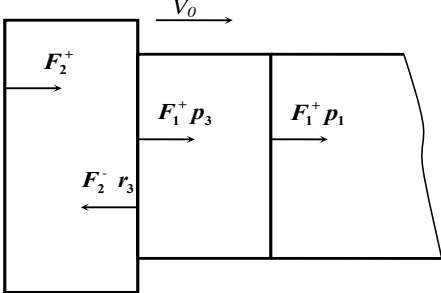
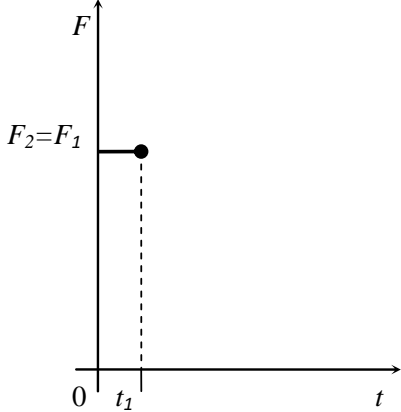
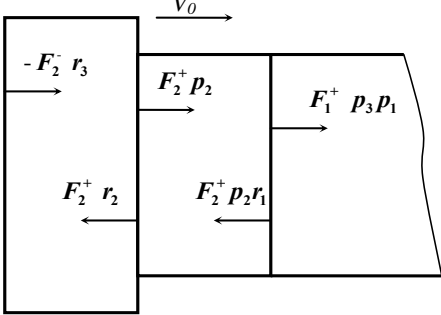
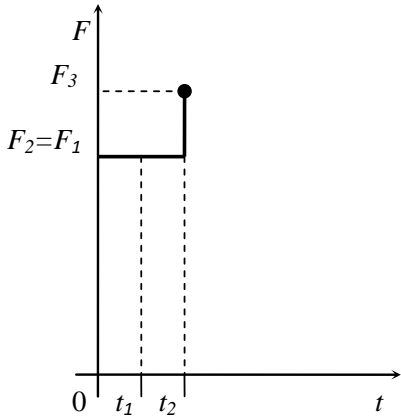
13. Тимофеев Е.Г. Определение рациональных геометрических параметров ударных узлов машин по физико-механическим свойствам разрушаемого объекта автоматизированными средствами проектирования / Е.Г. Тимофеев, И.А. Жуков // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2020. – №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.

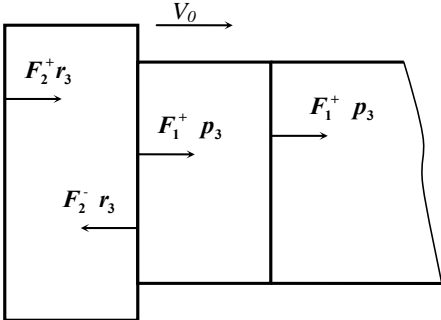
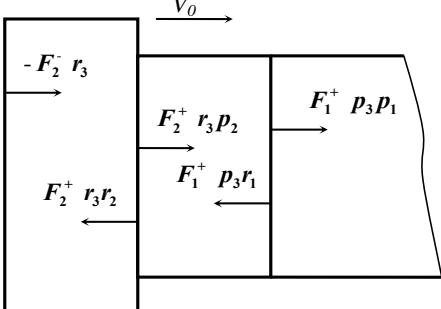
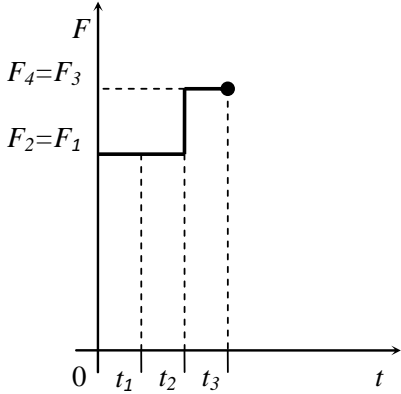
ПРИЛОЖЕНИЯ

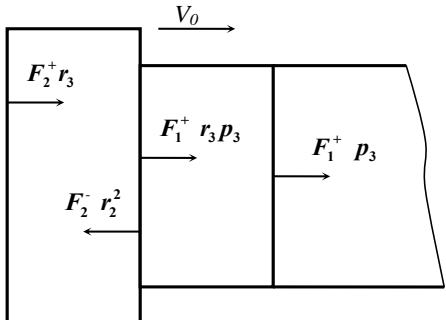
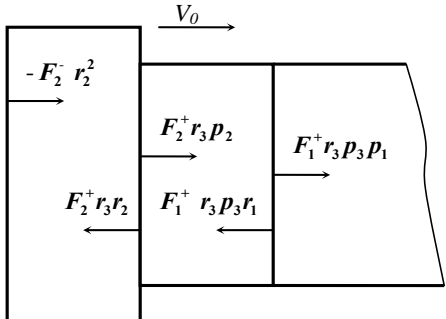
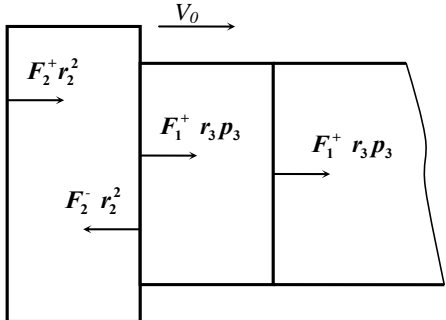
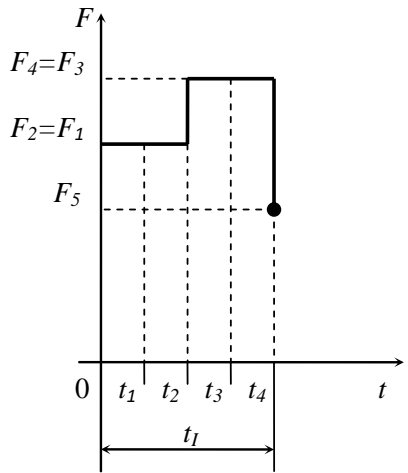
ПРИЛОЖЕНИЕ А

Пошаговый расчет ударного импульса от ступенчатого бойка, выполненного в виде двух цилиндрических ступеней

№ п/п	Время	Схема формирования сил в ударнике и волноводе	График ударного импульса
1	<p>$t = 0$ Момент нанесения удара</p>	<p>Формирование сил в ударнике:</p>  <p>Упрощение сил: $F_1^+ p_1 = F_1^+ l = F_1^+$; $F_1^+ r_1 = F_1^+ 0 = 0$; $F_2^+ p_2 + F_1^- r_3 = kS_2 \frac{2S_1}{S_1 + S_2} - kS_1 \frac{S_2 - S_1}{S_1 + S_2} =$ $= kS_1 = F_1^+$ - сложение сил справа от границы; $F_2^+ r_2 + F_1^- p_3 = kS_2 \frac{S_1 - S_2}{S_2 + S_1} - kS_1 \frac{2S_2}{S_2 + S_1} =$ $= -kS_2 = F_2^-$ - сложение сил слева от границы; $-F_2^- = F_2^+$ - полное отражение от неударного торца бойка.</p> <p>Новая силовая схема удара:</p> 	 <p>$F_1 = F_1^+$ - величина силы, прошедшей в волновод в момент удара</p>
2	<p>$t_1 = l_1 \sqrt{\frac{\rho}{E}}$</p>		

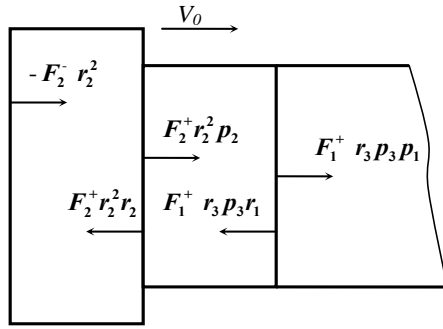
		<p>Упрощение сил:</p> $F_1^+ p_1 = F_1^+ l = F_1^+; F_1^+ r_1 = F_1^+ 0 = 0$ $F_2^+ p_2 = kS_2 \frac{2S_1}{S_1 + S_2} = kS_1 \frac{2S_2}{S_1 + S_2} = F_1^+ p_3$ <p>Данное преобразование важно тем, что геометрия данной задачи определяет величину коэффициента прохождения p_3, как: $p_3 > 1$. Получается соотношение для сил: $F_2^+ p_3 > F_1^+$, это необходимо для построения графика ударного импульса.</p> $F_2^+ r_2 = kS_2 \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} = -kS_2 \frac{S_2 - S_1}{S_1 + S_2} = F_2^- r_3$ <p>Данное преобразование показывает, что происходит изменение направления силы F_2^+ с сопутствующим уменьшением ее величины, т.к. $-1 < r_3 < 0$; $-F_2^- = F_2^+$</p> <p>Новая силовая схема удара:</p> 	 <p>$F_2 = F_1 = F_1^+$ - величина силы через промежуток времени t_1</p>
<p>3</p>	<p>$t_2 = 2l_1 \sqrt{\frac{\rho}{E}}$</p>	<p>Упрощение сил:</p> $F_1^+ p_3 p_1 = F_1^+ p_3 l = F_1^+ p_3;$ $F_2^+ p_2 r_1 = F_2^+ p_2 0 = 0;$ $F_2^+ p_2 = kS_2 \frac{2S_1}{S_1 + S_2} = kS_1 \frac{2S_2}{S_1 + S_2} = F_1^+ p_3;$ $F_2^+ r_2 = kS_2 \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} = -kS_2 \frac{S_2 - S_1}{S_1 + S_2} = F_2^- r_3$ $-F_2^- r_3 = F_2^+ r_3$ 	 <p>$F_3 = F_2^+ p_2 = F_1^+ p_3$ $F_2 > F_1$</p>

		<p>Новая силовая схема удара:</p> 	
<p>4</p>	<p>$t_3 = 3l_1 \sqrt{\frac{\rho}{E}}$</p>	 <p>Упрощение сил:</p> $F_1^+ p_3 p_1 = F_1^+ p_3 l = F_1^+ p_3$ $F_2^+ p_2 r_1 = F_2^+ p_2 0 = 0$ $F_2^+ r_3 p_2 = k S_2 \frac{S_2 - S_1}{S_2 + S_1} \frac{2 S_1}{S_2 + S_1} =$ $= k S_1 \frac{S_2 - S_1}{S_2 + S_1} \frac{2 S_2}{S_2 + S_1} = F_1^+ r_3 p_3$ <p>т.к. $S_2 > S_1$, получается, что произведение $r_3 p_3$ лежит в промежутке: $0 < r_3 p_3 < 1$. Из этого следует, что сила $F_1^+ r_3 p_3 < F_1^+$. Это доказывается математикой задачи и подтверждается законом сохранения энергии.</p> $F_2^+ r_3 r_2 = k S_2 \frac{S_2 - S_1}{S_2 + S_1} \frac{S_1 - S_2}{S_2 + S_1} =$ $= k S_2 \frac{-(S_1 - S_2)}{S_2 + S_1} \frac{S_1 - S_2}{S_2 + S_1} =$ $= -k S_2 r_2 r_2 = F_2^- r_2^2$ <p>т.к. величина $r_2 < 1$, следовательно $r_2^2 \ll 1$ (увеличивается порядок малости), что говорит о существенном падении величин сил, т.к. запас энергии аккумулированной при ударе уходит в волновод.</p> $-F_2^- r_3 = F_2^+ r_3$	 <p>$F_4 = F_3 = F_2^+ p_2 = F_1^+ p_3$</p>
		<p>Новая силовая схема удара:</p>	

			
<p>5</p> <p>Момент выхода первой волны ударного импульса</p>		 <p>Упрощение сил:</p> $F_1^+ r_3 p_3 p_1 = F_1^+ r_3 p_3 l = F_1^+ r_3 p_3 < F_1^+,$ $F_1^+ r_3 p_3 r_1 = F_1^+ r_3 p_3 0 = 0$ $F_2^+ r_3 p_2 = k S_2 \frac{S_2 - S_1}{S_2 + S_1} \frac{2 S_1}{S_2 + S_1} =$ $= k S_1 \frac{S_2 - S_1}{S_2 + S_1} \frac{2 S_2}{S_2 + S_1} = F_1^+ r_3 p_3$ $F_2^+ r_3 r_2 = k S_2 \frac{S_2 - S_1}{S_2 + S_1} \frac{S_1 - S_2}{S_2 + S_1} =$ $= k S_2 \frac{-(S_1 - S_2)}{S_2 + S_1} \frac{S_1 - S_2}{S_2 + S_1} =$ $= -k S_2 r_2 r_2 = F_2^- r_2^2$ $-F_2^- r_2^2 = F_2^+ r_2^2$ <p>Новая силовая схема удара:</p> 	 <p>$F_5 = F_1^+ r_3 p_3 < F_1$</p>

6

$$t_5 = 5l_1 \sqrt{\frac{\rho}{E}}$$



Упрощение сил:

$$F_1^+ r_3 p_3 p_1 = F_1^+ r_3 p_3 l = F_1^+ r_3 p_3 < F_1^+$$

$$F_1^+ r_3 p_3 r_1 = F_1^+ r_3 p_3 0 = 0$$

$$F_2^+ r_2^2 p_2 = kS_2 \frac{(S_1 - S_2)^2}{(S_1 + S_2)^2} \frac{2S_1}{S_1 + S_2} =$$

$$= kS_1 \frac{(-(S_2 - S_1))^2}{(S_1 + S_2)^2} \frac{2S_2}{S_1 + S_2} =$$

$$= F_1^+ \frac{(S_2 - S_1)^2}{(S_1 + S_2)^2} p_3 = F_1^+ r_3^2 p_3$$

Т.к. $|r_3| < 1$, получается, что $r_3^2 \ll 1$ из

этого следует: $F_1^+ r_3^2 p_3 < F_1^+ r_3 p_3$

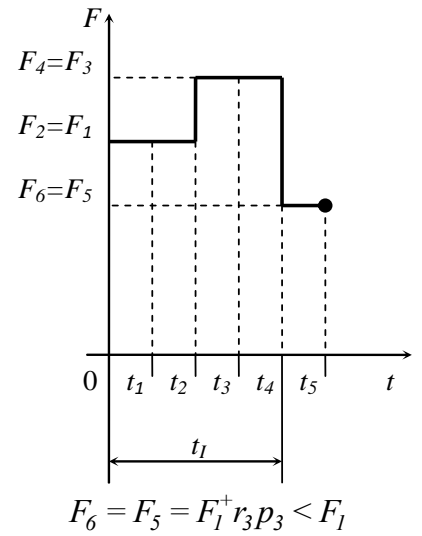
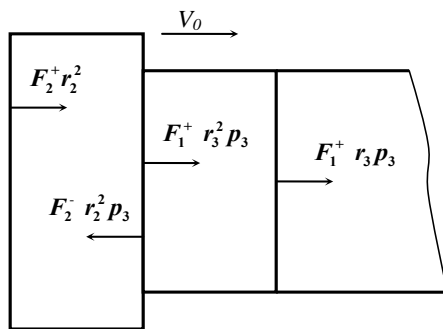
$$F_2^+ r_2^2 r_2 = kS_2 r_2^2 \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} =$$

$$= kS_2 r_2^2 \frac{-(S_2 - S_1)}{S_1 + S_2} = -kS_2 r_2^2 r_3 =$$

$$= F_2^- r_2^2 r_3$$

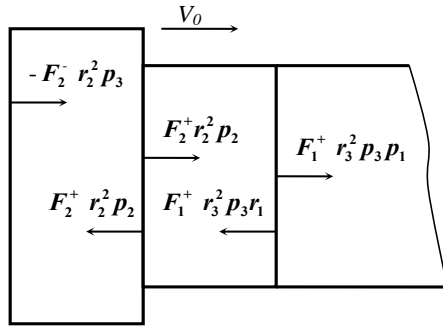
$$-F_2^- r_2^2 = F_2^+ r_2^2$$

Новая силовая схема удара:



7

$$t_6 = 6l_1 \sqrt{\frac{\rho}{E}}$$



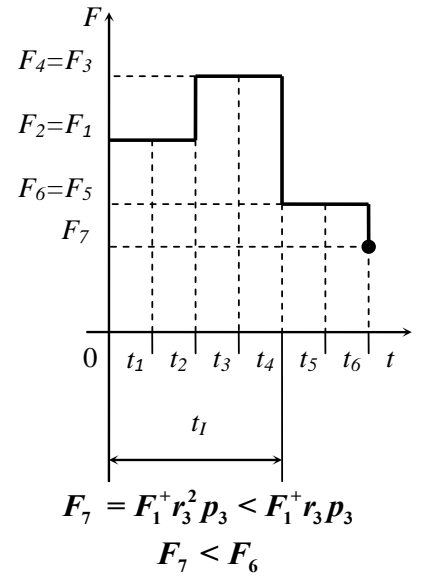
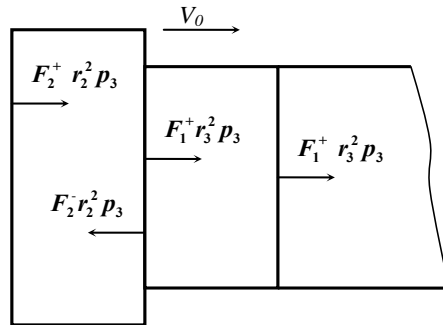
Упрощение сил:

$$\begin{aligned} F_1^+ r_3^2 p_3 p_1 &= F_1^+ r_3^2 p_3 l = \\ &= F_1^+ r_3^2 p_3 < F_1^+ r_3 p_3 \\ F_1^+ r_3^2 p_3 r_1 &= F_1^+ r_3^2 p_3 0 = 0 \\ F_2^+ r_2^2 p_2 &= kS_2 \frac{(S_1 - S_2)^2}{(S_1 + S_2)^2} \frac{2S_1}{S_1 + S_2} = \\ &= kS_1 \frac{(-(S_2 - S_1))^2}{(S_1 + S_2)^2} \frac{2S_2}{S_1 + S_2} = \\ &= F_1^+ \frac{(S_2 - S_1)^2}{(S_1 + S_2)^2} p_3 = F_1^+ r_3^2 p_3 \end{aligned}$$

т.к. $r_2^2 = r_3^2$:

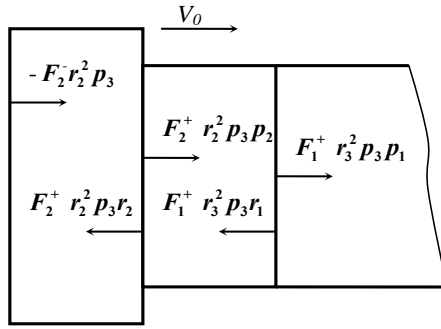
$$\begin{aligned} F_2^+ r_2^2 r_2 &= kS_2 r_2^2 \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} = \\ &= kS_2 r_2^2 \frac{-(S_2 - S_1)}{S_1 + S_2} = -kS_2 r_2^2 r_3 = F_2^- r_2^2 r_3 \\ -F_2^- r_2^2 p_3 &= F_2^+ r_2^2 p_3 \end{aligned}$$

Новая силовая схема удара:



8

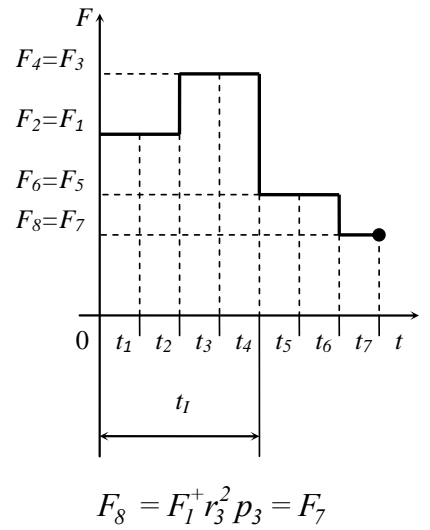
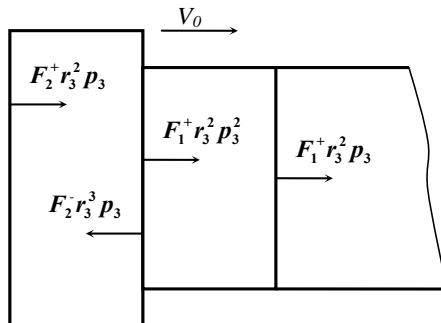
$$t_7 = 7l_1 \sqrt{\frac{\rho}{E}}$$



Упрощение сил:

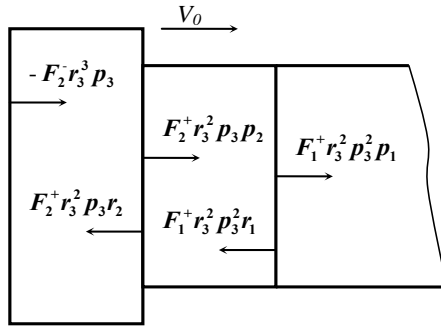
$$\begin{aligned} F_1^+ r_3^2 p_3 p_1 &= F_1^+ r_3^2 p_3 l = \\ &= F_1^+ r_3^2 p_3 < F_1^+ r_3 p_3 \\ F_1^+ r_3^2 p_3 r_1 &= F_1^+ r_3^2 p_3 0 = 0 \\ F_2^+ r_2^2 p_3 p_2 &= k S_2 r_2^2 \frac{2S_2}{S_1 + S_2} \frac{2S_1}{S_1 + S_2} = \\ &= k S_1 r_2^2 \frac{2S_2}{S_1 + S_2} \frac{2S_2}{S_1 + S_2} = F_1^+ r_2^2 p_3^2 \\ \text{т.к. } r_2^2 &= r_3^2 : \\ F_2^+ r_2^2 p_3 p_2 &= F_1^+ r_3^2 p_3^2 \\ F_2^+ r_2^2 p_3 r_2 &= F_2^+ r_3^2 p_3 \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} = \\ &= F_2^+ r_3^2 p_3 \frac{-(S_2 - S_1)}{S_1 + S_2} = -F_2^+ r_3^2 p_3 r_3 = \\ &= F_2^- r_3^3 p_3 \\ -F_2^- r_2^2 p_3 &= F_2^+ r_3^2 p_3 \end{aligned}$$

Новая силовая схема удара:



9

$t_8 = 8l_1 \sqrt{\frac{\rho}{E}}$
 Момент
 выхода
 второй
 волны
 ударного
 импульса



Упрощение сил:

$$F_1^+ r_3^2 p_3^2 p_1 = F_1^+ r_3^2 p_3^2 l = F_1^+ r_3^2 p_3^2$$

Т.к. $|r_3| < 1$ и $|p_3| < 1$, получается:

$$r_3^2 \ll 1 \text{ и } p_3^2 \ll 1$$

$$F_1^+ r_3^2 p_3^2 < F_1^+ r_3^2 p_3$$

$$F_1^+ r_3^2 p_3^2 r_1 = F_1^+ r_3^2 p_3^2 0 = 0$$

$$F_2^+ r_3^2 p_3 p_2 = kS_2 r_3^2 p_3 \frac{2S_1}{S_1 + S_2} =$$

$$= kS_1 r_3^3 p_3 \frac{2S_2}{S_1 + S_2} = F_1^+ r_3^2 p_3^2$$

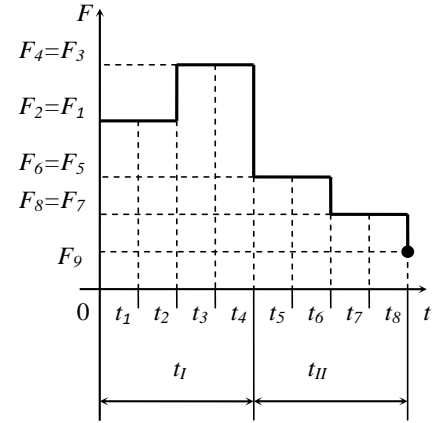
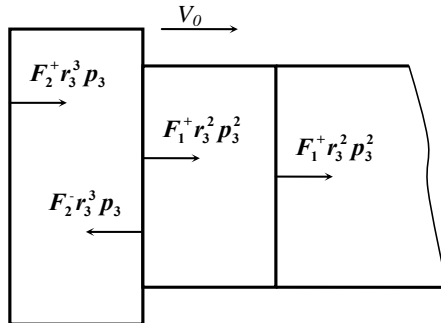
$$F_2^+ r_3^2 p_3 r_2 = F_2^+ r_3^2 p_3 \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} =$$

$$= F_2^+ r_3^2 p_3 \frac{-(S_2 - S_1)}{S_1 + S_2} = -F_2^+ r_3^2 p_3 r_3 =$$

$$= F_2^- r_3^3 p_3$$

$$-F_2^- r_3^3 p_3 = F_2^+ r_3^2 p_3$$

Новая силовая схема удара:



$$F_8 = F_7 = F_1^+ r_3^2 p_3$$

$$F_9 = F_1^+ r_3^2 p_3^2$$

Учитывая $F_1^+ r_3^2 p_3^2 < F_1^+ r_3^2 p_3$

получим:

$$F_9 < F_8$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Листинг функции parse, реализованной на языке программирования Object Pascal:

```

interface
uses
Classes, SysUtils, LCLProc;
const
nlex = 12; {доступные функции}
lexems : array [1..nlex] of string = (' sin' , ' cos' , ' arctan' , ' sqr' , ' sqrt' , ' exp' , ' ln' , ' abs' , ' trunc' , ' frac' , ' round' , ' pi' );
max = 80; {максимальное число лексем, задающих функции}
maxlen = 10; {максимальная длина одной лексемы, задающей функцию}
var
lex : array[1..max] of string[maxlen]; {массив строк для ввода лексем}
types : array[1..max] of char; {массив символов для лексем}
numbers : array[1..max] of real; {массив вещественных чисел для расчета}
clex : integer; {целочисленная переменная для ввода числа лексем}
runerror : string; {строковая переменная для ошибки времени исполнения}
function parse (s : string, x : real, var err : string) : real;
implementation
function lowercase (s : string) : string; {функция для нижнего регистра}
begin
lowercase := UTF8LowerCase(s);
end;
function alltrim (s : string) : string; {функция для удаления лишних пробелов}
var p : integer;
begin
repeat p := pos(' ', s), if p > 0 then delete (s, p, 1); until p = 0, alltrim := s;
end;
procedure pack_lexems (n1, n2 : integer, x : real); {процедура для упаковки массивов лексем}
var i, k : integer, st : string[maxlen];
begin
if (n1 > n2) or (n1 < 1) or (n2 > clex) then exit, k := n2 - n1;
for i := n2 + 1 to clex do
begin
lex[i - k] := lex[i]; types[i - k] := types[i]; numbers[i - k] := numbers[i];
end;
str(x : maxlen, st); {неточно}
numbers[n1] := x; {копия}
lex[n1] := st; types[n1] := ' n' , dec(clex, k);
end;
function number (n1 : integer, x : real) : real; {функция для обработки чисел}
var r : real; er : integer;
begin
if (types[n1] = ' f' ) and (lex[n1] = ' pi' ) then r := pi
else if types[n1] = ' x' then r := x

```

```

else begin
if abs(numbers[n1]) > 1E - 8 then r := numbers[n1] {копия числа}
else begin
val(lex[n1], r, er);
if er <> 0 then begin runerror := 'âð ÷ ãä :'+lex[n1]; r := 0;
end; end; end;
number := r;
end;
function number_skob (n1 : integer, x : real) : real; {функция для числа в скобках}
var r : real;
begin
r := number(n1 + 1, x); pack_lexems (n1, n1 + 2, r); number_skob := r;
end;
function do_oper (n : integer, x : real) : real; {функция для вычисления арифметики}
var r : real;
begin
if lex[n] = '*' then r := number(n - 1, x) * number(n + 1, x) else if lex[n] = '/' then begin
r := number(n + 1, x);
if r = 0 then begin
runerror := 'äââââ ã 0'; r := 0;
end
else r := number(n - 1, x) / r;
end
else if lex[n] = '+' then r := number(n - 1, x) + number(n + 1, x)
else if lex[n] = '-' then r := number(n - 1, x) - number(n + 1, x);
pack_lexems (n - 1, n + 1, r);
do_oper := r;
end;
procedure pack_number_sign (i : integer, x : real); {процедура для удаления знака числа на поз. i}
var k : integer; r : real;
begin
k := 0;
if lex[i] = '+' then k := 1 else if lex[i] = '-' then k := -1;
if k <> 0 then begin
r := k * number (i + 1, x), pack_lexems (i, i + 1, r);
end; end;
function oper (n1 : integer, x : real) : real; {функция для выполнения арифметических операций}
label again;
var i : integer; r : real;
begin
again :
for i := 1 to clex do begin {удаление "лишних" знаков «+» и «-» в числах}
if (types[i] = 'o') and ((lex[i] = '+') or (lex[i] = '-')) then begin
if (i = 1) and ((types[2] = 'x') or (types[2] = 'n'))
or (
(i < clex) and

```

```

((types[i + 1] = 'x' ) or (types[i + 1] = 'n' )) and
((types[i - 1] = '(' ) or (types[i + 1] = 'o' ))) then begin
  pack_number_sign (i, x);
end; end; end;
if (lex[nl] = '(' ) and (lex[nl + 2] = ')' ) then begin {определение чисел в скобках}
  oper := number(nl + 1, x); exit;
end
else begin
  i := nl + 1;
  while (types[i] <> ')' ) and (i <= clex) do begin
    if (lex[i] = '*' ) or (lex[i] = '/' ) then begin {*, /}
      do_oper (i, x);
      goto again; {возвращение для проверки на новые "висячие" знаки «+», «-»}
    end
    else inc(i); end;
  i := nl + 1;
  while (types[i] <> ')' ) and (i <= clex) do begin
    if (lex[i] = '+' ) or (lex[i] = '-' ) then begin {+, -}
      do_oper (i, x); goto again;
    end
    else inc(i);
  end;
  if (lex[i - 2] = '(' ) and (lex[i] = ')' ) then begin {остался x}
    oper := number(i - 1, x); exit;
  end
  else if clex = 1 then begin {остался x}
    oper := number(1, x);
    exit; end;
  {«-x» или «+x» не остаются, т.к. убраны выше}
end; end;
function func(f : string, nl : integer, x : real) : real; {функция для вычисления значений
стандартных функций, заданных лексемами}
var r, r2 : real;
begin
  r := oper(nl, x);
  if f = 'sin' then begin r2 := sin(r);
  end
  else if f = 'cos' then begin r2 := cos(r);
  end
  else if f = 'arctan' then begin r2 := arctan(r);
  end
  else if f = 'sqr' then begin r2 := sqr(r);
  end
  else if f = 'sqrt' then begin
    if r < 0 then begin
      runerror := 'ôîðáíí  из отрицательного числа :'+f;
      r2 := 0;

```

```

end
else r2 := sqrt(r); end
else if f = 'exp' then begin if abs(r) > 88 then begin runerror := 'переполнение :'+f;
r2 := 0; end
else r2 := exp(r); end
else if f = 'ln' then begin
if r <= 0 then begin
runerror := 'логарифм от числа <= 0 :'+f;
r2 := 0; end
else r2 := ln(r); end
else if f = 'abs' then begin
r2 := abs(r); end
else if f = 'trunc' then begin
r2 := trunc(r); end
else if f = 'frac' then begin
r2 := frac(r); end
else if f = 'round' then begin r2 := round(r);
end;
pack_lexems (n1 - 1, n1 + 2, r2); func := r2;
end;
function find_oper (n1 : integer) : integer; {найти логарифм выражения с поз. n1}
var n2, k : integer;
begin
n2 := n1 + 1; k := 0;
repeat
if types[n2] = ')' then break;
if not ( (types[n2] = 'n' ) or (types[n2] = 'x' ) or (types[n2] = 'o' ) or
(types[n2] = 'f' ) and (lex[n2] = 'pi' )) then inc (k);
inc(n2);
until n2 = clex;
if k = 0 then find_oper := n2 else find_oper := 0;
end;
function skobka(n1 : integer, x : real) : real; {функция для разбора круглых скобок}
var n2, k, er : integer, r : real;
begin
n2 := n1 + 1; k := 0;
repeat
if types[n2] = '(' then r := skobka(n2, x);
if types[n2] = ')' then begin
if k = 0 then break;
dec(k); end;
inc(n2);
if n2 = clex then break;
until false;
{здесь разбираем самые внутренние скобки}
if n1 > 1 then begin

```

```

if types[n1-1] = ' f' then begin
  r := func(lex[n1-1],n1,x);
end
else begin
  n2 := find_oper(n1);
  if n2 <> 0 then r := oper(n1,x);
end;
end
else begin
  n2 := find_oper(n1);
  if n2 <> 0 then r := oper(n1,x);
end;
end
if (types[n1] = '(' ) and (types[n1+2] = ')' ) then begin
  skobka := number_skob(n1,x);
  exit; end; end;
function kol_items(c : char) : integer; {число лексем типа = «c»}
var i,k : integer;
begin
  k := 0; for i := 0 to clex do if types[i] = c then inc(k);
  kol_items := k;
end;
function eval (x : real, var r : real) : boolean; {логическая функция для главной оценки}
begin runerror := '';
repeat
  r := skobka(l,x);
  if runerror <> '' then begin
    eval := false, exit;
  end;
until kol_items('(') = 0; r := oper(l,x);
  if runerror <> '' then begin
    eval:=false; exit; end;
  eval := true; end;
function check_rool(pred, cur : char, lexem0, lexem1 : string) : boolean;
{логическая функция для проверки правил чередования лексем}
begin
  check_rool := false;
  case pred of ' S': begin
    if (cur = ' f' ) or (cur = ' n' ) or (cur = ' x' ) or (cur = '(' ) or
    (cur = ' o' ) and ((lexem1 = '-' ) or (lexem1 = '+' )) then check_rool := true;
  end;
  ' f': begin
    if lexem0 <> ' pi' then begin
      if cur = '(' then check_rool := true;
    end
  else begin
    if (cur = ' o' ) or (cur = ')' ) then check_rool := true;
  end;
end;
end;

```

```

')':begin  end; end;
      'n':begin
if (cur ='o' ) or (cur =' ' ) or (cur ='E' ) then check_root := true;
end;
'o':begin
if (cur ='n' ) or (cur ='x' ) or (cur ='(' ) or (cur ='f' ) then check_root := true;
end;
'x':begin
if (cur ='o' ) or (cur =' ' ) or (cur ='E' ) then check_root := true;
end;
'(':begin
if (cur ='x' ) or (cur ='f' ) or (cur ='n' ) or (cur ='(' ) or
(cur ='o' ) and ((lexem1 ='+' ) or (lexem1 ='-' )) then check_root := true;
end;
')':begin
if (cur =' ' ) or (cur ='o' ) or (cur ='E' ) then check_root := true;
end; end; end;
function get_lexem_arrays (s,s0 : string, var e : string) : boolean;
{формирование массива лексем}
var type0,type1 : char;
l,start1,end1 : integer; lexem0,lexem1 : string;
begin
s0 := s0+'E'; type0 :='S'; type1 := s0[1]; l := length(s); start1 := 1; clex := 0; lexem0 :='';
while start1 <= l do begin
end1 := start1;
if (s0[end1] ='(' ) or (s0[end1] =' ' ) then inc(end1)
else begin
while s0[end1] = type1 do begin
if end1 > l then break;
inc(end1);
end; end;
lexem1 := copy(s,start1,end1 - start1);
if length(lexem1) > maxlen then begin
e :='слишком длинная лексема :'+lexem1;
get_lexem_arrays := false, exit;
end;
if (check_root(type0,type1,lexem0,lexem1) = false) then begin
e :='Неверная последовательность действий :'+copy(s,start1,l - start1);
get_lexem_arrays := false; exit;
end;
inc(clex); lex[clex] := lexem1; lexem0 := lexem1;
types[clex] := type1; type0 := type1;
type1 := s0[start1 + length(lexem1)]; inc(start1,length(lexem1));
end;
lexem0 := lexem1; lexem1 :='';
if (check_root(type0,type1,lexem0,lexem1) = false) then begin

```

```

e := 'Неверное последнее действие';
get_lexem_arrays := false; exit;
end;
get_lexem_arrays := true;
end;
function replace_strings (sold, snew : string, var s : string) : integer;
{замена «sold» на «snew» в строке «s»; определит общее число замен}
var n, p : integer;
begin
n := 0;
repeat
p := pos(sold, s);
if p > 0 then begin
delete (s, p, length(sold)); insert (snew, s, p); inc(n);
end;
until p = 0; replace_strings := n;
end;
function check (var s : string, var e : string) : boolean; {логическая функция для главной проверки}
label next_i;
var l, k, k0, i, j, r : integer;
n : real;
s0, s1 : string;
begin
l := length(s); k := 0;
{отслеживание скобок }
for i := 1 to l do begin
if s[i] = '(' then inc (k) else if s[i] = ')' then dec(k);
if k < 0 then begin
e := 'Несбалансированная скобка'; check := false; exit;
end; end;
if k <> 0 then begin
e := 'Непарные скобки'; check := false; exit;
end;
{обработать последовательности знаков «+», «-»}
repeat
k := 0;
inc(k, replace_strings ('++', '+', s)); inc(k, replace_strings ('--', '+', s));
inc(k, replace_strings ('+-', '-', s)); inc(k, replace_strings ('-+', '-', s));
until k = 0;
{организация разбора на лексемы}
l := length(s);
s0 := '';
for i := 1 to l do s0 := concat(s0, s[i]);
{выбор числа}
i := 1, next_i :
while i <= l do begin
for j := l downto i do begin

```

```

s1 := copy (s, i, j - i + 1), val (s1, n, r);
if r = 0 then begin
  for k := i to j do
    begin s0[k] := 'n' ; end;
  if (s[i] = '+' ) or (s[i] = '-' ) then begin {отслеживание лишних «+» и «-» из введенных чисел}
    if (i > 1) and (s[i - 1] <> '+' ) and (s[i - 1] <> '-' ) and (s[i - 1] <> '(' ) then
      s0[i] := 'o' ;
    end;
    i := j + 1; goto next_i;
  end; end;
  inc (i);
  end;
  {расстановка скобок, определяющих приоритет операции}
  k := 0;
  for i := 1 to l do begin
    case s[i] of
      '+', '-': if (s0[i] <> 'n' ) then s0[i] := 'o' ;
      '*', '/': s0[i] := 'o' ;
      '(', ')': s0[i] := s[i];
    end; end;
  {отслеживание стандартных функций}
  k := -1;
  repeat
    k := pos(' ', s0);
    if k > 0 then begin
      j := k;
      while s0[k] = ' ' do begin
        inc(k);
        if k > l then break;
      end;
      s1 := copy (s, j, k - j); k0 := 0;
      for i := 1 to nlex do begin
        if lexems[i] = s1 then begin
          for r := j to k - 1 do s0[r] := 'f' ;
          k0 := 1;
          break;
        end; end;
      if k0 = 0 then for r := j to k - 1 do s0[r] := ' _ ' ;
      end
    until k = 0;
    for i := 1 to l do if (s[i] = 'x' ) and (s0[i] = ' _ ' ) then s0[i] := 'x' ;
  {оставшиеся последовательности неверны}
  for i := 1 to l do if (s0[i] = ' _ ' ) then begin
    e := 'Неизвестная лексема :'+copy(s, i, l - i + 1);
    check := false; exit;
  end;
  {определение правила для лексем}

```



```

if (get_lexem_arrays (s,s0,e) = false) then begin
  check := false; exit;
end;
check := true;
end;
function parse (s : string, x : real, var err : string) : real;
{главная функция для всего алгоритма парсера}
var r : real; i : integer;
begin
  err := '';
  s := alltrim(lowercase(s));
  if length(s) < 1 then begin
    err := 'Îøèáèà :: Строка пуста';
    parse := 0; exit;
  end;
  if check(s,err) = true then begin
    for i := 1 to clex do numbers[i] := 0;
    if eval(x,r) = true then begin
      parse := r;
      exit;
    end
  else err := 'Ошибка вычисления :'+rerror;
  end
  else err := 'Ошибка разбора :'+err,
  end;
end .

```

ПРИЛОЖЕНИЕ В

*Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ,
разработанных Е.Г.Тимофеевым:*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015662766

Ударный импульс 2.0

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный индустриальный университет» (RU)**


Авторы: **Тимофеев Евгений Геннадьевич (RU),
Жуков Иван Алексеевич (RU)**

Заявка № **2015619792**

Дата поступления **13 октября 2015 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **01 декабря 2015 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Ивлиев**



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017613900

Удар многоступенчатым бойком

Правообладатели: *Тимофеев Евгений Геннадьевич (RU), Жуков Иван Алексеевич (RU), Молчанов Виктор Вячеславович (RU)*

Авторы: *Тимофеев Евгений Геннадьевич (RU), Жуков Иван Алексеевич (RU), Молчанов Виктор Вячеславович (RU)*

Заявка № 2016662568

Дата поступления 22 ноября 2016 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 03 апреля 2017 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019619495

Удар бойком сложной геометрической формы

Правообладатели: *Тимофеев Евгений Геннадьевич (RU), Жуков Иван Алексеевич (RU)*

Авторы: *Тимофеев Евгений Геннадьевич (RU), Жуков Иван Алексеевич (RU)*



Заявка № 2019618226

Дата поступления 05 июля 2019 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 18 июля 2019 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019619331

**Синтез геометрических параметров ударных узлов машин
в зависимости от физико-механических свойств
разрушаемого объекта**

Правообладатели: *Тимофеев Евгений Геннадьевич (RU), Жуков Иван
Алексеевич (RU)*

Авторы: *Тимофеев Евгений Геннадьевич (RU),
Жуков Иван Алексеевич (RU)*



Заявка № **2019618249**

Дата поступления **05 июля 2019 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **16 июля 2019 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Листинги программ:

1. Ударный импульс 2.0

Interface

Uses

Classes, SysUtils, FileUtil, TAgGraph, TAsSeries, Forms, Controls, Graphics, Dialogs, StdCtrls, ComCtrls, Unit2, types;

type

{ TForm1 }

TForm1 = class(TForm)

Button1 : TButton; Button2 : TButton; Button3 : TButton; Chart1 : TChart;

Chart1LineSeries1 : TLineSeries;

Chart2 : TChart; Edit1 : TEdit; Edit2 : TEdit; Edit3 : TEdit; Edit4 : TEdit; Edit5 : TEdit; Edit7 : TEdit;

Edit8 : TEdit; Edit9 : TEdit; GroupBox1 : TGroupBox;

GroupBox2 : TGroupBox; GroupBox3 : TGroupBox; GroupBox4 : TGroupBox; Label1 : TLabel;

Label10 : TLabel; Label12 : TLabel; Label13 : TLabel; Label14 : TLabel; Label16 : TLabel; Label17 :

TLabel; Label18 : TLabel; Label19 : TLabel; Label2 : TLabel; Label20 : TLabel; Label21 : TLabel;

Label11 : TLabel; Label22 : TLabel; Label23 : TLabel; Label24 : TLabel; Label25 : TLabel; Label26 :

TLabel; Label27 : TLabel; Label29 : TLabel; Label30 : TLabel; Label31 : TLabel; Label32 : TLabel;

Label33 : TLabel; Label34 : TLabel; Label4 : TLabel; Label5 : TLabel; Label15 : TLabel; Label3 :

TLabel; Label6 : TLabel; Label7 : TLabel; Label8 : TLabel; Label9 : TLabel; PageControl1 :

TPageControl; TabSheet1 : TTabSheet; TabSheet2 : TTabSheet;

procedure Button1Click(Sender : TObject); procedure Button2Click(Sender : TObject);

procedure Button3Click(Sender : TObject); procedure FormCreate(Sender : TObject);

procedure EditExit(Sender : TObject); procedure EditKeyPress(Sender : TObject, var Key : char);

procedure GroupBox1Click(Sender : TObject); procedure GroupBox2Click(Sender : TObject);

procedure Label15Click(Sender : TObject); procedure Label20Click(Sender : TObject);

procedure Label21Click(Sender : TObject); procedure Label2Click(Sender : TObject);

procedure PageControl1Change(Sender : TObject); procedure TabSheet1ContextPopup(Sender :

TObject; MousePos : TPoint;

var Handled : Boolean;

private

{private declarations}

public

{public declarations}

end;

var

Form1 : TForm1;

e : string[255]; t : real; r, rr, x : real; shag, t1 : integer;

l, m, p, dx, v1, e1, v0, pogr, f0, fmax, k1, tpv : real;

d : array[0..2000] of real; b : array[0..5000] of real;

Chart1LineSeries1 : TLineSeries;

MySerie1, MySerie2, MySerie3, MySerie4 : TLineSeries;

s, q, rrr : array [0..20000] of real; a1 : array[0..2000, 0..20000] of real;

f : array [0..20000] of real;

```

implementation
{$R *.lfm}
procedure TForm1.EditKeyPress(Sender : TObject, var Key : Char);
begin
if not (Key in [#8,'0'..'9','-',',','.',']) then
begin
Key := #0;
exit; end;
if (Key = '.' ) or (key = ',' ) then
begin
key := decimalseparator;
if Pos(decimalseparator, (Sender as TEdit).Text) > 0 then Key := #0;
end;
if (key = '-' ) and ((Sender as TEdit).SelStart <> 0) then Key := #0;
end;
procedure TForm1.GroupBox1Click(Sender : TObject);
begin end;
procedure TForm1.GroupBox2Click(Sender : TObject);
begin end;
procedure TForm1.Label15Click(Sender : TObject);
begin end;
procedure TForm1.Label20Click(Sender : TObject);
begin end;
procedure TForm1.Label21Click(Sender : TObject);
begin end;
procedure TForm1.Label2Click(Sender : TObject);
begin end;
procedure TForm1.PageControl1Change(Sender : TObject);
begin end;
procedure TForm1.TabSheet1ContextPopup(Sender : TObject, MousePos : TPoint;
var Handled : Boolean;
begin end;
procedure TForm1.EditExit(Sender : TObject);
var sifra : real;
begin
try
sifra := strtofloat((sender as tedit).text);
Except
on EConverterror do ShowMessage(' недопустимые данные !!! ');
end; end;
procedure TForm1.Button1Click(Sender : TObject);
var
strf : string;
i:integer;
k,m1,dl :real;
begin

```

```

form1.Button2.Enabled:=true;
strf := form1.edit4.text;m := strtofloat(edit1.Text); p := strtofloat(edit2.Text)* 1E - 9;
dx := strtofloat(edit3.Text); e1 := strtofloat(edit7.text)* 1E + 8, v1 := sqrt(e1/p);
k:=dx/2; m1:=0; i:=1;
while m1<m do
begin
d[i]:= parse(strf,k,e)*2;
m1:=m1+p*pi*d[i]*d[i]/4*dx; k:=k+dx; shag:=i; i:=i+1;
end;
shag:=shag+1; l:=k-dx+dx/2; hag:=shag-1; pogr:=(abs(m-m1)/m)*100;
Label4.caption:='Длина бойка: '+floattostrf(l,ffgeneral,4,1)+' мм';
Label11.caption:='Количество цилиндрических ступеней: '+inttostr(shag);
Label20.caption:='Диаметр ударного торца: '+floattostrf(d[1],ffgeneral,3,1)+' мм';
Label5.caption:='Диаметр неударного торца: '+floattostrf(parse(strf,l,e)*2,ffgeneral,3,1)+' мм';
Label15.Caption:='Погрешность: '+floattostrf(pogr,ffgeneral,1,1)+' %';
Label8.caption:='Скорость звука в материале: '+floattostrf(v1*1E-3,ffgeneral,5,1)+' м/с';
Chart1.ClearSeries;
MySerie1:=TLineSeries.Create(Chart1); MySerie2:=TLineSeries.Create(Chart1);
MySerie1.LinePen.Color:=clblack; MySerie2.LinePen.Color:=clblack;
MySerie2.LinePen.Width:=3; MySerie1.LinePen.Width:=3;
Chart1.AddSeries(MySerie1); Chart1.AddSeries(MySerie2);
mySerie1.AddXY(0, 0); mySerie2.AddXY(0, 0); dl:=l/2000;
for i:=1 to 2000 do
begin
b[i]:=parse(strf,i*dl,e);
mySerie1.AddXY(i*dl, b[i]); mySerie2.AddXY(i*dl,-b[i]);
end;
mySerie1.AddXY((i+1)*dl, 0); mySerie2.AddXY((i+1)*dl, 0);
end; {Button1Click}
Procedure TForm1.Button2Click(Sender : TObject);
var
i, k, n, j, z, m, il, tt, kk : integer;
begin
form1.Button3.Enabled := true; t1 := round(strtoffloat(edit9.Text));
edit9.Text := inttostr(t1);
// расчеты - - математика
dx := strtofloat(edit3.Text); d[0] := strtofloat(edit5.text); v0 := strtofloat(edit8.text)/1E + 1;
t := dx/v1* 1000000, for k := 0 to shag do
s[k] := pi * sqr(d[k])/4;
For n := 1 to shag do
begin
q[n] := 2 * s[n - 1]/(s[n - 1] + s[n]); rrr[n] := (s[n - 1] - s[n])/(s[n - 1] + s[n]);
end;

```



```

For n := (shag + 1) to (2 * shag - 1) do
begin
q[n] := 2 * s[n - shag + 1] / (s[n - shag + 1] + s[n - shag]);
rrr[n] := (s[n - shag + 1] - s[n - shag]) / (s[n - shag + 1] + s[n - shag]);
end;
For j := 1 to shag do
begin
z := 2 * j - 1; a1[z, 1] := e1 * s[j] * v0 / (2 * v1); z := 2 * j; a1[z, 1] := -e1 * s[j] * v0 / (2 * v1);
end;
f[1] := a1[1, 1] * q[1] * 9.81 / 1000;
for i := 1 to t1 do for m := 1 to shag do
begin
if (m = shag) then A1[m * 2 - 1, i + 1] := -A1[2 * m, i]
else A1[2 * m - 1, i + 1] := A1[2 * m, i] * Rrr[shag + m] + A1[2 * m + 1, i] * Q[m + 1];
if (m = 1) then A1[2 * m, i + 1] := A1[2 * m - 1, i] * Rrr[2 * m - 1]
else A1[2 * m, i + 1] := A1[2 * m - 1, i] * Rrr[m] + A1[2 * m - 2, i] * Q[shag + m - 1];
end;
for i := 1 to (T1 - 1) do F[i + 1] := A1[1, i + 1] * Q[1] * 9.81 / 1000;
// построение итогового графика
Chart2.ClearSeries; MySerie3 := TLineSeries.Create(Chart2); MySerie3.LinePen.Color := clblack;
MySerie2.LinePen.Width := 3; Chart2.AddSeries(MySerie3); MySerie3.AddXY(0, f[1]);
for i := 1 to t1 do
begin
mySerie3.AddXY(i * t, f[i]); mySerie3.AddXY(i * t, f[i + 1]);
end; end;
// процедура расчета параметров ударного импульса
procedure TForm1.Button3Click(Sender : TObject);
var
i : integer; e0, er, k, l0, t0, er2, et0 : real;
begin
f0 := F[1]; fmax := f0;
for i := 2 to t1 do if (f[i] > fmax) then fmax := f[i];
k1 := fmax / f0; l0 := (4 * m) / (p * pi * sqrt(d[0])); t0 := 2 * l0 / v1 * 1e6; e0 := f[1] * t0; tpv := 2 * l / v1 * 1E6;
et0 := 0;
for i := 1 to round(t0 / t) do et0 := et0 + f[i] * t;
k := t; er := 0; i := 1;
while k <= tpv do
begin
er := er + f[i] * t; i := i + 1; k := k + t;
end;
k := t; er2 := 0; i := 1;
while k <= (2 * tpv) do
begin
er2 := er2 + f[i] * t; i := i + 1; k := k + t;
end;
// вывод расчетов параметров ударного импульса
Label16.caption := 'Начальное значение силы удара: ' + floattostrf(f[1], ffgeneral, 5, 2) + ' кН';

```

```

Label17.caption:='Максимальное значение силы удара: '+floattostrf(fmax, ffgeneral, 5,2)+' кН';
Label18.caption:='Время первой волны: '+floattostrf(tpv, ffgeneral, 4,2)+ 'мс';
Label19.caption:='Коэффициент усиления k: '+Floattostrf(k1, ffgeneral,4,3);
Label21.Caption:='Импульс силы первой волны от удара'+#$0D+#$0A +'смоделированным
бойком: '+floattostrf(er, ffgeneral,5,2)+' кН мкс';
Label13.caption:='Импульс силы 2-х волн от удара'+#$0D+#$0A +'смоделированным
бойком: '+floattostrf(er2, ffgeneral,5,2)+' кН мкс';
end;
procedure TForm1.FormCreate(Sender : TObject);
begin
form1.Button2.enabled := false; form1.Button3.Enabled := false;
end; end.

```

2. Удар многоступенчатым бойком

```

interface
uses
Classes, SysUtils, FileUtil, TAGraph, TASeries, Forms, Controls,
Graphics, Dialogs, ComCtrls, StdCtrls, ExtCtrls, Unit2;
type
{TForm1}
TForm1 = class(TForm)
Button1 : TButton; //расчет модели бойка
Button2 : TButton; //расчет импульса
Button3 : TButton; //расчет параметров импульса
Chart1 : TChart; Chart2 : TChart; GroupBox1 : TGroupBox; GroupBox3 : TGroupBox;
GroupBox4 : TGroupBox; GroupBox5 : TGroupBox;
Label1 : TLabel; //организация ввода диаметра ударного торца
Label10 : TLabel; Label11 : TLabel; Label12 : TLabel; Label13 : TLabel;
Label14 : TLabel; //организация ввода длины бойка
Label16 : TLabel; //организация расчета диаметра неударного торца
Label17 : TLabel; //погрешность
Label19 : TLabel; //начальное значение силы удара
Label2 : TLabel; //скорость звука в материале бойка
Label20 : TLabel; //максимальное значение силы удара
Label21 : TLabel; //коэффициент k
Label22 : TLabel; //время первой волны
Label24 : TLabel; //энергия от удара
Label3 : TLabel; Label4 : TLabel; Label5 : TLabel; Label6 : TLabel; Label7 : TLabel;
Label8 : TLabel; Label9 : TLabel;
LabeledEdit1 : TLabeledEdit; //функция образующей 1 ступени
LabeledEdit17 : TLabeledEdit; LabeledEdit18 : TLabeledEdit;
LabeledEdit2 : TLabeledEdit; //длина 1 ступени
LabeledEdit3 : TLabeledEdit; //функц 2 ступени
LabeledEdit4 : TLabeledEdit; //длина 2 ступени
LabeledEdit5 : TLabeledEdit; //функц 3 ступени
LabeledEdit6 : TLabeledEdit; //длина 3 ступени

```

```

LabeledEdit7: TLabeledEdit; //количество расчетных шагов 2-ая вкл
LabeledEdit10: TLabeledEdit; //количество цилиндрических ступеней
LabeledEdit11: TLabeledEdit; //масса
LabeledEdit12: TLabeledEdit; //плотность
LabeledEdit15: TLabeledEdit; //модуль упругости
LabeledEdit16: TLabeledEdit; //предударная скорость
PageControl1 : TPageControl; StatusBar1 : TStatusBar; TabSheet1 : TTabSheet;
TabSheet2: TTabSheet;
Chart1LineSeries1: TLineSeries;
procedure Button1Click(Sender : TObject); procedure Button2Click(Sender : TObject);
procedure Button3Click(Sender : TObject); procedure float_EditExit(Sender : TObject);
procedure float_keyPress(Sender : TObject, var Key : char);
procedure integer_EditKeyPress(Sender : TObject, var Key : char);
procedure FormCreate(Sender : TObject);
procedure integer_exitEdit(Sender : TObject);
procedure LabeledEdit16Change(Sender : TObject);
procedure LabeledEdit1Change(Sender : TObject);
procedure string_KeyPress(Sender : TObject, var Key : char);
private {private declarations}
public { public declarations }
end;
var
Form1 : TForm1;
e : string[255]; // ошибки парсинга
input_count : integer; // кол-во ступеней
input_strf: array[1..3] of string; // массив для хранения строки функции
input_L: array[1..3] of real; //длины ступеней
Chart1LineSeries1: TLineSeries;
MySerie1,MySerie2,MySerie3,MySerie4: TLineSeries;
input_massa:real; //ввод массы
input_p:real; //ввод плотности
input_e:real; //ввод модуля юнга
input_v0:real;//предударная скорость бойка
input_n:integer;//количество расчетных цилиндрических ступеней
input_n1:integer;//количество расчетных шагов для графика импульса 2 вкладка
input_d0:real; //ввод диаметра волновода
r_l:real;//длина бойка
r_v:real;//скорость звука в материале бойка
r_d1:real;//диаметр ударного торца
r_d:real;//диаметр неударного торца
r_pogr:real;//погрешность
r_ob:real;//реальный объем бойка
r_obr:real;//расчетный объем бойка
r_l1:real; //длина единичной цилиндрической ступени ---> dl

```

```

s:array [0..500] of real;// массив площадей цилиндрических ступеней
dl:real;//высота одной цилиндрической ступени
d_n:real;//накопление длины бойка (расчетное)
d_v:real;//накопление объема бойка (расчетное)
t1:integer; //количество расчетных шагов
q,rrr:array[1..20000]of real; a1:array[0..2000, 0..20000] of real; f:array [0..20000] of real;
implementation
{$R * .lfm}{ TForm1 }
procedure TForm1.FormCreate(Sender : TObject);
begin
//StatusBar1.SimpleText:='    пример вывода в строку статуса ----->    Выберите
количество ступеней бойка ';
form1.LabeledEdit10.Text:='1'; form1.LabeledEdit3.Enabled:=false;
form1.LabeledEdit4.Enabled:=false; form1.LabeledEdit5.Enabled:=false;
form1.LabeledEdit6.Enabled := false; form1.Button2.Enabled := false;
form1.Button3.Enabled := false;
end;
procedure TForm1.integer_EditKeyPress(Sender : TObject, var Key : Char);
// только цифры, плюс и минус
begin
if not (Key in [#8,'0'..'9', '-']) then
begin
Key := #0;
exit;
end;
if (key = '-') and ((Sender as TLabelEdit).SelStart <> 0) then Key := #0;
end;
procedure TForm1.float_keyPress(Sender: TObject; var Key: char);
begin
if not (Key in [#8,'0'..'9', '-', '.', ',']) then
begin
Key := #0, exit; end;
if (Key = '.') or (key = ',') then
begin
key := decimalseparator;
if Pos(decimalseparator, (Sender as TLabelEdit).Text) > 0 then Key := #0;
end;
if (key = '-') and ((Sender as TLabelEdit).SelStart <> 0) then Key := #0;
end;
procedure TForm1.string_KeyPress(Sender : TObject, var Key : char);
begin
if not (Key in [#8,'0'..'9', 'a'..'z', '-', '.', ',', '+', '*', '^', '/', '(', ')']) then
begin
Key := #0; exit; end;
if (Key = '.') or (key = ',') then key := decimalseparator;

```

```

end;
procedure TForm1.integer_exitEdit(Sender: TObject);
// обработка исключения ошибки преобразования строки в целое число
var
sifra: integer;
begin
try sifra:=StrToInt((sender as TLabeledEdit).text);
Except on EConverterError do ShowMessage(' недопустимые данные !');
end; end;
procedure TForm1.LabeledEdit16Change(Sender : TObject),begin end;
procedure TForm1.float_EditExit(Sender :TObject);
var
sifra: real;
// обработка исключения ошибки преобразования строки в вещественное число
begin
try if (sender as TLabelededit).text <> " then
sifra:=strtofloat((sender as TLabelededit).text);
Except on EConverterError do ShowMessage(' недопустимые данные !');
end; end;
procedure TForm1.LabeledEdit1Change(Sender: TObject);
begin //открывает окна для ввода
if labeledEdit10.text='1' then
begin
form1.LabeledEdit3.Enabled:=false; form1.LabeledEdit4.Enabled:=false;
form1.LabeledEdit5.Enabled:=false; form1.LabeledEdit6.Enabled:=false;
end;
if labeledEdit10.text='2' then
begin
form1.LabeledEdit3.Enabled:=true; form1.LabeledEdit4.Enabled:=true;
form1.LabeledEdit5.Enabled:=false; form1.LabeledEdit6.Enabled:=false;
end;
if labeledEdit10.text='3' then
begin
form1.LabeledEdit3.Enabled := true, form1.LabeledEdit4.Enabled := true;
form1.LabeledEdit5.Enabled := true, form1.LabeledEdit6.Enabled := true;
end; end;
procedure TForm1.Button1Click(Sender : TObject);
var
graph_n:integer;//количество точек графика
i,i1:longint; dx, i2,L :real;
begin
form1.button2.Enabled:=true;
input_count:=strtoint( labeledEdit10.text);
if input_count > 3 then

```

```

begin labeledEdit10.text:='3';
input_count:=3;
end;
for i:= 1 to input_count do
case i of 1:
begin
input_strf[i]:=form1.labeledEdit1.text;
input_L[i]:= strtofloat(form1.labeledEdit2.text);
end;
2: begin
input_strf[i]:=form1.labeledEdit3.text;
input_L[i]:= strtofloat(form1.labeledEdit4.text);
end;
3: begin
input_strf[i]:=form1.labeledEdit5.text; input_L[i]:= strtofloat(form1.labeledEdit6.text);
end; end;
// ---- построение внешнего вида бойка -----
Chart1.ClearSeries;
MySerie1:=TLineSeries.Create(Chart1); MySerie2:=TLineSeries.Create(Chart1);
MySerie1.LinePen.Color:=clblack; MySerie2.LinePen.Color:=clblack;
MySerie1.LinePen.Width:=3; MySerie2.LinePen.Width:=3;
Chart1.AddSeries(MySerie1); Chart1.AddSeries(MySerie2);
i2:=0; graph_n:=100;
for i:=1 to input_count do
begin
dx:= input_L[i]/graph_n;
mySerie1.AddXY(i2,0); mySerie2.AddXY(i2,0);
for i1:=0 to graph_n do
begin
mySerie1.AddXY(i2,parse(input_strf[i],i2,e)); mySerie2.AddXY(i2,-parse(input_strf[i],i2,e));
i2:=i2+dx;
end;
mySerie1.AddXY(i2-dx,0); mySerie2.AddXY(i2-dx,0);
i2:=i2-dx;
end;
// ---- конец построение внешнего вида бойка -----
// ввод и расчет сопутствующих параметров бойка 1 вкладка
input_n:=strtoint (form1.LabeledEdit17.text); //ввод количества единичных цилиндрических
ступеней
L:=0;
for i:=1 to input_count do L:=L+input_L[i]; //расчет длины бойка
r_l:=L; //расчет длины бойка
dl:=r_l/input_n;
form1.Label14.Caption:=' Длина бойка:  '+ floattostr(r_l)+' мм';
r_d1:=2*parse(input_strf[1],0,e);
form1.Label1.Caption:=' Диаметр ударного торца:  '+ floattostr(r_d1)+' мм';

```

```

r_d:=2*parse(input_strf[input_count],r_l,e);
form1.Label16.Caption:=' Диаметр неударного торца: '+ floattostrf(r_d, ffgeneral, 3,1)+' мм';
input_p:=strtofloat(form1.LabeledEdit12.text)*1e-9;
input_e:= strtofloat(form1.LabeledEdit15.text)*1e+8;
r_v:=sqrt(input_e/input_p);
form1.Label2.Caption:=' Скорость звука в материале бойка: '+ floattostrf(r_v/1e+3,
ffgeneral, 5,1)+' м/с';
input_massa:= strtofloat(form1.LabeledEdit11.text);
r_ob:=input_massa/input_p; //расчет реального объема бойка
input_v0:= strtofloat(form1.LabeledEdit16.text)*1E+3;
input_d0:= strtofloat(form1.LabeledEdit18.text);
//расчет объема бойка через накопление объемов цилиндрических ступеней
dl:=r_v/input_n; //высота расчетной цилиндрической ступени
d_n:=dl/2; // приращение длины бойка
d_v:=0; s[0]:=pi*sqr(input_d0/2); //площадь волновода
d_v:=0; i:=1;
while d_n<r_l do
begin
if (d_n>0) and (d_n<input_L[1]) then s[i]:=pi*sqr(parse(input_strf[1],d_n,e));
if (d_n>=input_L[1]) and (d_n<input_L[1]+input_L[2]) then
s[i]:=pi*sqr(parse(input_strf[2],d_n,e));
if (d_n>=input_L[1]+input_L[2]) {and (d_n<input_L[1]+input_L[2]+input_L[3])} then
s[i]:=pi*sqr(parse(input_strf[3],d_n,e));
d_n:=d_n+dl; d_v:=d_v+s[i]*dl; i:=i+1;
end;
r_pogr:=abs(d_v-r_ob)/r_ob*100; //расчет погрешности
form1.Label13.Caption:=' Длина единичной цилиндрической ступени: '+ floattostrf(dl,
ffgeneral, 2,1)+' мм';
form1.Label17.Caption:=' Îĩãðøŷŷŷ : '+ floattostrf(r_pogr, ffgeneral, 2,2)+' %';
end;
procedure TForm1.Button2Click(Sender : TObject);
var
shag,n,i, k, j, z, m, i1, kk:integer;// количество расчетных шагов
dx,v1,e1,v0,t:real;
begin
form1.button3.Enabled:=true;
t1:=strtoint((form1.LabeledEdit7.text)); //ввод количества расчетных шагов
dx:=dl;//высота цилиндрической ступени
v1:= r_v;//скорость звука в материале бойка и волновода
e1:=input_e;//модуль упругости материала бойка и волновода
v0:=strtofloat((form1.LabeledEdit16.text))*1E+3; //предударная скорость бойка
t:=dx/v1*1000000;
shag:=input_n;
For n:=1 to shag do//расчет коэффициентов отражения и прохождения
begin
q[n]:=2*s[n-1]/(s[n-1]+s[n]); rrr[n]:=(s[n-1]-s[n])/(s[n-1]+s[n]);

```

```

end;
//блок математики из maple
For n := (shag + 1) to (2 * shag - 1) do
begin
q[n] := 2 * s[n - shag + 1] / (s[n - shag + 1] + s[n - shag]);
rrr[n] := (s[n - shag + 1] - s[n - shag]) / (s[n - shag + 1] + s[n - shag]);
end;
For j := 1 to shag do
begin
z:=2*j-1; a1[z, 1]:=e1*s[j]*v0/(2*v1); z:=2*j; a1[z, 1]:=-e1*s[j]*v0/(2*v1);
end;
f[1] := a1[1,1] * q[1] * 9.81/10000000;
for i := 1 to t1 do
for m := 1 to shag do
begin
if (m = shag) then A1[m*2 - 1, i + 1] := -A1[2*m, i]
else A1[2*m - 1, i + 1] := A1[2*m, i] * Rrr[shag + m] + A1[2*m + 1, i] * Q[m + 1];
if (m=1) then A1[2*m, i+1]:=A1[2*m-1, i]*Rrr[2*m-1] else
A1[2*m, i + 1] := A1[2*m - 1, i] * Rrr[m] + A1[2*m - 2, i] * Q[shag + m - 1];
end;
for i := 1 to (T1 - 1) do
F[i + 1] := A1[1, i + 1] * Q[1] * 9.81/10000000;
//построение графика ударного импульса
Chart2.ClearSeries; MySerie3:=TLineSeries.Create(Chart2);
MySerie3.LinePen.Color:=clblack; MySerie2.LinePen.Width:=3;
Chart2.AddSeries(MySerie3); MySerie3.AddXY(0, f[1]);
i:=1;
for i := 1 to t1 do
begin
mySerie3.AddXY(i * t, f[i]);
mySerie3.AddXY(i * t, f[i + 1]);
end; end;
procedure TForm1.Button3Click(Sender : TObject);
var
f0, fmax, k, t0, t3, E0, E1, E3, t, u : real; i : integer;
begin
f0 := f[1]; // значение силы F0
fmax:=f[1]; //максимальное значение силы удара
For i:=1 to t1 do if f[i]>fmax then fmax:=f[i]; //расчет максимальной силы удара
k:=fmax/f0; //определение коэффициента k
t0:=2*r_l/r_v*1e+6; //расчет времени первой волны
E0:=t0*f0; //единичная энергия от удара цилиндрическим бойком
//расчет энергии первой волны
t:=dl/r_v*1000000; u:=t; i:=1; E1:=0;
while u<=t0 do
begin

```



```

E1:=E1+t*f[i]; u:=u+t; i:=i+1;
end;
//расчет энергии от двух первых волн
u:=t; i:=1; E3:=0;
while u<=2*t0 do
begin
E3:=E3+t*f[i]; u:=u+t; i:=i+1;
end;
form1.Label19.Caption:=' Начальное значение силы удара: '+ floattostrf(f0, ffgeneral,5,2)+'
кН';
form1.Label20.Caption:=' максимальное значение силы удара: '+ floattostrf(fmax,
ffgeneral,5,2)+' кН';
form1.Label21.Caption:=' Коэффициент усиления k: '+ floattostrf(k, ffgeneral,5,2);
form1.label22.caption:=' Время первой волны: '+ floattostrf(t0, ffgeneral, 4,2)+ ' мкс';
form1.label24.caption:=' Импульс силы первой волны от удара'+#$0D+#$0A+'
смоделированным бойком: '+floattostrf(E1, ffgeneral, 5,2)+ ' кН мкс';
form1.label5.caption:=' Импульс силы 2-х волн от удара'+#$0D+#$0A+' смоделированным
бойком: '+floattostrf(E3, ffgeneral, 5,2)+ ' кН мкс';
end; end.

```

3. Удар бойком сложной геометрической формы

interface

uses

*Classes, SysUtils, FileUtil, TAGraph, TASeries, Forms, Controls, Graphics,
Dialogs, StdCtrls, ComCtrls, types;*

type

{TForm1}

TForm1 = class(TForm)

Button1 : TButton; Button2 : TButton; Button3 : TButton; Button4 : TButton;

Chart1 : TChart; Chart1LineSeries1 : TLineSeries; Chart2 : TChart;

Edit1 : TEdit; Edit2 : TEdit; Edit3 : TEdit; Edit4 : TEdit; Edit7 : TEdit; Edit8 : TEdit; Edit9 : TEdit;

GroupBox1 : TGroupBox; GroupBox2 : TGroupBox; GroupBox3 : TGroupBox;

GroupBox4 : TGroupBox;

Label1 : TLabel; Label10 : TLabel; Label13 : TLabel; Label14 : TLabel; Label15 : TLabel;

Label16 : TLabel; Label17 : TLabel; Label18 : TLabel; Label19 : TLabel; Label2 : TLabel;

Label21 : TLabel; Label11 : TLabel; Label22 : TLabel; Label23 : TLabel; Label24 : TLabel;

Label25 : TLabel; Label26 : TLabel; Label27 : TLabel; Label29 : TLabel; Label30 : TLabel;

Label31 : TLabel; Label32 : TLabel; Label33 : TLabel; Label34 : TLabel; Label35 : TLabel;

Label4 : TLabel; Label5 : TLabel; Label3 : TLabel; Label6 : TLabel; Label7 : TLabel;

Label8 : TLabel; Label9 : TLabel;

OpenDialog1 : TOpenDialog; PageControl1 : TPageControl;

TabSheet1 : TTabSheet; TabSheet2 : TTabSheet;

procedure Button1Click(Sender : TObject); procedure Button2Click(Sender : TObject);

procedure Button3Click(Sender : TObject); procedure Button4Click(Sender : TObject);

procedure FormCreate(Sender : TObject); procedure EditExit(Sender : TObject);

procedure EditKeyPress(Sender : TObject, var Key : char);

```

procedure TabSheet1ContextPopup(Sender : TObject, MousePos : TPoint;
var Handled : Boolean; private {private declarations}
public public declarations }
end;
var
Form1 : TForm1;
plo:text;//переменная файла для хранения площадей цилиндрических ступеней
e: string[255];
t : real;
r,rr,x:real;
shag,t1,i,inn:integer;
l, m,p,dx,v1,e1,v0,pogr,f0,fmax,k1,tpv:real;
d,sn: array[0..2000] of real;
b:array[0..5000]of real;
Chart1LineSeries1: TLineSeries;
MySerie1,MySerie2,MySerie3,MySerie4: TLineSeries;
s, q, rrr: array [0..20000] of real;
a1:array[0..2000, 0..20000] of real;
f:array [0..20000] of real;
implementation
{$R *.lfm}
procedure TForm1.EditKeyPress(Sender : TObject, var Key : Char);
begin
if not (Key in [#8,'0'..'9' ,'-','.',',','']) then
begin
Key := #0;
exit;
end;
if (Key = '.') or (key=',') then
begin
key:=decimalseparator;
if Pos(decimalseparator, (Sender as TEdit).Text) > 0 then Key := #0 ;
end;
if (key='-') and ((Sender as TEdit).SelStart <> 0) then Key := #0 ;
end;
procedure TForm1.TabSheet1ContextPopup(Sender: TObject; MousePos: TPoint;
var Handled: Boolean);
begin
end;
procedure TForm1.EditExit(Sender: TObject);
var
sifra: real;
begin
try
sifra:=strtofloat((sender as tedit).text);
Except

```

```

on EConvertererror do ShowMessage(' недопустимые данные !');
end; end;
procedure TForm1.Button1Click(Sender : TObject);
var
i, pix, prov : integer; k, m1, dl : real;
begin
form1.Button2.Enabled:=true;
m:= strtofloat(edit1.Text);//ввод массы
p:= strtofloat(edit2.Text)/1E9;//ввод плотности
dx:= strtofloat(edit3.Text);//ввод длины единичной цилиндрической ступени
e1:=strtofloat(edit7.text)*1E+8;//ввод модуля упругости
d[0]:=strtofloat(edit4.Text);//ввод диматра волновода
sn[0]:=3.14*sqr(d[0])/4;//расчет площади поперечного сечения волновода
k:=dx/2;
v1:=sqrt(e1/p);//расчет скорости звука в материале
i:=1;
//---!!!!!!-----путь к файлу на диске-----!!!!!!-----
// assignfile(plo,'D:\Block\sq1.txt');reset(plo);
//---!!!!!!-----
while not(eof(plo)) do// создание исходного массива площадей
begin
read(plo,sn[i]); //Showmessage(floattostr(sn[i]));
i:=i+1;
end;
inn:=i-1;// итоговое значение количества цилиндрических ступеней
l:=dx*inn;
For i:=1 to inn do
d[i]:=sqrt(4*sn[i]/3.14);
label7.caption:='Диаметр ударного торца : '+floattostrf(d[1], ffgeneral, 3, 1)+' мм';
label4.caption:='Длина бойка: '+floattostr(l)+' мм';
label8.caption:='Скорость звука в материале: '+floattostrf(v1*1E-3, ffgeneral, 5, 1)+' м/с';
label11.caption:='Количество цилиндрических ступеней: '+inttostr(inn);
Label5.caption:='Диаметр неударного торца: '+floattostrf(d[i], ffgeneral, 3, 1)+' мм';
//Label15.Caption:='Погрешность: '+floattostrf(pogr, ffgeneral, 1, 1)+' %';
Chart1.ClearSeries;
MySerie1:=TLineSeries.Create(Chart1); MySerie2:=TLineSeries.Create(Chart1);
MySerie1.LinePen.Color:=clblack; MySerie2.LinePen.Color:=clblack;
MySerie2.LinePen.Width:=3; MySerie1.LinePen.Width:=3;
Chart1.AddSeries(MySerie1); Chart1.AddSeries(MySerie2);
mySerie1.AddXY(0, 0); mySerie2.AddXY(0, 0);
pix:=1000; dl:=l/pix;
for i:=1 to pix do
begin
prov:=trunc((i*dl)/dx)+1; b[prov]:=d[prov]/2;
mySerie1.AddXY(i*dl, b[prov]); mySerie2.AddXY(i*dl, -b[prov]);
end;

```

```

mySerie1.AddXY((i+1)*dl, 0); mySerie2.AddXY((i+1)*dl, 0) ;
end;
{Button1Click} procedure TForm1.Button2Click(Sender : TObject);
var
i, k, n, j, z, m, i1, tt, kk : integer;
begin
form1.Button3.Enabled := true; t1 := round(strtfloat(edit9.Text));
dx := strtfloat(edit3.Text); v0 := strtfloat(edit8.text)/1E + 1;
t := dx/v1*1000000; shag:=inn;
For n:=1 to shag do
begin
q[n]:=2*sn[n-1]/(sn[n-1]+sn[n]); rrr[n]:=(sn[n-1]-sn[n])/(sn[n-1]+sn[n]);
end;
For n:= (shag+1) to (2*shag-1) do
begin
q[n]:=2*sn[n-shag+1]/(sn[n-shag+1]+sn[n-shag]);
rrr[n]:=(sn[n-shag+1]-sn[n-shag])/(sn[n-shag+1]+sn[n-shag]);
end;
For j := 1 to shag do
begin
z := 2 * j - 1; a1[z, 1] := e1 * sn[j] * v0/(2 * v1); z := 2 * j; a1[z, 1] := -e1 * sn[j] * v0/(2 * v1);
end;
f[1] := a1[1, 1] * q[1] * 9.81/1000;
for i := 1 to t1 do
for m := 1 to shag do
begin
if (m = shag) then A1[m * 2 - 1, i + 1] := -A1[2 * m, i]
else A1[2 * m - 1, i + 1] := A1[2 * m, i] * Rrr[shag + m] + A1[2 * m + 1, i] * Q[m + 1];
if (m = 1) then A1[2 * m, i + 1] := A1[2 * m - 1, i] * Rrr[2 * m - 1]
else A1[2 * m, i + 1] := A1[2 * m - 1, i] * Rrr[m] + A1[2 * m - 2, i] * Q[shag + m - 1];
end;
for i := 1 to (T1 - 1) do
f [i + 1] := A1[1, i + 1] * Q[1] * 9.81/1000;
//построение итогового графика
Chart2.ClearSeries; MySerie3 := TLineSeries.Create(Chart2);
MySerie3.LinePen.Color := clblack; MySerie3.LinePen.Width := 3;
Chart2.AddSeries(MySerie3); mySerie3.AddXY(0, f[1]), i := 1;
for i := 1 to t1 do
begin
mySerie3.AddXY(i * t, f[i]); mySerie3.AddXY(i * t, f[i + 1]);
end; end;
procedure TForm1.Button3Click(Sender : TObject); // процедура расчета параметров ударного
импульса
var
i:integer; e0,er,k,l0,t0,er2,et0:real;
begin

```

```

f0:=F[1]; fmax:=f0;
for i:=2 to t1 do if (f[i] > fmax) then fmax:=f[i];
k1:=fmax/f0; l0:=(4*m)/(p*pi*sqr(d[0])); t0:=2*l0/v1*1e6; e0:=f[1]*t0; tpv:=2*l/v1*1E6;
et0:=0;
for i:=1 to round(t0/t) do et0:=et0+f[i]*t;
k:=t; er:=0; i:=1;
while k<=tpv do
begin
er:=er+f[i]*t; i:=i+1; k:=k+t;
end;
k:=t; er2:=0; i:=1;
while k<=(2*tpv) do
begin
er2:=er2+f[i]*t; i:=i+1; k:=k+t;
end;
//вывод расчетов параметров ударного импульса
Label16.caption:='Начальное значение силы удара: '+floattostrf(f[1], ffgeneral, 5,2)+' кН';
Label17.caption:='Максимальное значение силы удара: '+floattostrf(fmax, ffgeneral, 5,2)+' кН';
Label18.caption:='Время первой волны: '+floattostrf(tpv, ffgeneral, 4,2)+ 'мкс';
Label19.caption:='Коэффициент усиления k: '+floattostrf(k1, ffgeneral, 4,3);
Label21.caption:='Импульс силы первой волны от '+#$0D+#$0A +'удара смоделированным
бойком: '+floattostrf(er, ffgeneral, 5,2)+' кН мкс';
Label13.caption:='Импульс силы 2-х волн от удара'+#$0D+#$0A +'удара смоделированным
бойком: '+floattostrf(er2, ffgeneral, 5,2)+' кН мкс';
end;
procedure TForm1.Button4Click(Sender : TObject);
var
filename : string;
begin
if OpenFileDialog1.executethen
begin
filename := OpenFileDialog1.FileName; AssignFile (plo, filename);
Showmessage(filename); reset(plo); //CloseFile(open);
end;
end;
procedure TForm1.FormCreate(Sender : TObject);
begin
form1.Button2.enabled := false; form1.Button3.Enabled := false;
end; end.

```

4. Синтез геометрических параметров ударных узлов машин в зависимости от физико-механических свойств разрушаемого объекта

$u1 := P(h) = S * (\sigma[i] + \sigma[r]);$

$u2 := \text{diff}(h(t), t) = a/E * (\sigma[i] - \sigma[r]);$ - уравнения, описывающие внедрение инструмента в объект воздействия;

$\sigma[r] := 0$; - условие отсутствия отраженного импульса (отраженная от объекта воздействия энергия равна нулю);
 $evalf(u1)$;
 $evalf(u2)$; - упрощение уравнений, описывающих процесс внедрения инструмента в объект воздействия, с соблюдением условия отсутствия отраженного импульса;
 $\sigma[i] := solve(u2, \sigma[i])$; - расчет напряжения, возникающего под действием падающего ударного импульса;
 $evalf(u1); subs(diff(h(t), t) = diff(h(P), P) * diff(P(t), t), u1)$; - составление уравнения внедрения инструмента в объект воздействия с учетом отсутствия энергии, отраженной от объекта воздействия;
 $a/S/E * dt = diff(h(P), P) * dP(t)/P$; - составление дифференциального уравнения внедрения инструмента в объект воздействия;
 $u3 := int(a/S/E, t = 0..t) = int(diff(h(P), P)/P, P = P0..P)$; - составление интегрального уравнения внедрения инструмента в объект воздействия;
 $Ph := k1 + k2 * sqrt(k3^2 + h^2), k1 := -18.4, k2 := 5.9 * 10^4, k3 := 3.373 * 10^(-4)$; - аналитическое выражение, задающее кривую диаграммы «сила-внедрение» для объекта воздействия;
 $P0 := k1 + k2 * k3$; - начальное значение усилия прижатия инструмента к объекту воздействия;
 $plot(Ph, h = 0..3)$; - построение зависимости «сила-внедрение» по заданному аналитическому выражению;
 $E := 2 * 10^5$; - модуль упругости материала элементов ударного узла;
 $S[0] := Pi * 32^2/4$; - площадь сечения штанги, принимающей удар (волновода);
 $a := 5000 * 10^6$; - скорость звука;
 $hh := solve(P=Ph, h)$;
 $h := 0.1694915254e - 8 * (-5747786049. + 1000000000. * P^2 + 36800000000. * P)^(1/2)$; - функция, задающая глубину внедрения инструмента в объект воздействия;
 $diff(h, P)$; - дифференцирование функции, задающей глубину внедрения инструмента в объект воздействия;
 $t := solve(u3, t), t := S * E/a * int(diff(h, P)/P, P = P0..P)$; - расчет времени прохождения ударного импульса;
 $solve(%, P)$; - расчет усилия, возникающего в ударной системе при прохождении ударного импульса;
 $plot(P, t = 0..30 * 10^(-6))$; - построение кривой, задающей первую волну оптимального ударного импульса, в зависимости от характеристики объекта воздействия – «сила-внедрение»;
 $pi := 3.14; d[0] := 32; s[0] := Pi * d[0]^2/4; E := 215; V0 := 8 * 10^3$; - ввод численных значений: числа пи: $\pi=3.14$; диаметра волновода, мм; модуля упругости материалов соударяющихся стержней, кН/кв.мм; скорости бойка в момент удара, мм/с, расчет площади волновода, кв. мм;
 $k := E * V0 / (2 * a)$; - расчет коэффициента k ;
 $T := 160$; - определение количества единичных временных интервалов, для деления первой волны ударного импульса;
 $f(t) := 149/36 * t + 132.5$; - функция, задающая ударный импульс (его первую волну);
 $tp := 35.91797564$; - длительность первой волны, заданного импульса;
 $plot(f(t), t = 0..tp, f = 0..303)$; - построение графика первой волны заданного импульса;
 $t1 := tp/T; for i from 1 by 1 to T/2 do F[2*i - 1] := evalf(.5/t1 * int(f(t);$ - деление промежутка
 $t = 2 * t1 * (i - 1)..2 * t1 * i); F[2*i] := F[2*i - 1] od$;
 времени, определяющего длительность первой волны, заданного импульса, на интервалы времени равной длительности;
 $st := T/2$; - расчет числа цилиндрических ступеней, из которых будет составлен синтезируемый ударник;

$s[1] := F[1] * s[0] / (2 * k * s[0] - F[1]); d[1] := \text{evalf}(2 * \text{sqrt}(s[1] / \delta));$ - вычисление площади и диаметра первой ступени синтезируемого бойка;

$Q[1] := \text{evalf}(2 * s[1 - 1] / (s[1 - 1] + s[1])); R[1] := \text{evalf}((s[1 - 1] - [s1]) / (s[1 - 1] + s[1]));$ - вычисление коэффициентов отражения и прохождения импульсов на границе «ударник-волновод».

Комплексный (численно-аналитический) расчет площадей цилиндрических ступеней, составляющих ударник:

for k from 2 to st by 1 do

for n from 1 by 1 to k do

$Q[n] := \text{simplify}(2 * s[n - 1] / (s[n - 1] + s[n]));$

$R[n] := \text{simplify}((s[n - 1] - s[n]) / (s[n - 1] + s[n]));$ *od;*

*for n from (k + 1) by 1 to (k * 2 - 1) do*

$Q[n] := \text{simplify}(2 * s[n - k + 1] / (s[n - k + 1] + s[n - k]));$

$R[n] := \text{simplify}((s[n - k + 1] - s[n - k]) / (s[n - k + 1] + s[n - k]));$ *od;*

for j from 1 by 1 to k do

$A[2 * j - 1, 1] := \text{evalf}(E * s[j] * V0 / (2 * a));$

$A[2 * j, 1] := \text{evalf}(-E * s[j] * V0 / (2 * a));$ *od;*

*for i from 1 by 1 to 2 * k do*

for m from 1 by 1 to k do

if (m = k) then $A[m * 2 - 1, i + 1] := \text{simplify}((-A[2 * m, i]));$

else $A[2 * m - 1, i + 1] := \text{simplify}((A[2 * m, i] * R[k + m] + A[2 * m + 1, i] * Q[m + 1]));$ *fi od od ;*

*for i from 1 by 1 to (2 * k - 1) do*

for m from 1 by 1 to k do

if (m = 1) then $A[2 * m, i + 1] := \text{simplify}((A[2 * m - 1, i] * R[2 * m - 1]));$ *else*

$A[2 * m, i + 1] := \text{simplify}((A[2 * m - 1, i] * R[m] + A[2 * m - 2, i] * Q[k + m - 1]));$ *fi od od ;*

$ur[k] := \text{simplify}(F[2 * k - 1] = A[1, 2 * k - 1] * Q[1]);$

$s[k] := \text{fsolve}(ur[k], s[k]);$

*for i from 1 by 1 to 2 * k do*

for m from 1 by 1 to k do

if (m = k) then $A[m * 2 - 1, i + 1] := \text{evalf}((-A[2 * m, i]));$

else $A[2 * m - 1, i + 1] := \text{evalf}((A[2 * m, i] * R[k + m] + A[2 * m + 1, i] * Q[m + 1]));$ *fi ;*

if (m = 1) then $A[2 * m, i + 1] := \text{evalf}((A[2 * m - 1, i] * R[2 * m - 1]));$ *else*

$A[2 * m, i + 1] := \text{evalf}((A[2 * m - 1, i] * R[m] + A[2 * m - 2, i] * Q[k + m - 1]));$ *fi od od; od;*

for i from 1 by 1 to st do $d[i] := \text{evalf}(2 * \text{sqrt}(s[i] / \text{Pi}))$ *od* - расчет диаметров цилиндрических ступеней синтезируемого ударника;

$l := a * \text{tp} / 2 / 10^6;$ - расчет дины бойка, мм;

$ll := l / \text{st};$ - расчет длины одной цилиндрической ступени, мм;

Построение линии, образующей синтезируемый ударник:

$\text{plot}([0, 0], [(1 - 1) * ll, d[1] / 2], [1 * ll, d[1] / 2], [(2 - 1) * ll, d[2] / 2], [2 * ll, d[2] / 2],$

$[(3 - 1) * ll, d[3] / 2], [3 * ll, d[3] / 2], [(4 - 1) * ll, d[4] / 2], [4 * ll, d[4] / 2],$

$[(5 - 1) * ll, d[5] / 2], [5 * ll, d[5] / 2], [(6 - 1) * ll, d[6] / 2], [6 * ll, d[6] / 2],$

$[(7 - 1) * ll, d[7] / 2], [7 * ll, d[7] / 2], [(8 - 1) * ll, d[8] / 2], [8 * ll, d[8] / 2],$

$[(9 - 1) * ll, d[9] / 2], [9 * ll, d[9] / 2], [(10 - 1) * ll, d[10] / 2], [10 * ll, d[10] / 2],$

$[(11 - 1) * ll, d[11] / 2], [11 * ll, d[11] / 2], [(12 - 1) * ll, d[12] / 2], [12 * ll, d[12] / 2],$

$[(13 - 1) * ll, d[13] / 2], [13 * ll, d[13] / 2], [(14 - 1) * ll, d[14] / 2], [14 * ll, d[14] / 2],$

$[(15 - 1) * ll, d[15] / 2], [15 * ll, d[15] / 2], [(16 - 1) * ll, d[16] / 2], [16 * ll, d[16] / 2],$

$[(17 - 1) * ll, d[17] / 2], [17 * ll, d[17] / 2], [(18 - 1) * ll, d[18] / 2], [18 * ll, d[18] / 2],$

$[(19 - 1) * 11, d[19]/2], [19 * 11, d[19]/2], [(20 - 1) * 11, d[20]/2], [20 * 11, d[20]/2],$
 $[(21 - 1) * 11, d[21]/2], [21 * 11, d[21]/2], [(22 - 1) * 11, d[22]/2], [22 * 11, d[22]/2],$
 $[(23 - 1) * 11, d[23]/2], [23 * 11, d[23]/2], [(24 - 1) * 11, d[24]/2], [24 * 11, d[24]/2],$
 $[(25 - 1) * 11, d[25]/2], [25 * 11, d[25]/2], [(26 - 1) * 11, d[26]/2], [26 * 11, d[26]/2],$
 $[(27 - 1) * 11, d[27]/2], [27 * 11, d[27]/2], [(28 - 1) * 11, d[28]/2], [28 * 11, d[28]/2],$
 $[(29 - 1) * 11, d[29]/2], [29 * 11, d[29]/2], [(30 - 1) * 11, d[30]/2], [30 * 11, d[30]/2],$
 $[(31 - 1) * 11, d[31]/2].$

ПРИЛОЖЕНИЕ Д**Перечень внедрений результатов диссертационной работы:**

1. АКТ о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс Сибирского государственного индустриального университета, г. Новокузнецк – 26.12.2022г.
2. Акт внедрения методики анализа и синтеза конструктивных параметров горных машин ударного действия - ФГБУН «Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук», г. Новосибирск. – 24.11.2016г.

Министерство науки и высшего образования РФ
 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
 образования
 «Сибирский государственный индустриальный университет»

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной и инновационной
 деятельности СибГИУ

д.т.н., профессор Коновалов С.В.

« 26 » 2022г

Акт

о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс

Результаты диссертационной работы Тимофеева Е.Г. «Математическое и компьютерное моделирование динамических процессов в стержневых системах применительно к машинам ударного действия» внедрены в учебный процесс и используются для изучения студентами Института машиностроения и транспорта направлений подготовки «Прикладная механика», «Технологические машины и оборудование», «Машиностроение» по следующим дисциплинам:

1. Компьютерное моделирование объектов и процессов машиностроения – использовано программное обеспечение, позволяющее анализировать и синтезировать рациональные геометрические параметры ударных узлов машин.
2. Математическое моделирование в технике – использована математическая модель ударной стержневой системы, основанная на представлении ударяющего тела любой геометрической сложности в виде ступенчатого цилиндрического тела вращения.
3. Вычислительная механика и компьютерный инжиниринг – использован компьютеризированный алгоритм численного исследования генерирования ударных импульсов в стержневой системе при соударении.

Заведующий кафедрой механики и
 машиностроения, к.т.н.



А.В Макаров

УТВЕРЖДАЮ:

Директор

ФГБУН «Институт горного дела
им. Н.А. Чинакала Сибирского
отделения Российской академии наук»

А.С. Кондратенко

2016г.



Акт внедрения

методики анализа и синтеза конструктивных параметров бойков горных машин ударного действия

Разработанная в Сибирском государственном индустриальном университете «Методика анализа и синтеза конструктивных параметров бойков горных машин ударного действия» внедрена в ФГБУН «Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук».

Методика реализована в виде программных средств расчета и проектирования горных машин ударного действия. Методика применяется для расчета, конструирования и оценки параметров элементов ударных узлов погружных пневмоударников, разработкой которых в настоящее время занимается ИГД СОРАН.

Заведующий лабораторией бурения
и технологических импульсных машин, к.т.н.

Тимонин В.В.

Заведующий отделом горного машиноведения
и бурения, к.т.н., доцент

Репин А.А.