

На правах рукописи

Азимов Амирхон Махмудалиевич



**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
ГИДРОМОЛОТОВ ПРИ РАЗРУШЕНИИ НЕГАБАРИТОВ
ГОРНЫХ ПОРОД НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ВЛИЯНИЯ
ГЕОМЕТРИИ УДАРНЫХ УЗЛОВ**

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Жуков Иван Алексеевич

Официальные оппоненты:

Сысоев Николай Иванович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», кафедра «Горное дело», профессор;

Кузиев Дильшад Алишерович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», кафедра горного оборудования, транспорта и машиностроения, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург.

Защита диссертации состоится **19 сентября 2025г. в 13:00** на заседании диссертационного совета ГУ.2 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 3321.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru
Автореферат разослан 18 июля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОВАЛЬСКИЙ
Евгений Ростиславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Разработка месторождений нерудных твердых полезных ископаемых, таких как, граниты и мраморы, открытым способом ведётся путем отделения горной массы буровзрывным или механизированным методом. При этом выработке крепких горных пород неизбежно сопутствует выход негабаритов. В зависимости от способа добычи и целевого сырья выход негабаритов на карьерах может достигать до 37% от отработанной горной массы, более 75% из них – труднодробимые. Сложность транспортирования и вторичной переработки негабаритов влечёт за собой снижение скорости выработки, вплоть до полной остановки. Разрушение негабаритов производят с применением механизированных комплексов с навесным оборудованием в виде горных машин ударного действия, в частности гидромолотов. В среднем более 30% энергозатрат предприятий приходится на вторичную переработку негабаритов

Горные машины ударного действия при относительно малых габаритах и затрачиваемой энергии позволяют создавать ударную нагрузку, измеряемую десятками тонн. Производительность гидромолотов, их энергоэффективность, многозадачность, долговечность, а также характеристики наносимых ими ударов, зависят от конструктивных особенностей ударного узла машины.

В этой связи задача повышения энергоэффективности гидромолотов, применяемых при разрушении негабаритов горных пород, на основе эффекта влияния геометрии ударных узлов представляется актуальной.

Степень разработанности темы исследования

Значительный вклад в развитие отечественной базы знаний о теории удара, которая легла в основу создания машин ударного действия, внесли ученые Александров Е.В., Алимов О.Д., Городилов Л.В., Дворников Л.Т., Доронин С.В., Еремьянц В.Э., Ещуткин Д.Н., Жуков И.А., Иванов К.И., Кильчевский Н.А., Лазуткин А.Г., Манжосов В.К., Мясников А.А., Решетникова О.С., Саруев Л.А., Соколинский В.Б., Сысоев Н.И., Ушаков Л.С., Шапошников И.-И.Д., Шелковников И.Г., Юнгмейстер Д.А.

Полученные результаты названных ученых связаны с совершенствованием гидравлической системы импульсных машин, раз-

работкой ударно-скалывающих исполнительных органов технологических машин, оценкой влияния форм ударяющих тел на параметры ударного импульса, генерируемого в рабочем инструменте, применяемом для разрушения горных пород, обоснованием возможности повышения эффективности машин ударного действия путём подбора рациональных форм бойков. Работы этих ученых раскрывают особенности применения волновой теории продольного соударения стержней в исследованиях, посвященных поиску рациональных конструкций элементов машин ударного действия. Тем не менее, несмотря на многочисленные доказательства существенного влияния геометрических параметров соударяющихся тел на эффективность разрушения крепких горных пород, выпускаемые гидромолоты производятся без учёта этого факта.

В этой связи необходимо проведение теоретических и экспериментальных исследований по проблеме повышения энергоэффективности разрушения негабаритов крепких горных пород с учетом эффекта влияния геометрии ударных узлов гидромолотов.

Предмет исследования – элементы ударного узла гидромолота.

Объект исследования – процесс формирования в ударной системе гидромолота силового импульса, необходимого для разрушения негабаритов крепких горных пород.

Цель работы – снижение энергозатрат на разрушение негабаритов крепких горных пород, выполняемое посредством горных машин ударного действия – гидромолотов.

Идея заключается в применении эффекта влияния геометрии элементов ударного узла для создания в ударной системе гидромолота волнового импульса упругой деформации, соответствующего силам сопротивления крепких горных пород внедрению инструмента.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Выполнить обзор и анализ технических решений ударных узлов гидромолотов и геометрических параметров их элементов.
2. Оценить необходимость выполнения элементов ударного узла гидромолота с учетом эффекта влияния их геометрических па-

раметров на результативность разрушения крепкой горной породы, подтвердив полученные результаты экспериментально.

3. Разработать способ встраивания бойков, представляющих собой тела вращения с криволинейной образующей боковой поверхности, в корпуса гидромолотов при условии сохранения параметров генерируемых ими ударных импульсов.

4. Провести анализ напряженно-деформированного состояния конструкций бойков, образуемых в соответствии с новым техническим решением.

5. Определить область рациональных параметров ударного импульса и соответствующие им формы бойков, применение которых, обеспечивает повышение энергоэффективности разрушения негабаритов крепких горных пород с применением гидромолотов.

Научная новизна работы

1. Экспериментально подтверждена зависимость между показателями энергоэффективности процесса разрушения негабаритов крепких горных пород и геометрическими параметрами элементов ударного узла гидромолота.

2. Предложен и обоснован оригинальный подход к решению задачи встраивания в гидромолот ударника при условиях оснащения его необходимыми цилиндрическими посадочными поверхностями и сохранения формы и параметров генерируемого ударного импульса.

3. Установлена область рациональных значений параметров ударного импульса, генерирование которого в рабочем инструменте гидромолота при ударе по нему бойком обеспечивает энергоэффективное разрушение негабаритов крепких горных пород.

Соответствие паспорту специальности. Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.8. Геотехнология, горные машины по пунктам: 14 «Критерии и технологические требования при создании новых и совершенствования применяемых горных машин с учетом особенностей условий их эксплуатации при разработке месторождений твердых полезных ископаемых» и 15 «Методы и средства повышения эксплуатационных характеристик и надежности горных машин и оборудования, в том числе за счет обоснования рациональных режимов их функционирования на открытых и подземных горных работах».

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. На основе эффекта влияния геометрических параметров ударных узлов разработан оригинальный подход к решению проблемы встраивания в корпуса гидромолотов бойков, обеспечивающих при ударе по рабочему инструменту формирование ударного импульса, согласованного со свойствами разрушаемой породы.

2. Установлено, что выполнение бойков такой формы, при которой достигается генерирование ударного импульса с параметрами, соответствующими рациональному блокирующему контуру, обеспечивает повышение энергоэффективности гидромолотов в сравнении с традиционно выпускаемыми не менее чем на 30%.

3. Разработано новое техническое решение бойков машин ударного действия, генерирующих ударный импульс, характеризующийся оптимальным непрерывным нарастанием с течением времени амплитуды с возрастающей интенсивностью, повышенной величиной максимальной амплитуды и уменьшением отраженной части энергии от разрушаемой горной породы, применение которых позволяет уменьшить энергоёмкость процесса разрушения негабаритов горных пород высокой крепости (патент РФ на полезную модель №221725 от 21.11.2023г.).

4. Результаты исследований использованы в деятельности ООО «ММЗ» при реализации работ в рамках проектов по разработке и совершенствованию гидравлических молотов, для разрушения негабаритов крепких горных пород (Акт о внедрении от 10.12.2024 г.).

Методология и методы исследования. Работа проводилась с применением комплексных методов исследований, включающих системный анализ, обобщение результатов существующих разработок, теоретический анализ динамических процессов в ударной системе гидромолотов, экспериментальное исследование влияния геометрии соударяющихся тел ударных узлов гидромолотов на энергоэффективность процесса разрушения крепкой горной породы, компьютерное моделирование для получения параметров ударных импульсов и их анализ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Генерирование в рабочем инструменте гидромолота ударного импульса, соответствующего силам сопротивления горной породы внедрению инструмента при ударном воздействии, обеспечи-

вает сокращение количества энергии, необходимой для разрушения негабаритов крепких горных пород более чем на 50% в сравнении с энергией, затрачиваемой существующими гидромолотами, при условии учета эффекта влияния геометрических параметров ударных узлов.

2. Разработанный способ встраивания бойков в корпус гидромолота, заключающийся в оснащении ударной части бойка, выполненной в форме тела вращения с криволинейной образующей боковой поверхности, цилиндроконической оболочкой и центральным глухим отверстием с одинаковым распределением их объёмов по длине бойка с учетом направления распространения волны ударного импульса, позволяет сохранить форму и параметры ударного импульса, генерируемого ударной частью, и обеспечивает наличие цилиндрической посадочной поверхности.

3. Разрушение негабарита крепкой горной породы обеспечивается формированием в пике гидромолота ударного импульса с параметрами (максимальная амплитуда силы, время первой волны, импульс силы за время первой волны), соответствующими установленному блокирующему контуру, при этом размеры отделяемого куска могут быть увеличены сохранением в течение времени амплитуды за счет добавления к ударнику цилиндрической ступени.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается применением классических положений волновой теории удара, графоаналитического метода и проверенного программного обеспечения для решения задачи определения ударных импульсов, стандартных методов компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния твердых тел, соответствием теоретических результатов экспериментальным данным.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: Научная конференция студентов и молодых ученых Санкт-Петербургского горного университета «Полезные ископаемые России и их освоение» (СПб, 2022 г.); XI Форум вузов инженерно-технологического профиля союзного государства «Технологическая интеграция» (Минск, 2022 г.); V и VII Международная научно-практическая конференция «Механика и машиностроение. Наука и практика» (СПб, 2022 г., 2024 г.); VIII Международная науч-

но-практическая конференция «Машины, агрегаты и процессы: проектирование создание и модернизация» (СПб, 2025 г.).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной литературы по теме исследования; разработке методики исследования; теоретическом исследовании влияния различных форм ударников на энергоэффективность разрушения горной породы; проведении экспериментальных исследований по разрушению горных пород бойками с различными геометрическими формами; обработке и интерпретации результатов исследований; участии в написании научных работ по теме диссертации.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 8 печатных работах, в том числе 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus). Получен 1 патент на полезную модель.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 111 наименований, и 3 приложения. Диссертация изложена на 163 страницах машинописного текста, содержит 68 рисунков и 20 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования. Изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится описание процесса выработки массива крепкой горной породы, причин и последствий образования негабаритов. Приводится анализ процесса разрушения негабаритов с применением горных машин с навесным оборудованием в виде гидромолота. Выполнен обзор и анализ известных технических решений гидромолотов. Выявлена необходимость совершенствования конструкций гидромолотов на основе учёта влияния геометрических

параметров элементов ударного узла на эффективность разрушения негабаритов.

Во второй главе представлены теоретические исследования ударной системы гидромолотов с учетом эффекта влияния геометрической формы её элементов. Приведены методы анализа ударного импульса, генерируемого в результате соударения элементов ударного узла, обоснованы уточнения графоаналитического метода с учетом неторцевого соударения бойков и рабочего инструмента.

В третьей главе изложены результаты физического эксперимента по исследованию эффекта влияния геометрии бойков гидромолотов на энергоэффективность процесса разрушения крепких горных пород. Выявлены варианты исполнения форм бойков, обеспечивающих гарантированное повышение энергоэффективности.

В четвертой главе представлены и обоснованы новые технические решения конструктивных исполнений бойков и способ их встраивания в существующие гидромолоты, обеспечивающий устойчивое положение бойка с сохранением рациональных параметров ударного импульса. Подтверждено, что генерирование в рабочем инструменте гидромолота импульса с параметрами, соответствующими установленному блокирующему контуру, обеспечивает повышение энергоэффективности и производительности процесса разрушения негабаритов горной породы.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Генерирование в рабочем инструменте гидромолота ударного импульса, соответствующего силам сопротивления горной породы внедрению инструмента при ударном воздействии, обеспечивает сокращение количества энергии, необходимой для разрушения негабаритов крепких горных пород более чем на 50% в сравнении с энергией, затрачиваемой существующими гидромолотами, при условии учета эффекта влияния геометрических параметров ударных узлов.

Разрушение негабаритов крепких горных пород (рисунок 1, а) посредством гидромолотов (рисунок 1, б) осуществляется путем формирования в рабочем инструменте при ударе по нему бойком (рисунок 1, в) ударных импульсов, характеризующихся формой, длительностью и амплитудой. Оценка эффективности импульса или

синтез его рациональных параметров ведется прежде всего его сопоставлением с зависимостью, связывающей силу сопротивления горной породы и величину внедрения в неё инструмента.

Анализ результатов известных экспериментальных исследований, проведенных различными учеными, показывает, что зависимость «сила-внедрение» для пород с коэффициентом крепости 8-20 по шкале М.М. Протоdjяконова носит линейный характер. Такой зависимости соответствует импульс, характеризующийся нарастанием амплитуды по линейному закону или с возрастающей интенсивностью. Ударник, генерирующий такой импульс, должен иметь поперечное сечение с площадью, увеличивающейся по длине бойка. При этом анализ технических решений гидромолотов свидетельствует о том, что применяемые в них бойки выполнены в форме цилиндра с постоянным поперечным сечением (рисунок 1, в).

Таким образом, с целью обоснования идеи применения эффекта влияния геометрии элементов ударного узла гидромолота, для повышения энергоэффективности разрушения негабаритов крепких горных пород спроектирован и изготовлен стенд (рисунок 2), основанный на принципе действия вертикального ударного копра, и разработана методика проведения экспериментальных исследований.

Стенд состоит из передвижного каркаса, в нижней части которого установлены боковые фиксаторы ударного инструмента, обеспечивающие его регулировку в двух плоскостях с целью придания строго вертикального положения. К основаниям каркаса посредством такелажных комплектов крепятся вертикальные направляющие из стального троса, на которых через втулки установлена каретка. К центральной части каретки производится крепление ударника. Конструкция стенда позволяет выставить по уровню боек, инструмент и направляющие, обеспечивая тем самым беспрепятственное свободное падение бойка и его контакт в момент нанесения удара по инструменту по всей площади торца.

Методика проведения эксперимента следующая. В основание стенда закладывается разрушаемый объект, на которой опирается пика гидромолота, установленная в фиксаторах с обеспечением возможности вертикального перемещения. Боек, закрепленный на каретке, поднимается до заданной высоты и сбрасывается с ускорением свободного падения. В конце хода боек наносит удар по торцу

пики, которая в свою очередь воздействует на разрушаемый объект. Для каждого из различающихся по форме ударников дискретно изменяется высота сброса и фиксируется факт разрушения породы.

Подбор параметров опытных образцов (таблица 1) проводился на основе характеристик и геометрических параметров типового гидромолота и его ударного узла, а также минимального размера негабарита в одном измерении, обусловленного технологией переработки разрушенной горной массы. Энергия, генерируемая аналогом цилиндрического бойка гидромолота, также регламентирована коэффициентом подобия энергии удара, k_E .

Таблица 1 – Критерии и коэффициенты подобия

№	Критерий подобия	Типовой гидромолот	Коэффициент подобия	Параметры стенда и опытных образцов
1	Энергия удара, Дж	4234	$k_E = 210$	20
2	Масса бойка, кг	69	$k_M = 35$	2
3	Диаметр пики и ударного торца бойка, мм	120	$k_d = 4,5$	25
4	Размеры негабарита, мм	>450	$k_L = 4,5$	100

В качестве объекта разрушения (рисунок 3, а) использовались плиты из мрамора «Volakas» и «Panda Black» с размерами 100x100x20мм с коэффициентом крепости по шкале М.М. Протодьяконова $f = 8$. Рабочий инструмент – клиновидная пика (рисунок 3, б) гидромолота с размерами: длина – 700мм, ширина клина – 40мм, угол заострения – 15°, диаметр ударного торца – 25мм.

Сравнительный анализ известных бойков и генерируемых ими ударных импульсов позволил выбрать несколько уникальных опытных образцов (рисунок 3, в) для оценки их возможного применения в гидромолотах. В качестве аналога был выбран цилиндрический боек с постоянным поперечным сечением (далее – боёк №1) диаметром 25мм. Боёк в форме усеченного конуса (далее – боёк №2) выбран как один из простых в изготовлении. Боёк, выполненный в форме экспоненциала вращения (далее – боёк №3), выбран в силу того, что способен генерировать ударный импульс с минимальной энер-

гией отраженной волны. Боёк, выполненный в форме псевдосферы (далее – боёк №4), выбран с силу того, что генерирует ударный импульс с линейным законом нарастания амплитуды. Боёк, выполненный в форме гиперboloида вращения (далее – боёк №5), выбран в силу того, что позволяет генерировать ударный импульс с максимальной амплитудой в сравнении с любыми другими формами бойков (при условии равенства массы и предударной скорости). Опытные образцы бойков были изготовлены из стали 12ХН3А с одинаковыми массой – 2 кг и диаметром ударного торца – 25 мм.

Кривые, образующие боковые поверхности выбранных бойков, в прямоугольной системе координат с началом в центре ударного торца описываются уравнениями:

– боёк №1: $y_1 = k_1$,

– боёк №2: $y_2 = k_2 x + k_3$,

– боёк №3: $y_3 = k_4 e^{k_5 x} + k_5$,

– боёк №4: $\begin{cases} x = k_6 \cos t + k_6 \ln(\operatorname{tg}(t / 2)) + k_7, \\ y_4 = k_6 \sin t, \end{cases}$

– боёк №5: $y_5 = k_8 / (k_9 - x)$,

где k_i – коэффициенты, зависящие от габаритов бойка ($i = 1, \dots, 9$).

На рисунке 4 представлены графики ударных импульсов, генерируемых в рабочем инструменте при ударе по нему бойками, выбранными в качестве опытных образцов. Решение задачи определения импульса осуществлялось с применением программного обеспечения «Удар бойком сложной геометрической формы» (Свидетельство №2019619495 / Тимофеев Е.Г., Жуков И.А. – зарегистр. 18.07.2019), основанного на графоаналитическом методе решения задачи продольного соударения стержней. Полученные решения совпадают с известными результатами исследований, выполненных в свое время профессором Л.Т. Дворниковым совместно с его учениками: И.-И.Д. Шапошниковым, А.А. Мясниковым, Г.В. Федотовым.

Высота сброса бойков на стенде варьировалась от 1,10м до 0,45м с шагом 0,05м и от 0,45м до 0,40м с шагом 0,01м. При одних и тех же условиях удар наносился 5 раз (по аналогии с требованиями ГОСТ 55162-2012).

В результате проведения физического эксперимента определены предельные значения высоты сброса каждого из бойков, при которых происходило разрушение образца горной породы. Результаты внесены в таблицу 2, в которой знак «+» означает, что образец горной породы раскололся, знак «-» означает, что образец не раскололся. Минимальная высота сброса, при которой происходит разрушение образца крепкой горной породы при ударе по пике бойком №1 – 1,00м; №2 – 0,85м; №3 – 0,45м; №4 – 0,44м; №5 – 0,42м.

Кинетическая энергия, с которой боек наносит удар по пике (1):

$$E = mgh, \quad (1)$$

где m – масса бойка, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; h – высота сброса бойка, м.

Относительная энергоэффективность бойков, % (2):

$$\Delta E_i = (1 - E_i / E_1) \cdot 100, \quad (2)$$

где E_i – энергия удара бойком № i ($i = 2,3,4,5$); E_1 – энергия удара бойком №1.

На диаграмме (рисунок 5) приведены значения энергий ударов, затрачиваемых для разрушения идентичных образцов крепкой горной породы, рассчитанные по экспериментальным данным.

Сравнительный анализ полученных экспериментальных данных (рисунок 6) показывает, что выполнение бойка в форме усеченного конуса (боёк №2) позволяет снизить энергию удара, необходимую для разрушения породы, в сравнении с энергией, затрачиваемой на разрушение идентичного образца породы цилиндрическим бойком, на 15%. Практическая реализация бойков с образующей боковой поверхности, выполненной по экспоненциальной кривой (боёк №3), трактрисе (боёк №4) и гиперболы (боёк №5), позволяет сократить энергию удара более чем на 50%, что свидетельствует о том, что бойки №3-№5 могут найти применение в реальных конструкциях гидромолотов в зависимости от заданных габаритов.

Полученные результаты подтверждают значимость эффекта влияния геометрии ударного узла гидромолота в решении проблемы повышения энергоэффективности процесса разрушения горной породы высокой крепости.

2. Разработанный способ встраивания бойков в корпус гидромолота, заключающийся в оснащении ударной части бойка, выполненной в форме тела вращения с криволинейной образующей боковой поверхности, цилиндроконической оболочкой и центральным глухим отверстием с одинаковым распределением их объёмов по длине бойка с учетом направления распространения волны ударного импульса, позволяет сохранить форму и параметры ударного импульса, генерируемого ударной частью, и обеспечивает наличие цилиндрической посадочной поверхности.

Очевидно, что бойки с криволинейной образующей боковой поверхности не нашли применения в конструкциях гидромолотов в силу отсутствия в них цилиндрической посадочной поверхности. В этой связи разработан способ встраивания бойков, выполненных в форме тел вращения с криволинейной образующей боковой поверхности (рисунок 7, а), в корпус гидромолота. Способ заключается в оснащении ударной части бойка поршневой частью в виде цилиндроконической оболочки (рисунок 7, б) и в выполнении со стороны воспринимающего торца центрального глухого отверстия (рисунок 7, в). Причем, оболочка и отверстие характеризуются одинаковым распределением их объёмов по длине бойка. При этом оболочка может быть ориентирована своей цилиндрической ступенью как в сторону воспринимающего торца (рисунок 7, з), так и в сторону ударного (рисунок 7, д). Это обусловлено тем, что волна ударного импульса при прохождении в направлении от ударного торца к воспринимающему после сечения I-I в бойке, приведенном на рисунке 7, з, сохраняет своё направление в движении по ударной части и оболочке, а в бойке по рисунку 7, д меняет направление движения по оболочке, на противоположное.

Так как параметры ударного импульса, генерируемого в пике при ударе по ней бойком, определяются и полностью зависят от геометрической формы бойка, а именно от распределения его объёма по длине, то бойки, показанные на рисунках 7, а, г, д, генерируют идентичные ударные импульсы.

Очевидно, что выполнение в ударниках отверстий и полостей приведёт к появлению мест концентрации напряжений и снижению прочности бойка. В соответствии с этим сформулированы требования

к конструкциям бойков, образуемых согласно предложенному способу: 1) толщина цилиндроконической оболочки и размеры центрального отверстия должны выбираться, исходя из условия прочности бойка; 2) длина цилиндрической ступени оболочки должна обеспечивать устойчивое положение бойка в корпусе гидромолота.

Для бойков №№3-5, обеспечивающих повышение энергоэффективности процесса разрушения крепкой горной породы, согласно результатам проведенного физического эксперимента, были разработаны конструктивные решения по предложенному способу. Анализ прочностных характеристик осуществлялся с применением метода конечных элементов в программном комплексе T-Flex при условии задания полного закрепления посадочной поверхности бойка по наружному диаметру и приложения распределенной нагрузки к ударному торцу, равной по величине максимальной силе удара согласно рисунку 4.

Результаты моделирования напряжённо-деформированного состояния бойков, в частности оценка коэффициента запаса прочности, приведены на рисунке 8. Минимальное значение коэффициента запаса прочности составляет: для бойка №3 – 1,66 (рисунок 8, а); для бойка №4 – 1,09 (рисунок 8, б); для бойка №5 – 2,40 (рисунок 8, в).

Установлено, что выполнение бойков с цилиндроконической оболочкой, ориентированной цилиндрической ступенью в сторону ударного торца, приводит к снижению концентрации напряжений в опасных сечениях и увеличению значения коэффициента запаса прочности как минимум на 10%. В качестве примера на рисунке 9 показан результат прочностного анализа бойка №4.

По результатам подбора рациональных геометрических соотношений элементов бойков установлены зависимости размеров цилиндроконической оболочки: толщины $\Delta_{ц}$ и длины цилиндрической части $L_{ц}$, длины конической части $L_{к}$ от диаметра D воспринимающего торца и от длины бойка L , удовлетворяющие условию прочности: $\Delta_{ц} / D = 0,04 \div 0,05$; $L_{ц} / L = 0,15 \div 0,30$; $L_{к} / L = 0,15 \div 0,35$.

Таким образом, разработанный способ позволяет встраивать в гидромолот бойки с криволинейной образующей боковой поверхности, сохраняя параметры ударного импульса и обеспечивая наличие посадочной поверхности без потери прочностных свойств.

3. Разрушение негабарита крепкой горной породы обеспечивается формированием в пике гидромолота ударного импульса с параметрами (максимальная амплитуда силы, время первой волны, импульс силы за время первой волны), соответствующими установленному блокирующему контуру, при этом размеры отделяемого куска могут быть увеличены сохранением в течение времени амплитуды за счет добавления к ударнику цилиндрической ступени.

Для более детальной оценки влияния формы ударника на эффективность разрушения негабаритов крепких горных пород проанализированы параметры ударных импульсов (рисунок 4), генерируемых бойками №1-№5. Результаты анализа (рисунок 10) свидетельствуют о том, что на результативность разрушения породы оказывают влияние три параметра: максимальная величина силы удара F_{\max} , время первой волны импульса $t_{нв}$ и, как следствие, их произведение – импульс силы за время первой волны P_1 . Причем, если форма ударного импульса (рисунок 4, импульсы от бойков №1 и 2) не соответствует силам сопротивления породы внедрению инструмента, то разрушение породы происходит при достаточной большой величине максимальной амплитуды и существенном запасе импульса силы, что возможно для таких бойков лишь при увеличении их массы и предударной скорости.

Если характер нарастания ударного импульса соответствует силам сопротивления породы разрушению, то разрушение происходит при определенном сочетании величин F_{\max} , и P_1 за время $t_{нв}$. Комбинация этих параметров в зависимости от времени $t_{нв}=2L/a$, где L – длина бойка; a – скорость звука в материале бойка и пики, на основе результатов физического эксперимента определяет блокирующий контур (рисунок 11), который обеспечивает выбор рациональных параметров импульса и, как следствие, геометрических размеров бойка и его предударной скорости.

Можно предположить, что генерирование в пике гидромолота ударного импульса, максимальная амплитуда которого будет не только соответствовать блокирующему контуру, но и сохраняться с течением времени продолжительности импульса, позволит увеличить размер отделяемого куска породы от разрушаемого негабарита. Такой импульс дают бойки, представляющие собой двухступенчатое

тело вращения, в котором первая ступень выполняется с нарастанием площади поперечного сечения, а вторая ступень – цилиндрическая.

Однако, при одинаковых массе и предударной скорости такие бойки в сравнении с одноступенчатыми генерируют ударный импульс с заведомо меньшей величиной его максимальной амплитуды. Тем не менее, такой вариант выполнения бойка наиболее просто решает проблему встраивания в корпус гидромолота, так как оснащение двухступенчатого бойка цилиндрической оболочкой и отверстием в соответствии с вышеизложенным способом обеспечивает создание в бойке двух цилиндрических посадочных поверхностей (рисунок 12). Согласно установленным соотношениям, длина цилиндрической ступени бойка и длина цилиндрической части оболочки должны быть равны между собой и составлять не более $1/3$ от длины ударной части переменного поперечного сечения.

Необходимо отметить, что приведение предложенного конструктивного исполнения бойка к цельнотельной форме с учетом направления распространения волны ударного импульса свидетельствуют о появлении в ударной части бойка выступа (рисунок 12, д). Естественно, что наличие выступа в теле бойка вносит изменения в форму и параметры генерируемого импульса. Сравнительный анализ импульсов от бойков с выступом и без него показал, что параметры импульса ухудшаются не более чем на 1%. С учётом этого блокирующий контур, приведенный на рисунке 11, был уменьшен на 1%.

Для определения рациональных форм бойков и оценки энергоэффективности их применения были рассчитаны ударные импульсы с параметрами, соответствующими блокирующему контуру, при переменной величине предударной скорости, генерируемые восемью различными бойками, в которых образующая боковой поверхности ударной части описывается кривыми: экспоненциальной, трактрисой, гиперболой, строфоидой, циссоидой Диокла, квадратичной параболой, квадратичной политропой и верзьерой Аньези. С этой целью в программное обеспечение «Удар бойком сложной геометрической формы» были внесены дополнения, обеспечивающие получение параметров ударного импульса характерных для двухступенчатого бойка.

Масса бойков принята такая же, как и для экспериментальных образцов. Предударная скорость задавалась, исходя из следующих

условий: время $t_{F_{\max}}$ до достижения амплитуды величины F_{\max} , величина силы в конце первой волны $F_{\kappa 1}$ и импульс силы первой части первой волны P_{1-1} должны соответствовать блокирующему контуру. На рисунке 13 приведен пример расчета импульса, генерируемого двухступенчатым бойком с образующей ударной части, выполненной по квадратичной политропе, описываемой в прямоугольной системе координат уравнением (3):

$$y_6 = \frac{200000}{(x-200)^2} + 7,5. \quad (3)$$

Анализ полученных решений показал, что для всех выбранных вариантов бойков величина амплитуды сохраняется на протяжении 0,33 от времени достижения F_{\max} , а прирост импульса силы P_{1-2} составляет не менее 0,44 от P_{1-1} . При этом энергоэффективность составляет в среднем 34% (таблица 3).

Таким образом практическая реализация двухступенчатых бойков с оболочкой обеспечивает им наличие двух посадочных поверхностей (рисунок 14), повышение энергоэффективности в сравнении с традиционно применяемыми бойками гидромолотов на 30-38%, и предположительно увеличивает размер отделяемого куска от массива негабарита крепкой горной породы на 30-40%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационное исследование посвящено решению важной научно-технической проблемы повышения энергоэффективности разрушения негабаритов крепких горных пород гидромолотами за счёт оптимизации геометрии ударных узлов. В работе получены новые научные результаты, имеющие существенное значение для развития теории и практики ударного разрушения горных пород.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Анализ известных технических решений конструкций гидромолотов свидетельствует о том, что выпускаемые в настоящее время гидромолоты оснащаются бойками цилиндрической формы, несмотря на доказанный различными учеными факт о том, что бойки с постоянным поперечным сечением обладают низким коэффициентом передачи энергии ударного импульса.

2. Экспериментально доказано, что учет эффекта влияния геометрии ударных узлов посредством генерирования в пике гидромолота ударного импульса, соответствующего силам породы разрушению, путём подбора рациональной формы бойка обеспечивает повышение энергоэффективности процесса разрушения негабаритов крепких горных пород более чем на 50% в сравнении с существующими гидромолотами.

3. Разработанный способ встраивания бойков в корпуса гидромолотов, заключающийся в их оснащении цилиндроконической оболочкой и центральным глухим отверстием с одинаковым распределением их объёмов по длине бойка обеспечивает сохранение параметров генерируемого исходным бойком ударного импульса, и наличие необходимой для встраивания посадочной поверхности.

4. По результатам моделирования напряженно-деформированного состояния конструкций бойков, образуемых в соответствии с новым техническим решением, установлены соотношения между геометрическими размерами элементов бойка, удовлетворяющими условию прочности и устойчивости.

5. Определен блокирующий контур области рациональных параметров ударного импульса, достижение которого в результате подбора геометрических параметров бойка и его предударной скорости гарантирует повышение энергоэффективности процесса дробления негабаритов крепких горных пород с применением гидромолотов на 30-40%.

6. Разработанная методика обеспечения встраиваемости в корпуса машин ударного действия бойков с криволинейной образующей боковой поверхности, а также рекомендации по выбору рациональных геометрических параметров элементов ударного узла гидромолота, внедрены в деятельность ООО «ММЗ».

7. Дальнейшим развитием полученных в диссертации результатов является их применение для решения проблемы повышения производительности машин ударного действия с пневмо- и электроприводом.

8. Полученные результаты открывают новые направления для научных изысканий, связанных с углублённым изучением волновых процессов в ударных системах и созданием цифровых двойников для

прогнозирования энергоэффективности при различных конструктивных решениях.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Теплякова А.В. Обзор и анализ технических решений для повышения долговечности и улучшения технологичности элементов ударных узлов бурильных машин / А.В. Теплякова, **А.М. Азимов**, Л. Алиева, И.А. Жуков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 9. – С. 120-132. – DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_120.

2. **Азимов А.М.** Обзор и анализ существующих технических решений гидравлических устройств ударного действия и постановка проблем их совершенствования / А.М. Азимов, И.А. Жуков // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – №18. – С. 104-114. – DOI: 10.26160/2658-3305-2023-18-104-114.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Zhukov I.A. Modification of hydraulic hammers used in repair of metallurgical units / I.A. Zhukov, N.V. Martyushev, D.A. Zyukin, **А.М. Azimov**, A.I. Karlina // Metallurgist. – 2023. – vol. 66. – No. 12. – Pp. 1644-1652. – DOI: 10.1007/s11015-023-01480-w.

4. **Азимов А.М.** Повышение энергоэффективности гидромолотов, применяемых при разрушении негабаритов горных пород, на основе эффекта влияния геометрии элементов ударного узла / А.М. Азимов, И.А. Жуков // Горная промышленность. – 2025. – №3. – С. 71-79. – DOI: 10.30686/1609-9192-2025-3-7179.

Патент:

5. Патент № 221725 Российская Федерация, МПК В25D 17/02 (2006/01); СПК В25D 17/02 (2023.08). Боек машин ударного действия. Заявка № 2023110865: заявл. 27.04.2023; опубл. 21.11.2023 / И.А. Жуков, А.В. Теплякова, **А.М. Азимов**; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 6 с.

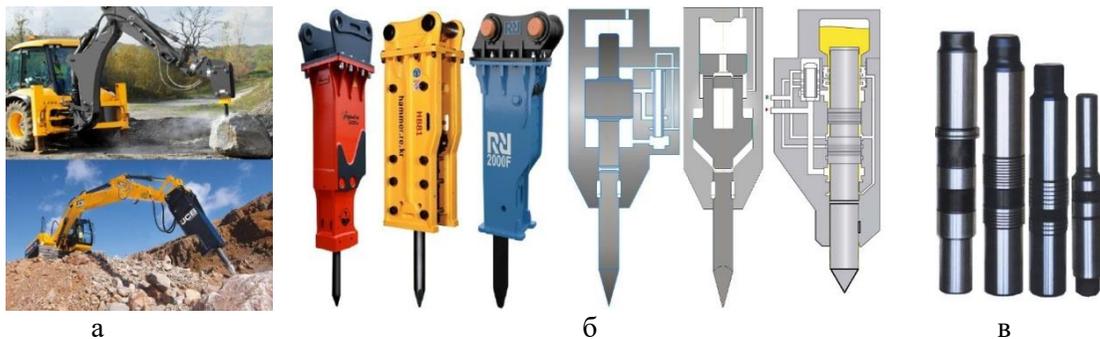


Рисунок 1 – Разрушение негабаритов горных пород: а – машина с гидромолотом, б – конструкции гидромолотов, в – традиционно применяемые ударники

Таблица 2 – Результаты эксперимента по разрушению опытных образцов горной породы

Высота, м	1,10	1,05	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45	0,44	0,43	0,42	0,41
Боёк №1	+	+	+	-	-	-												
Боёк №2			+	+	+	+	-	-	-									
Боёк №3						+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
Боёк №4														+	+	-	-	-
Боёк №5														+	+	+	+	-

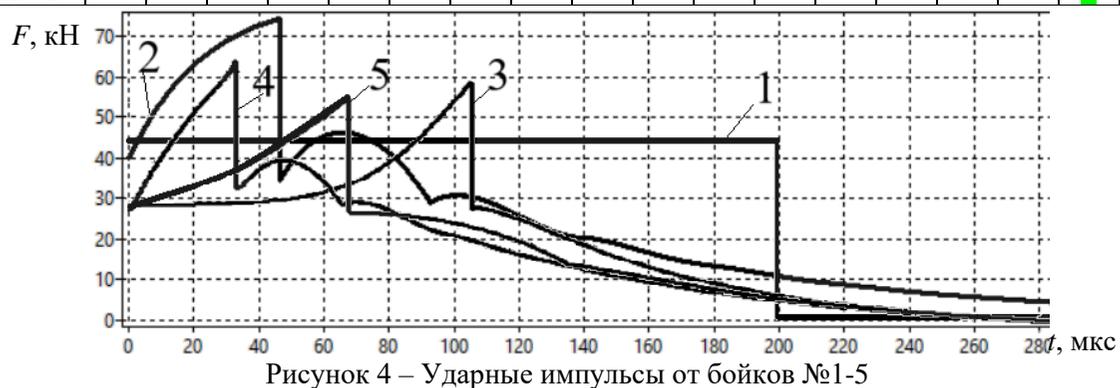


Рисунок 4 – Ударные импульсы от бойков №1-5

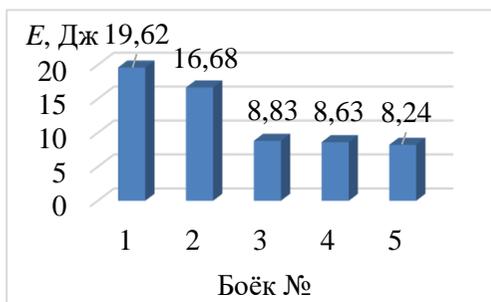


Рисунок 5 – Диаграмма значений энергии удара бойками №1-5

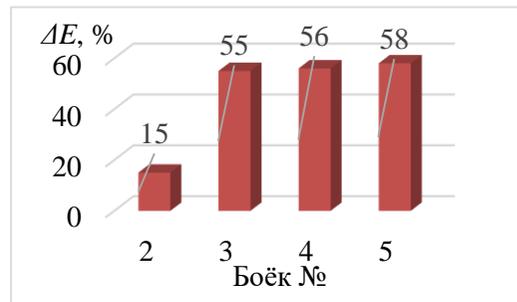


Рисунок 6 – Энергоэффективность ударного разрушения горной породы



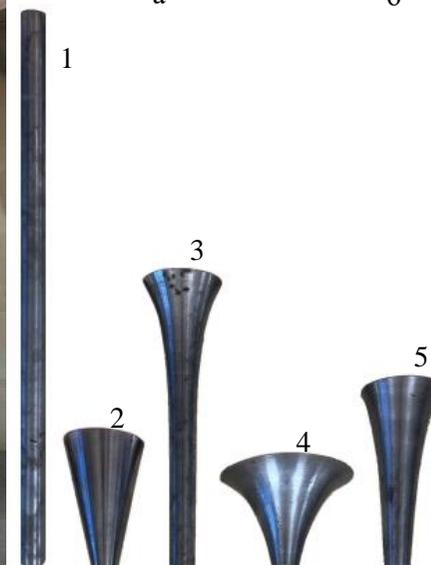
Рисунок 2 – Стенд



а



б



в

Рисунок 3 – Опытные образцы: а – горная порода, б – клиновья пика, в – бойки №1-5

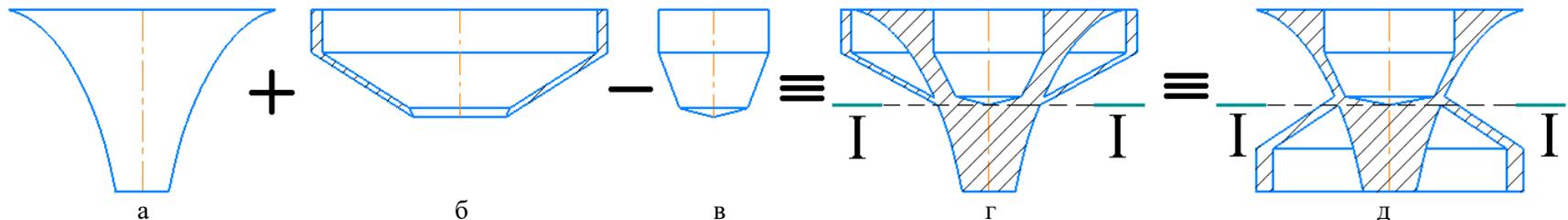


Рисунок 7 – Способ встраивания бойка с криволинейной образующей боковой поверхности: а – исходный цельнотельный боёк, б – цилиндрикоконическая оболочка, в – глухое отверстие, г – боёк с оболочкой, д – боёк с развернутой оболочкой

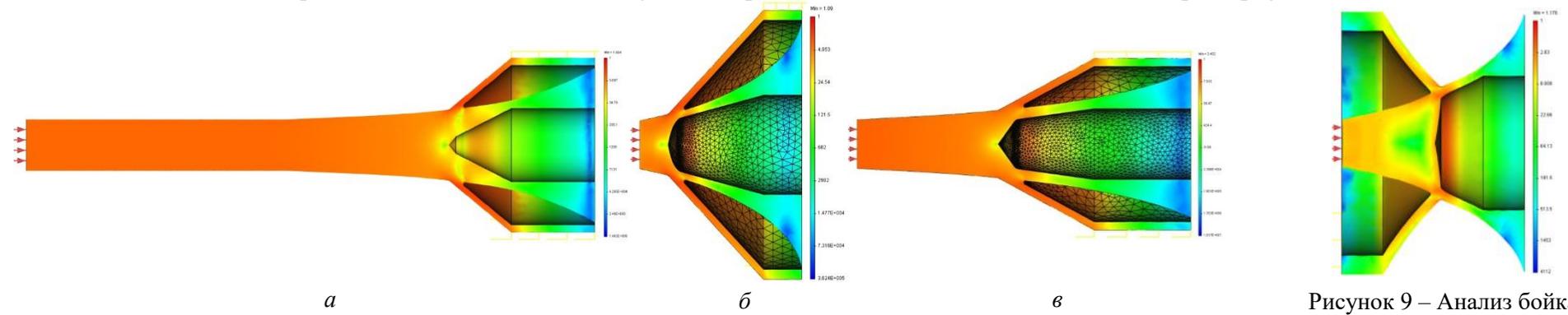


Рисунок 8 – Результаты прочностного анализа бойков №3-5 с цилиндрикоконической оболочкой: а – №3; б – №4; в – №5

Рисунок 9 – Анализ бойка с развернутой оболочкой

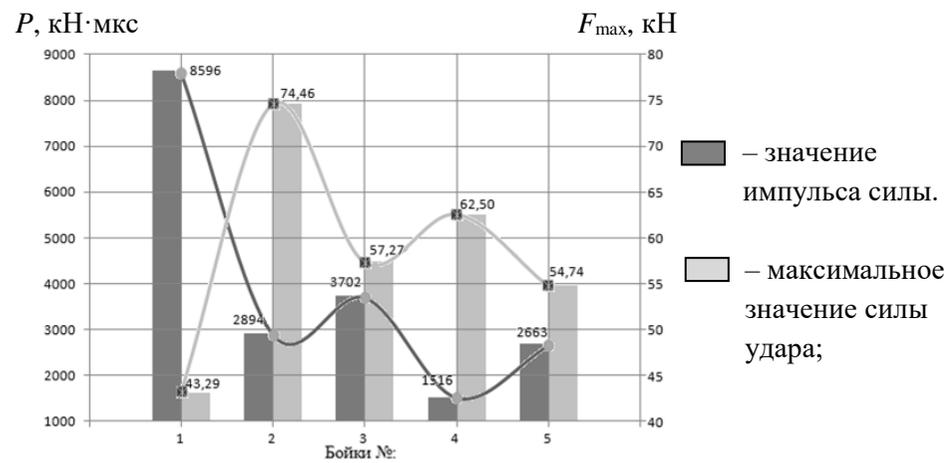


Рисунок 10 – Диаграмма параметров ударного импульса от бойков №1-5

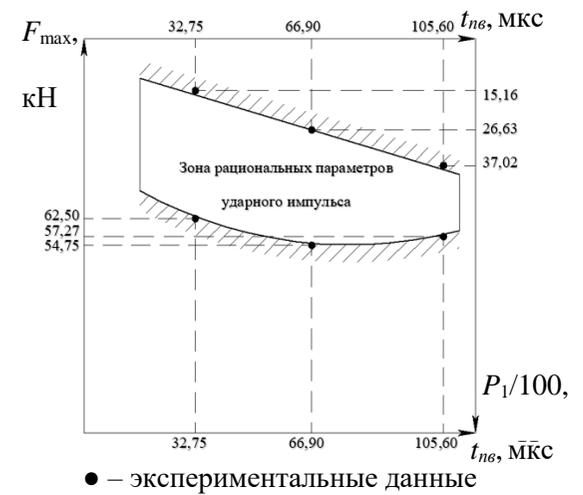


Рисунок 11 – Рациональные параметры ударного импульса

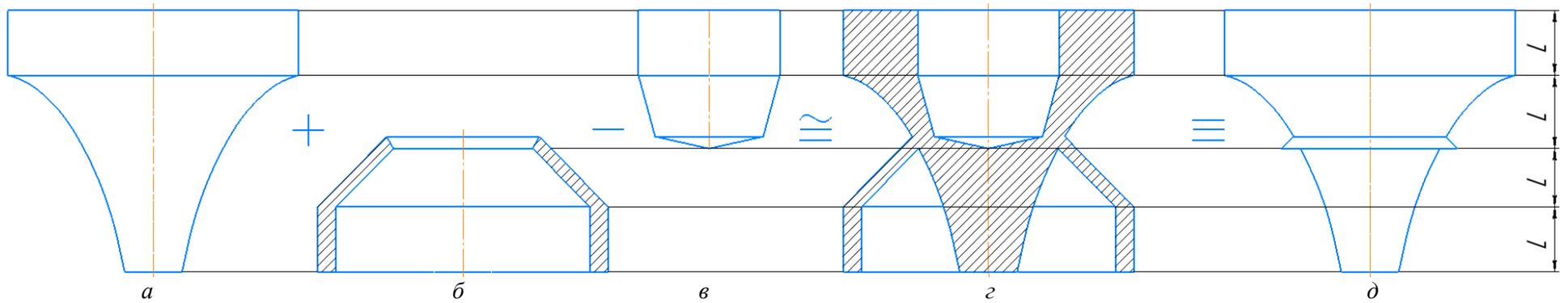


Рисунок 12 – Способ обеспечения бойка двумя посадочными поверхностями: *a* – исходный боёк, *б* – оболочка, *в* – отверстие, *г* – боёк с двумя цилиндрическими посадочными поверхностями, *д* – приведенная цельнотельная форма бойка

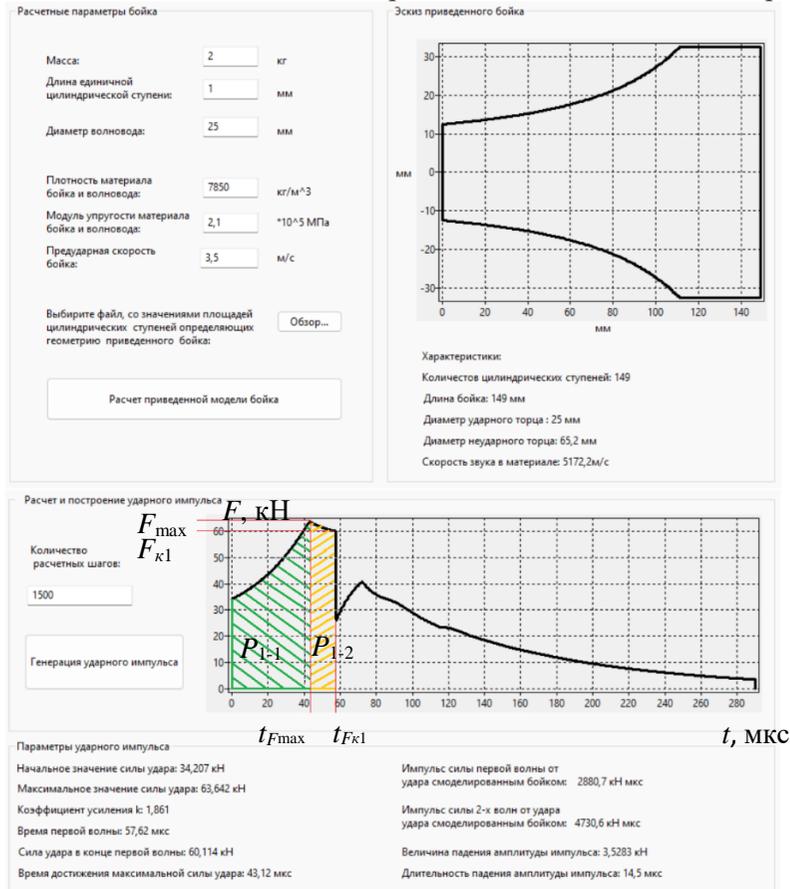


Рисунок 13 – Пример расчета импульса

Таблица 3 – Энергоэффективность двухступенчатых бойков с цилиндрической посадочной поверхностью

Образующая боковой поверхности бойка	Энергоэффективность, %
Экспонента	26,4
Трактриса	30,2
Строфоида	33,9
Циссоида Диокла	33,9
Гипербола	35,8
Парабола квадратичная	35,8
Верзьера Аньези	35,8
Политропа квадратичная	37,6

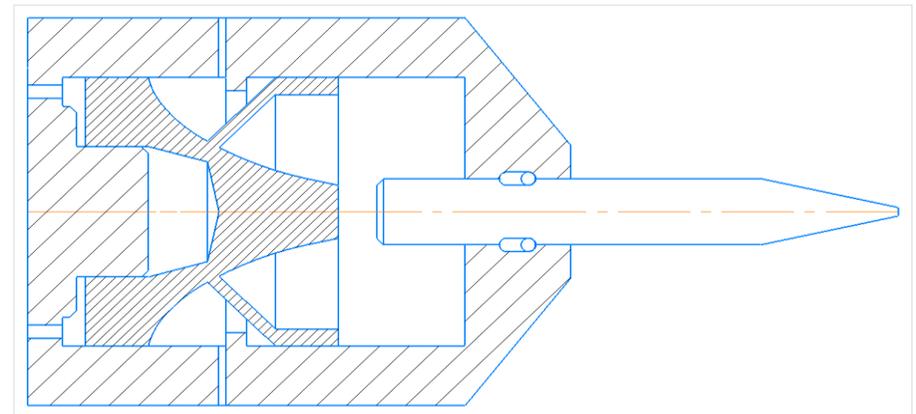


Рисунок 14 – Гидромолот со встроенным бойком с криволинейной образующей боковой поверхности ударной части