

На правах рукописи

Плащинский Вячеслав Алексеевич



**ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР СХЕМНЫХ И
КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ УСТРОЙСТВА
ДРОБЛЕНИЯ НЕГАБАРИТОВ С УВЕЛИЧЕННОЙ
ЭНЕРГИЕЙ УДАРА**

Специальность 05.05.06 – Горные машины

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

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, старший научный сотрудник

Болобов Виктор Иванович

Официальные оппоненты:

Шишлянников Дмитрий Игоревич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра горной электромеханики, доцент;

Казakov Сергей Владимирович

кандидат технических наук, научно-производственная корпорация «Механобр-техника» (акционерное общество), ведущий инженер-конструктор.

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

Защита диссертации состоится 15 сентября 2022 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.07 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 15 июля 2022 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ
Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

При ведении буровзрывных работ на карьерах выход негабаритных кусков породы, достигает, в зависимости от горно-геологических условий, от 5 до 20 % от объема, что затрудняет ведение горных работ.

Широко используемые в настоящее время методы дробления негабаритов накладными зарядами, гидравлическими и пневматическими молотами требуют остановки работ или применения специальных машин и оборудования, а использование штатных устройств гравитационного действия типа шар или клин-бабы малоэффективно, хотя такие устройства независимы от источников энергии, обладают простотой эксплуатации и ремонта. Увеличение энергии удара таких устройств и ее доли, затрачиваемой на разрушение породы, способно повысить эффективность борьбы с негабаритом на открытых горных работах. Решить эту задачу возможно обоснованным выбором новых схемных и конструктивных решений устройств дробления негабаритов.

Степень разработанности темы исследования. В работах Александрова Е.В., Барона Л.И., Иванова К.И., Недорезова И.А., Соколинского В.Б., Ушакова Л.С., Юнгмейстера Д.А., *Balci C., Bilgin N., Copur H.* и др. установлены основные закономерности процесса ударного разрушения горных пород. В то же время, вопросы, связанные с влиянием увеличения энергии удара без существенного изменения массогабаритных характеристик устройств для дробления негабарита и эффективным использованием энергии удара, исследованы недостаточно, что требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Цель работы – выявление закономерности передачи ударной многомассной системой энергии импульса для разрушения негабарита с использованием в ударной системе ак-

кумулятора энергии и смещением времени воздействия ударных тел на негабарит, что необходимо для обоснования структуры и параметров устройств для разрушения негабарита при однократном на него ударном воздействии, что имеет существенное значение для развития горной отрасли страны.

Идея работы – разрушение негабарита в результате однократного ударного воздействия на него рабочего инструмента бутобоя гравитационного действия достигается при заданных параметрах ударной системы последовательными накладываемыми друг на друга ударными импульсами, что приводит к достижению на контактной площадке инструмента с негабаритом напряжений, необходимых для образования в негабарите трещин разрушения в течение времени, достаточном для выхода их на свободную поверхность.

Задачи исследования

1. Проанализировать и обобщить результаты теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации.

2. Провести теоретические исследования по оценке передачи породе энергии удара многомассной системы устройства для дробления негабаритов.

3. Разработать экспериментальную установку и провести лабораторные исследования эффективности схемных решений многомассного ударного инструмента, оснащенного аккумулятором энергии, при контактном разрушении металлов и хрупкой горной породы, а также раскалывании ее кусков.

4. Обосновать и выбрать схемное решение ударного устройства гравитационного действия с повышенными энергией удара и продолжительностью ударного воздействия.

Научная новизна исследования:

1. Экспериментально установлено, что в процессе передачи энергии удара использование двухмассного ударного устройства, оснащенного механо-упругим аккумулятором энергии, передающей с некоторой задержкой

времени относительно момента удара при неизменных параметрах ударной системы, приводит к увеличению до 1,5 раз глубины лунки выкола при контактном разрушении песчаника и 1,7 раз объема пластически деформированного металла.

2. Показано, что при контактном разрушении металлов и хрупкой породы применение ударного инструмента, состоящего из нескольких ударных элементов, приводит к существенному увеличению продолжительности ударного импульса (до 2 раз).

3. Установлено, что при скоростях, имеющих место в ударных устройствах гравитационного действия (до ~ 5 м/с), глубина внедрения ударного инструмента в хрупкую породу может быть рассчитана с использованием показателей жесткости системы «инструмент – порода», установленных при внедрении инструмента в породу в квазистатических условиях.

Теоретическая и практическая значимость работы:

На основе статистически достоверной информации, полученной в результате проведения лабораторных экспериментов, выявлена зависимость глубины лунок a_n , образующихся при контактном разрушении хрупкой породы и пластической деформации металлов многомассным ударным инструментом, в том числе, и оснащенным упругосжатым аккумулятором энергии, от энергии удара Q вида $a_n = k_i Q^{0.5}$ при значениях коэффициента k_i , возрастающих с числом ударных элементов в конструкции от 1-го до 3-х.

Даны рекомендации по созданию многомассного устройства гравитационного действия с увеличенной энергией удара и продолжительностью ударного взаимодействия с породой, способствующих возрастанию до 1,7 раз площади сечения раскалываемого негабарита по сравнению с существующим инструментом близких массогабаритных характеристик.

Результаты исследований приняты к внедрению в учебный процесс Горным университетом, и в производственный процесс обществом с ограниченной ответственностью «Металло-механический завод» г. Прокопьевск Кемеровской обл.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач используется комплексный метод, включающий анализ и обобщение результатов исследований, приведенных в литературных источниках, экспериментальные исследования на разработанной установке с использованием реальных образцов породы, компьютерную обработку результатов, разработку математической модели и, с использованием расчетных и экспериментальных данных, анализ процессов внедрения устройства в породу.

Соответствие паспорту специальности.

Тема исследования соответствует п. 4 «Обоснование и выбор конструктивных и схемных решений машин и оборудования во взаимосвязи с горнотехническими условиями, эргономическими и экологическими требованиями» паспорта научной специальности 05.05.06 – Горные машины.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. С использованием физической модели доказано, что применение двухмассной системы ударного устройства гравитационного действия, обеспечивающей последовательное воздействие ударных тел на пластины металлов и хрупкой породы и реализующей принцип аккумуляции энергии, увеличивает до 1,5 раз глубину внедрения устройства в пластины и до 1,7 раз объем пластически деформированного металла по сравнению с ударным одномассным инструментом, падающим с той же высоты.

2. По результатам ударного разрушения более 200 образцов песчаника различных размеров установлено, что применение многомассной ударной системы, состоящей из корпуса и ударных элементов с углом приострения их конусной части ~

60° и соотношении с массой корпуса, как 1:1, способствует увеличению до 2 раз продолжительности силового воздействия и снижению до 1,4 раз удельной энергии разрушения породы

Степень достоверности результатов исследования.

Достоверность результатов работы согласуется с результатами общепризнанных исследований в области ударного разрушения горных пород и подтверждается сходимостью результатов расчета и эксперимента.

Апробация результатов работы. Основные положения работы, результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались и получили положительную оценку на конференции «Современные процессы горного производства» Фрайберг, 2019; Международный симпозиум «Нанофизика и Наноматериалы», 2019, 2020; Международная научно-техническая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME», 2020, 2021; IV-ой Международная научно-практическая конференция «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование», 2021.

Личный вклад соискателя заключается: в постановке цели, формулировке задач и разработке методик исследования, анализе основных теоретических представлений о процессе разрушения горных пород ударом, проведении экспериментальных и теоретических исследований процесса внедрения модельного и натурального инструмента в породу, разработке конструктивного решения устройства гравитационного действия повышенной эффективности.

Публикации. Основные результаты исследований содержатся в 4 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), а также 2 статья - в изданиях, включенных в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 3 патента.

Структура и содержание. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения общим объемом 140 страниц машинописного текста, содержит 5 таблиц, 53 рисунка, список литературы из 99 наименований, 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, цель, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

В первой главе анализируются наиболее распространенные способы разрушения негабаритов и основные закономерности ударного разрушения горной породы.

Вторая глава посвящена разработке методики по изучению эффективности схемных решений многомассного ударного инструмента, оснащенного аккумулятором энергии.

Методика разработана, исходя из соблюдения подобия условий взаимодействия с породой существующего натурального инструмента в виде клин-бабы и разработанного модельного инструмента. Для этого в экспериментах обеспечиваются контактные напряжения близкие к напряжениям, имеющим место при взаимодействии клин-бабы с породой, что согласно К.И. Иванову, гарантирует неизменность удельных энергозатрат на разрушение породы.

Процесс внедрения модельного и натурального инструмента в породу представлялся в виде функционала $\varphi = (\sigma_{км}, \sigma_{кн}, Q_m, Q_n, R_m, R_n, \beta_m, \beta_n)$, где $\sigma_{км}, \sigma_{кн}, Q_m, Q_n, R_m, R_n, \beta_m, \beta_n$ – контактные напряжения, энергии удара, радиусы площадки притупления и углы приострения модельного и натурального инструмента, соответственно из которого на основании π -теоремы получали необходимый критерий подобия (1):

$$\frac{\sigma_{к,м}}{\sigma_{к,н}} = \frac{Q_{,м}}{Q_{,н}} \left(\frac{R_{,м}}{R_{,н}} \right)^{-3} \quad (1)$$

Откуда, для выполнения условия подобия $\sigma_{км} = \sigma_{кн}$, должно обеспечиваться равенство $Q_{н}R_{м}^3 = Q_{м}R_{н}^3$, что реализовалось при выборе рабочих параметров модельного инструмента (при $R_{н} = 90$ мм, $Q = 176$ кДж необходимые значения $R_{м} = 3$ мм, $Q_{м ср} \sim 6,5$ Дж).

Испытания проводились на экспериментальной установке (рисунок 1), обеспечивающей свободное падение модельного инструмента с аккумулятором энергии с заданной высоты с нанесением сдвоенного удара по пластине анализируемого материала с записью осциллограммы ударного нагружения.

Объектом ударного воздействия являлись алюминиевые и медные пластины, а также образцы песчаника крепостью $f = 4$ по шкале М.М. Протодьяконова ($\sigma_{сж} = 82-112$ МПа), вырезанные вдоль слоистости из монолитных кусков породы. Модельный инструмент ($M_{\Sigma} = 2$ кг) состоял из цилиндрического корпуса 1 ($L_{к} = 295$ мм, $M_{к} = 1$ кг), одной или нескольких цилиндрических вставок 2 с конусообразным острием ($\gamma = 30^{\circ} - 90^{\circ}$) с площадкой притупления, крышки 3 и съемной сжатой оттарированной пружины 4, реализующей переход ее потенциальной энергии ($Q_{пр} \sim 3$ Дж) в кинетическую энергию инструмента в момент соприкосновения его корпуса со средой. Для получения сравнительных данных изготавливался такой же модельный инструмент, но одномассной конструкции.

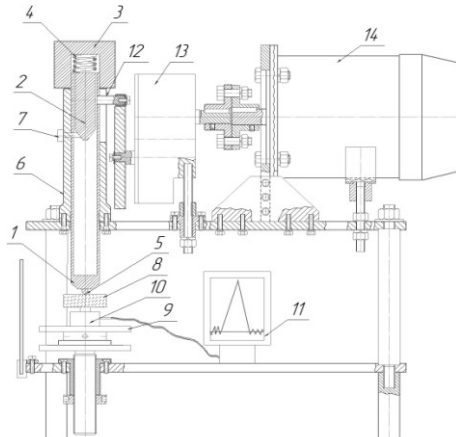


Рисунок 1 – Принципиальная схема установки по разрушению анализируемых материалов: 1 – корпус модельного инструмента; 2 – вставка(и); 3 – крышка; 4 – пружина; 5 – индентор ($R_M = 3$ мм); 6 – направляющая труба; 7 – стопор; 8 – пластина породы или металла; 9 – установочная плита; 10 – датчик силы; 11 – аналого-цифровой преобразователь NI USB 6008; 12 – кулачок; 13 – редуктор; 14 – электродвигатель

При заданной высоте H (кинетической энергии Q) в различные точки пластин модельным инструментом наносилась серия из 10 ударов. С использованием индикатора часового типа замерялись ($\pm 0,01$ мм) глубины лунок α_n с установлением их истинного значения (2):

$$\alpha_n = \bar{\alpha}_n + \sigma_{\alpha_n} \quad (2)$$

где $\bar{\alpha}_n$ – среднеарифметическое значение, σ_{α_n} – среднеквадратичное отклонение.

Рассчитывался объем деформированного металла V_d (3):

$$V_d = \rho \pi \alpha_n^2 \cdot \left(R_M - \frac{\alpha_n}{3} \right) \quad (3)$$

По которому строились зависимости α_n , $V_d = f(Q)$, записывались осциллограммы ударных нагружений.

В других экспериментах определялась минимальная энергия Q_p , необходимая для раскалывания образцов породы

различной площади сечения инструментом, с определением удельной поверхностной энергии (4):

$$Q_{уд} = Q_p / S_p. \quad (4)$$

где S_p – площадь поверхности разрушения.

В серии испытаний, проведенных в квазистатических условиях с использованием машины Zwick Roell ZHU 100 со скоростью перемещения траверсы $1,3 \cdot 10^{-5}$ м/с, осуществлялось внедрение того же модельного инструмента в пластины материалов с фиксацией зависимости усилия N от перемещения h . На различных стадиях вдавливания (значениях N) опыт прекращался с установлением глубины образовавшейся лунки $\alpha_{л.ст}$; строилась зависимость $\alpha_{л.ст} = f(N)$. Все измерения проводились на сертифицированном оборудовании.

Третья глава диссертации посвящена теоретическим исследованиям по оценке передачи твердой среде энергии удара одно- и многомассного ударного инструмента.

Учитывая, что рассматриваемый инструмент представлял собой упругий элемент относительно небольшой длины, считали, что влиянием волновых процессов на параметры его удара можно пренебречь (Как показали результаты экспериментов ($t_m \geq 3 T$, где t_m – время удара, T – период собственных колебаний тела) такое предположение – допустимо).

Исходя из результатов квазистатических испытаний, предполагали, что зависимость силы сопротивления среды N от глубины внедрения α инструмента при ударе состоит из двух силовых функций: нагрузки N_1 и разгрузки N_2 (5):

$$N_1 = g_\Sigma \alpha \text{ и } N_2 = N_m - g_2(\alpha_m - \alpha) \quad (5)$$

где N_m – максимальное усилие.

Первая, с суммарной жесткостью g_Σ , отвечает протеканию двух процессов: внедрения инструмента в среду с жесткостью g_1 и упругой деформации инструмента и среды под площадкой контакта с жесткостью g_2 . Стадия разгрузки с жесткостью g_2 отвечает процессу отбрасывания инструмента силами оста-

точной упругости инструмента и среды. Для такой схемы взаимодействия остаточная глубина внедрения α_l равна (6):

$$\alpha_1 = [(2g_\Sigma)^{0.5}(1/g_\Sigma - 1/g_2)] Q^{0.5} = KQ^{0.5}. \quad (6)$$

В случае многомассного инструмента с аккумулятором энергии (пружиной) суммарная энергия удара Q_Σ складывается из кинетической энергии корпуса и вставки Q , инерция движущейся массы которой участвует последовательно в формировании кинетической энергии инструмента дважды – при падении с заданной высоты всей системы и последующего равноускоренного движения массы вставки за счет энергии $Q_{\text{пр}}$ пружины (7).

$$\begin{aligned} Q_\Sigma &= Q + Q_{\text{пр}} = \frac{M_k V^2}{2} + \left(\frac{M_{\text{вст}} V_{\text{пр}}^2}{2} + \frac{M_{\text{вст}} V^2}{2} \right) = \\ &= \frac{M_k \sqrt{2gh}}{2} + \left(\frac{M_{\text{вст}} \sqrt{\frac{Fx}{M_{\text{вст}}}}}{2} + \frac{M_{\text{вст}} \sqrt{2gh}}{2} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Важно отметить, что передача ударного импульса вставкой происходит с некоторым запаздыванием относительно момента удара корпуса инструмента, что обеспечивает замедление отскока корпуса при ударе, сопровождаемое увеличением суммарной продолжительности удара; указанный вывод справедлив и для использования многомассного инструмента без аккумулятора энергии. Принимали, что в обоих случаях, их воздействие, условно, эквивалентно увеличению жесткости g_2 системы на стадии разгрузки до уровня g_2^* (рисунок 2) с изменением зависимости (6) до вида (8).

$$\alpha_1^* = [(2g_\Sigma)^{0.5}(1/g_\Sigma - 1/g_2^*)] Q_\Sigma^{0.5} = K^* Q_\Sigma^{0.5}. \quad (8)$$

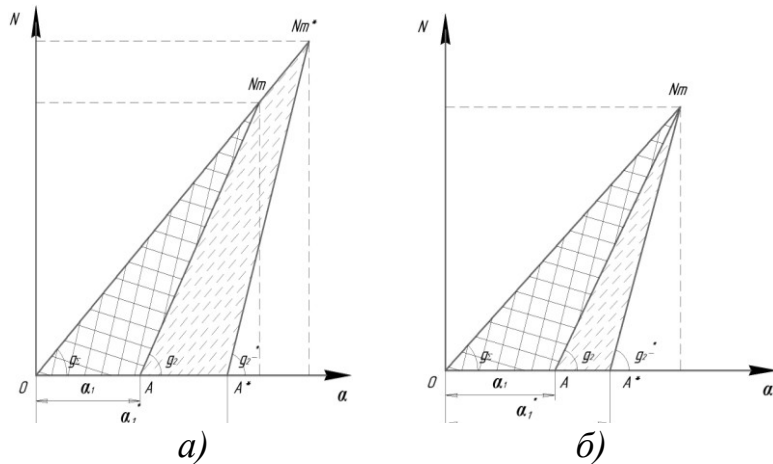
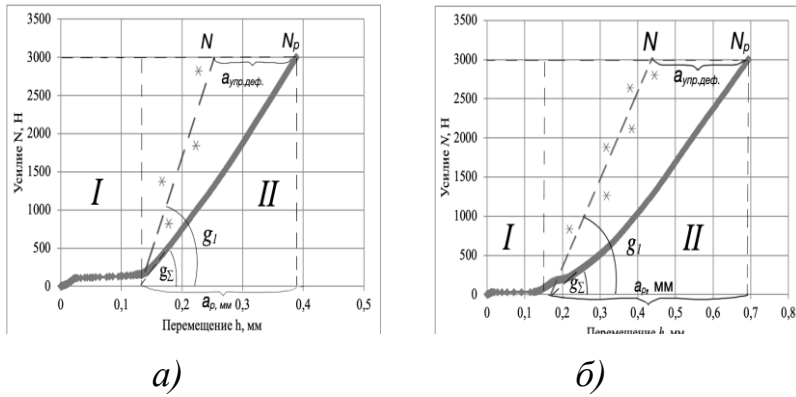


Рисунок 2 – Нагрузочная характеристика контактного разрушения среды при внедрении одномассного (линия $ON_m A$) и многомассного инструмента с аккумулятором (а) и без аккумулятора (б) энергии (линия $ON_m A^*$). (Полезные энергии Q_p и Q_p^* – площади треугольников $ON_m A$, $ON_m^* A^*$)

При таком допущении, увеличение глубины лунки при использовании инструмента с аккумулятором энергии (9).

$$\alpha_1^* / \alpha_1 = K^* Q_\Sigma^{0,5} / K Q^{0,5}. \quad (9)$$

Установление величин g_Σ , g_2 , необходимых для расчета α_1 , проводили, исходя из вида нагрузочных характеристик системы «инструмент - анализируемый материал», полученных в квазистатических условиях (рисунок 3, $\alpha_m = \alpha_p$, $\alpha_1 = \alpha_{л.ст}$, $\alpha_2 = \alpha_{упр.деф}$). При этом, исходили из вывода В.Б. Соколинского, что «коэффициент жесткости g ударной системы, определяемый углом наклона начальной части нагрузочной характеристики «усилие»-«величина перемещения», практически не зависит от скорости удара и это дает основание рассматривать взаимодействие исполнительных органов ударных машин с материалом как квазистатический процесс».



а)

б)

Рисунок 3 – Типичный вид зависимостей $N=f(h)$ при внедрении модельного инструмента в пластины песчаника (а) и алюминия (б) (α_p – глубина лунок $\alpha_{л.ст}$, $\alpha_{упр.деф}$ – величина упругой деформации, пунктир – их экстраполяция прямой линией)

Заключали, что зависимости графиков удовлетворительно аппроксимируются функциями вида (10):

$$N = g_{\Sigma}\alpha_p = g_{\Sigma}\alpha_m, N = g_I\alpha_{л.ст} = g_I\alpha_1, N = g_2\alpha_{упр.деф} = g_2\alpha_2 \quad (10)$$

с коэффициентами пропорциональности $g_{\Sigma} = 1,1 \cdot 10^7$ Н/м для песчаника; $0,45 \cdot 10^7$ Н/м для алюминия, $0,55 \cdot 10^7$ Н/м для меди и g_2 : $1,86 \cdot 10^7$ Н/м; $1,41 \cdot 10^7$ Н/м и $1,52 \cdot 10^7$ Н/м, соответственно.

В четвертой главе представлены результаты эксперимента и их сравнение с рассчитанными по предлагаемой модели.

Обнаружено (кривая 4 рисунка 4), что применение аккумулятора энергии повышает глубину внедрения инструмента α_l в среду (в 1,5 раза для песчаника) и объем V_d деформированного металла (в 1,7 для алюминия и 1,6 для меди) по сравнению с одномассным инструментом, падающим с той же высоты (кривая 1).

При использовании многомассного инструмента без аккумулятора энергии величины α_l для всех материалов и V_d (для

металлов) также увеличиваются. При этом, наибольшее увеличение α_l (в 1,25 раза для песчаника и алюминия, в 1,15 для меди) и V_d (в 1,5 для алюминия, 1,25 для меди) достигается для инструмента с двумя вставками. Важно отметить, что полученное увеличение глубины лунок ($\Delta\alpha_{l \max} \sim 0,22$ мм) существенно превышает среднее квадратичное отклонение в определении α_l ($\sigma_{l \max} \sim 0,07$ мм).

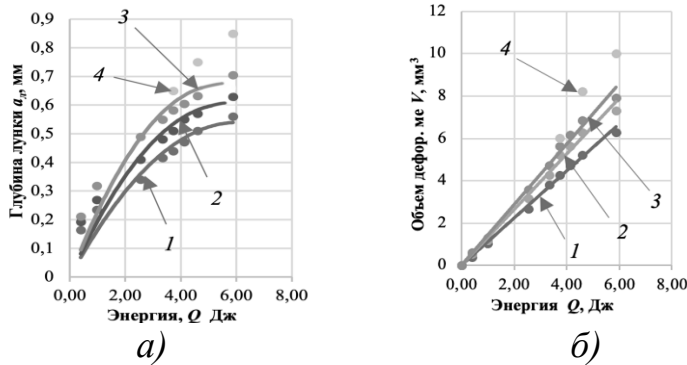


Рисунок 4 – Глубина лунок, образовавшихся в пластинах песчаника при применении одно - (1) и многомассного инструмента с 1-ой (2), 2-мя (3) вставками и аккумулятором энергии (4) (а), а также объем деформированной меди (б) в зависимости от кинетической энергии инструмента

Как видно из выражения (6), в случае справедливости предложенного математического описания процесса, между глубиной лунок α_l , регистрируемых в экспериментах в динамических условиях, представляющих собой остаточную глубину внедрения α_1 , α_1^* , и энергией $Q^{0,5}$ должна наблюдаться линейная зависимость, что, как оказалось, имеет место быть в экспериментах (рисунок 5). При этом рассчитанные с использованием установленных значений g_1 , g_2 коэффициенты пропорциональности K этой зависимости, отличаются от $K_{\text{экс}}$ для одномассного инструмента не больше, чем на 7 %.

Подставляя экспериментально установленные значения K^* для многомассного инструмента в (8), получали глубины лунок для инструмента с аккумулятором энергии при различных кинетических энергиях Q , которые оказались весьма близкими к полученным экспериментально. Так, для песчаника при $K = 0,242 \cdot 10^{-3} \text{ м/Дж}^{0,5}$, $K^* = 0,298 \cdot 10^{-3} \text{ м/Дж}^{0,5}$, $Q = 6 \text{ Дж}$, $Q_\Sigma = 9 \text{ Дж}$ расчетные (6, 8) значения $\alpha_1 = 0,59 \text{ мм}$, $\alpha_1^* = 0,89 \text{ мм}$, $\alpha_1^*/\alpha_1 = 1,50$ при $\alpha_{л1} = 0,56 \text{ мм}$, $\alpha_{л1}^* = 0,85 \text{ мм}$, $\alpha_{л1}^*/\alpha_{л1} = 1,52$.

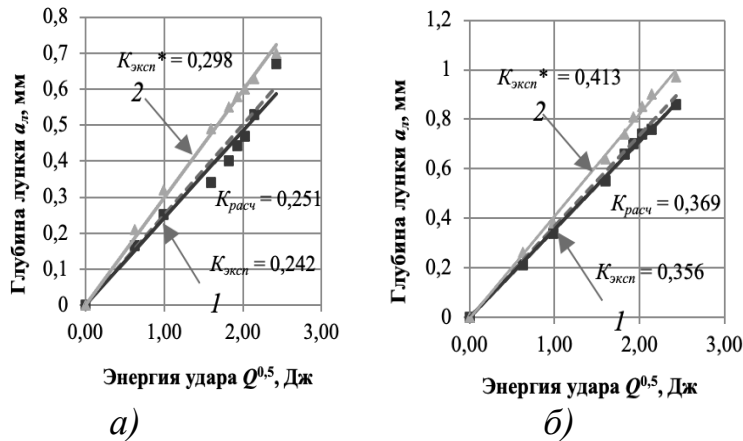


Рисунок 5 – Зависимости глубины лунок a_l после ударного воздействия одномассного (1) и многомассного (2) инструмента на пластины песчаника (а) и меди (б) от кинетической энергии инструмента Q (пунктир - расчет)

При переходе от одно - к многомассному инструменту к существующему максимуму N_m усилий на осциллограммах добавляются дополнительные максимумы (рисунок 6), убывает величина усилия (до 2,8 раз) и возрастает продолжительность удара t_y : от 0,15 мс для одно- до 0,30 мс для многомассного, т.е. в 2 раза.

Полученное возрастание t_y при переходе к многомассному инструменту, как оказалось, находит своё отражение и в уменьшении удельной энергии разрушения образцов песчани-

ка: с 60 до 44 кДж/м² (без аккумулятора энергии) и до 36 кДж/м² (с аккумулятором).

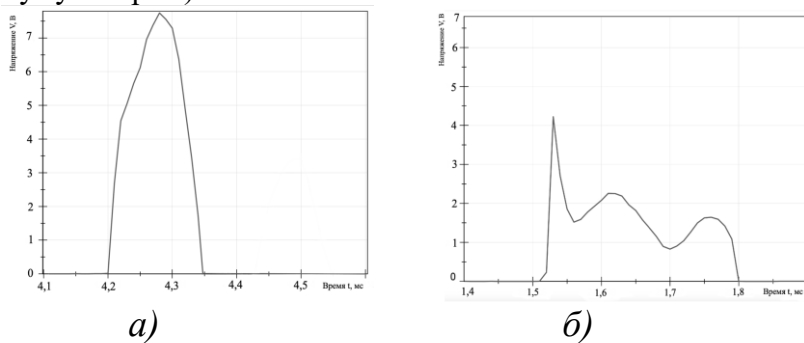


Рисунок 6 – Типичный вид осциллограмм усилий, возникающих при внедрении в пластину песчаника одномассного (а) и многомассного (б) инструмента

Пятая глава посвящена обоснованию и выбору схемных и конструктивных решений устройства дробления негабаритов ударом увеличенной энергии и продолжительного действия (рисунки 7, а, б), защищенных авторскими свидетельствами и внедренных на предприятии ООО «Металло-механический завод» (имеется акт внедрения).

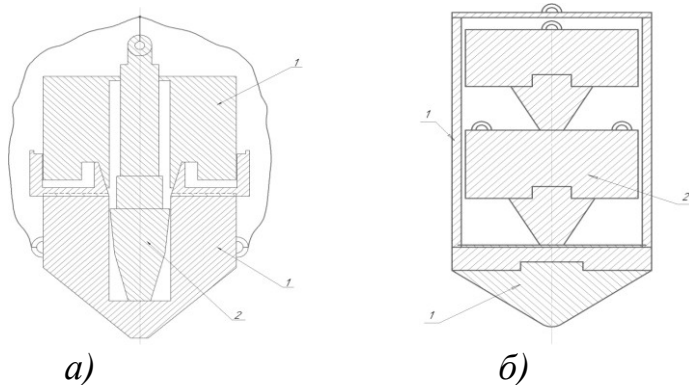


Рисунок 7 – Схемные решения предлагаемого устройства с аккумулятором (а) и без аккумулятора (б) энергии: 1 – корпус; 2 – ударник(и)

Исходя из экспериментально установленных рациональных параметров модельного инструмента, угол приострения γ ударников 2 устройств должен быть $\sim 60^0$, отношение массы корпуса 1 к их массе ~ 1 . Для предотвращения пластической деформации металла и абразивного изнашивания приостренные части ударника и корпуса изготавливаются из стали 110Г13Л, способной, не разрушаясь, выдерживать сжимающие напряжения до 6000 МПа при абразивной стойкости, превышающей стойкость зарубежных сталей Hardox и Miiluks (по данным автора).

Исходя и из установленных значений $Q_{уд}$, заключали, что применение разработанных устройств позволит повысить до 1,7 раз площадь сечения раскалываемого негабарита по сравнению с существующим устройством (клин-бабой) близких массогабаритных характеристик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной задачи обоснования конструкции устройства дробления негабаритов с эффективным использованием энергии, что вносит существенный вклад в развитие горной промышленности РФ.

1. Анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований процесса ударного разрушения горных пород показали, что вопросы, связанные со смещением времени воздействия ударных тел на негабарит и влиянием увеличения энергии удара без существенного изменения массогабаритных характеристик устройств для дробления негабарита, исследованы недостаточно полно, что требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

2. С использованием физической модели доказано, что применение двухмассной системы ударного устройства грави-

тационного действия, обеспечивающей последовательное воздействие ударных тел на пластины металлов и хрупкой породы и реализующей принцип аккумуляции энергии, увеличивает до 1,5 раз глубину внедрения устройства в пластины и до 1,7 раз объем пластически деформированного металла по сравнению с ударным одномассным инструментом, падающим с той же высоты.

3. По результатам ударного разрушения более 200 образцов песчаника различных размеров установлено, что применение многомассной ударной системы, состоящей из корпуса и ударных элементов с углом приострения их конусной части ~ 60° и соотношении с массой корпуса, как 1:1, способствует увеличению до 2 раз продолжительности силового воздействия и снижению до 1,4 раз удельной энергии разрушения породы.

4. Обоснованы 2 схемных и конструктивных решения ударного устройства гравитационного действия, обеспечивающих увеличение до 1,7 раз площади сечения раскалываемого негабарита по сравнению с существующим устройством близких массогабаритных характеристик.

5. Дальнейшее развитие темы диссертационного исследования может быть связано с использованием эффекта многократного удара при разработке других породоразрушающих инструментов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК

1. Болобов, В.И. Зависимость наработки пики гидромолота от износостойкости ее материала / В.И. Болобов, Л.Т. Бинь, С. А. Чупин, **В.А. Плащинский**// Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 5. – С. 68–79.

2. Болобов, В.И. О влиянии поверхностного упрочнения на ударно-абразивную износостойкость стали Гадфильда / В.И. Болобов, В.С. Бочков, Э.В. Ахмеров, Е.А. Кривокрисенко, **В.А. Плащинский** // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2020. – №6. – С. 252-255.

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

3. Bolobov, V.I. The effect of finely divided martensite of austenitic high manganese steel on the wear resistance of the excavator buckets teeth / Bolobov V.I., Chupin S.A., Akhmerov E.V., **Plaschinskiy V.A.** // Key Engineering Materials. – 2020. Issue 10. pp. 3-9.

4. Bolobov, V.I. Influence of impact duration on fracture efficiency in rocks and on plastic deformation of metals / Bolobov V.I., **Plaschinsky V.A.** // Mining Informational and Analytical Bulletin. – 2022. – № 3. – P. 78–96.

Патенты:

5. Патент № 2751895 Российская Федерация, МПК E21C 37/02 (2006.01) B02C 1/14 (2006.01). Устройство для дробления негабаритов: № 2020138388: заявл. 24.11.2020: опубл. 19.07.2021/ Болобов В.И., **Плащинский В.А.**, Иванов С.Л.; заявитель СПГУ. – 10 с. : ил.

6. Патент № 208333 Российская Федерация, МПК E21C 37/00 (2006.01) B25D 17/02 (2006.01), B21J 13/06 (2006.01). Ударник для разрушения и пластической деформации материалов: № 2021122401: заявл. 28.07.2021: опубл. 14.12.2021/ Болобов В.И., **Плащинский В.А.**, Иванов С.Л., Шахназаров К.Ю.; заявитель СПГУ. – 7 с. : ил.

7. Патент № 2731994 Российская Федерация, МПК C21D 8/00 (2006.01) B02C 13/00 (2006.01). Способ изготовления молотка дробилки: № 2020110425: заявл. 11.03.2020: опубл. 09.09.2020 /Болобов В.И., **Плащинский В.А.**, Ракитин И.В., заявитель СПГУ.