

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Болобов В.И.

Санкт-Петербург – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ДЛЯ ДРОБЛЕНИЯ НЕГАБАРИТА ГОРНОЙ ПОРОДЫ, А ТАКЖЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПАРАМЕТРЫ РАЗРУШЕНИЯ.....	12
1.1 Разрушение негабарита на открытых горных работах.....	12
1.2 Способы разрушения негабаритов горных пород и средства их реализации... 16	16
1.2.2 Термический, акустический, электрический и гидравлический способы и средства их реализации	19
1.2.3 Механические способы разрушения и средства их реализации	21
1.3 Анализ факторов, влияющих на процесс разрушения негабаритов	30
1.3.1 Основные положения существующих теорий дробления	31
1.3.2 Анализ процессов ударного разрушения породы.....	33
1.3.3 Влияние свойств горной породы на процесс разрушения.....	38
1.3.4 Зависимость энергоемкости процесса разрушения от энергии удара	39
1.3.5 Влияние скорости нагружения ударной нагрузки.....	41
1.3.6 Влияние продолжительности ударного воздействия	46
1.4 Анализ существующих устройств повышенной эффективности для дробления негабаритов	52
1.5 Выводы по главе 1	55
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ МНОГОМАССНОГО УДАРНОГО ИНСТРУМЕНТА, ОСНАЩЕННОГО АККУМУЛЯТОРОМ ЭНЕРГИИ	57
2.1 Анализ существующих методов и экспериментальных стендов для исследования процессов разрушения горной породы ударной нагрузкой	57

2.2	Разработка методики и экспериментальной установки по изучению эффективности схемных решений многомассного ударного инструмента, оснащенного аккумулятором энергии, при разрушении металлов и хрупкой горной породы.....	65
2.2.1	Методика и экспериментальная установка для изучения закономерностей взаимодействия ударного инструмента с породой.....	65
2.2.2	Обоснование подобия процессов внедрения в породу модельного инструмента и клин-бабы	71
2.2.3	Методика и экспериментальная установка для изучения закономерностей взаимодействия модельного инструмента с породой в квазистатических условиях.....	74
2.3	Выводы по главе 2	75
ГЛАВА 3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ ПЕРЕДАЧИ ТВЕРДОЙ СРЕДЕ ЭНЕРГИИ УДАРА ОДНО- И МНОГОМАССНОГО УДАРНОГО ИНСТРУМЕНТА		77
3.1	Основные методы расчета параметров удара ударной системы.....	77
3.2	Теоретические исследования по оценке эффективности передачи твердой среде энергии удара ударным инструментом	80
3.3	Анализ процессов, происходящих при внедрении модельного инструмента в песчаник и металлические материалы в квазистатических условиях	84
3.4	Выводы по главе 3	87
ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ СРАВНЕНИЕ С РАССЧИТАННЫМИ ПО ПРЕДЛАГАЕМОЙ МОДЕЛИ		89
4.1	Закономерности внедрения модельного инструмента в анализируемые материалы в динамических условиях	89
4.2	Подтверждение правомочности математической модели процесса ударного внедрения инструмента в анализируемые материалы	98

4.3 Оценка влияния составной конструкции инструмента на КПЭ удара	100
4.4 Соотношение работы разрушения пластин породы в статических и динамических условиях	103
4.5 Выводы по главе 4	105
ГЛАВА 5 ОБОСНОВАНИЕ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ УТСРОЙСТВА НЕГАБАРИТОВ УДАРОМ УВЕЛИЧЕННОЙ ЭНЕРГИИ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ	107
5.1 Установление рациональных параметров конструкционных элементов многомассного устройства.....	107
5.1.1 Определение рационального соотношения между массами корпуса и вставки многомассного устройства.....	107
5.1.2 Определение рационального угла заострения вставки многомассного устройства составной конструкции	109
5.1.3 Основные конструкционные элементы предлагаемой конструкции многомассного устройства, выбор материалов и предложения по способу их изготовления.....	110
5.1.4 Установление размеров основных элементов многомассного устройства ударного действия	116
5.2 Сравнительная оценка эффективности разрушения негабаритов с применением существующей клин-бабы и предлагаемого многомассного устройства.....	120
5.3 Выводы по главе 5	121
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	123
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	125
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт внедрения результатов диссертационной работы...136	136
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт внедрения результатов диссертационной работы...137	137

ПРИЛОЖЕНИЕ В Свидетельство о государственной регистрации патента на изобретение «Устройство для дробления негабаритов».....	138
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Свидетельство о государственной регистрации патента на полезную модель «Ударник для разрушения и пластической деформации материалов».....	139
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Свидетельство о государственной регистрации патента на изобретение «Способ изготовления молотка дробилки».....	140

ВВЕДЕНИЕ

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 и ее доли, затрачиваемой на разрушение породы, таких устройств 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., Вихляева А.А., Ефремова Э.И., Иванова К.И., Кильчевского Н.А., Котылева Ю.Е., Недорезова И.А., Ровинского М.И., 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 и негабаритов, в частности. 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 аккумулятора 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 повышенной 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 препятствию 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 ал, 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 области.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач используется комплексный метод, включающий анализ и обобщение результатов исследований, приведенных в литературных источниках, экспериментальные ис-

следования 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.

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 $\sim 60^\circ$ 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: Международная 59 студенческая научная конференция по горному делу в Краковской Горно-Металлургической академии, 2018 г., г. Краков, Польша; XVII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов, 2019 г., г. Санкт-Петербург; Международная конференция «Современные процессы горного производства» на базе Технического университета «Фрайбергская горная академия», 2019 г., г. Фрайберг, Германия; Международной симпозиум «Нанозифика и Наноматериалы», 2019 г., г. Санкт-Петербург; XVIII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования», 2020 г., г. Санкт-Петербург; Международная научно-техническая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020», 2020 г., г. Санкт-Петербург.; Международный симпозиум «Нанозифика и Наноматериалы», 2020 г., г. Санкт-Петербург.; Международная научно-техническая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021», 2021 г., г. Санкт-Петербург; «IV-ая Международная научно-практическая конференция Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование», 2021 г., г. Санкт-Петербург.

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

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены 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, а также 2 статьях в издани-

ях, включенных в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 3 патента.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и библиографического списка. Содержит 140 страниц машинописного текста, 5 таблиц, 53 рисунка, список литературы из 99 наименований, 5 приложений.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ДЛЯ ДРОБЛЕНИЯ НЕГАБАРИТА ГОРНОЙ ПОРОДЫ, А ТАКЖЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПАРАМЕТРЫ РАЗРУШЕНИЯ

1.1 Разрушение негабарита на открытых горных работах

В настоящее время основным способом ведения горных работ является буровзрывной, который получил такое распространение благодаря таким своим достоинствами как высокая производительность, малые затраты времени на подготовку и проведение работ, независимость от источников энергии [4, 5, 19, 37, 38, 39, 47, 62]. Главным показателем эффективности взрывных работ служит получение гранулометрического состава взорванной горной массы, отвечающего условиям эффективного использования добычного оборудования. Параметры гранулометрического состава, как правило, измеряют при помощи таких методов как ситовый анализ; поштучный обмер (учет); планиметрический (метод Делесса), линейный (метод Розиваля) и точечный (метод А.А. Глаголева) [7, 62, 72]. Для оценки гранулометрического состава используют заранее установленные законы распределения, среди которых наибольшее распространение получил логарифмически нормальный закон распределения [62, 72].

Однако известно, что горные породы являются неоднородными телами, поэтому такие факторы как трещиноватость, блочность, количество систем трещин и их ориентировка создают различные структурные ослабления, которые в процессе прохождения волны взрыва легче отделяются от массива, что приводит к образованию кусков большого объема, называемых негабаритами, которые затрудняют дальнейшее ведение горных работ [18, 40].

Негабариты горной породы определяют как крупные куски ископаемого, наибольший размер которых превышает размер меньшей стороны приёмного отверстия дробилок крупного дробления с коэффициентом 0,75-0,85 [47] либо 2/3 наименьшего измерения ковша экскаватора по ОСТ 24.072.11-81 [49]. Размер негабарита на предприятиях с циклом переработки на дробильно-сортировочной фабрике устанавливается в зависимости от имеющегося оборудования и составляет 0,7-1,2 м в максимальном измерении [1, 41].

Процент выхода негабарита – отношение объёма кусков, имеющих размеры выше предельно допустимых, к общему объёму отбитой горной массы. Единными нормами [47] установлен допускаемый процент выхода негабарита в зависимости от категории пород по трещиноватости, который не превышает 4 % при максимальном линейном размере куска более 2 м.

Так, согласно данным [33, 40], методы взрывных работ дают ориентировочно следующий выход негабаритных кусков:

– шпуры - от 2 до 6% кусков размерами больше 0,5 м; - котловые шпуры и рукава - от 5 до 15% кусков размерами больше 0,5 м;

– колонковые скважины - от 10 до 25% кусков размерами больше 0,7 м; котловые скважины - от 15 до 30% кусков размерами больше 0,7 м; камерные заряды - от 15 до 40% кусков размерами больше 0,7 м.

Наличие негабарита отрицательно влияет на технико-экономические показатели разработки месторождений. Так, при добыче полезных ископаемых на открытом карьере при высоком проценте выхода негабаритов необходимо иметь достаточно большие площади для их складирования (рисунок 1.1), что ведёт к снижению эффективности работы экскаваторно-автомобильного комплекса оборудования [38, 39], поэтому для ликвидации негабаритов горных пород применяют различные методы так называемого вторичного дробления пород. Проведение подобного рода операций влечет затраты трудовых ресурсов и времени, что приводит к снижению эффективности всего производства.



а)



б)

Рисунок 1.1 – Раскладка (а, б) и перемещение (в) негабаритов горной породы внутри карьера

Согласно данным [1], увеличение выхода негабарита с 2,5 до 5 % вызывает снижение производительности экскаватора на 20-30 %, при 20 % его производительность снижается в 2-2,5 раза. При снижении выхода негабарита в условиях ОАО «Каменногорское карьероуправление» с 15 до 3 % производительность экскавации возросла в 2 раза, с 15 до 0 % – в 2,5 раза [18].

Образующийся негабарит в процессе погрузки, разгрузки и транспортирования способен вызывать целый ряд опасных производственных ситуаций (рисунок 1.2) таких как:

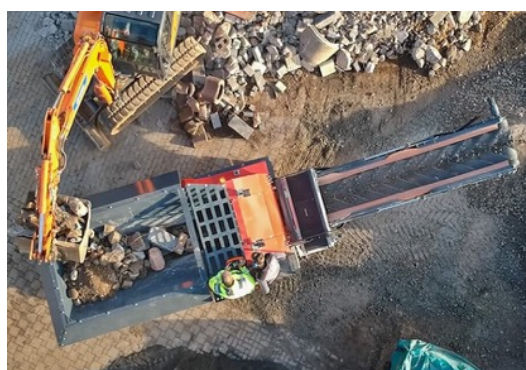
- опрокидывание экскаваторов и погрузчиков в процессе подъёма негабаритов (рисунок 1.2, а, б);
- застревание кусков негабарита в бункерах дробильного оборудования, разрушение исполнительных органов дробилок (подвижной щеки, станины, элементов футеровки) из-за высоких динамических нагрузок (рисунок 1.2, в) [18].



а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.2 – Возникновение аварийных ситуаций, вызываемых образованием негабаритов в открытом карьере

– выход из строя окон и приборной панели вследствие ударов падающих кусков негабарита при погрузке их в платформу автосамосвала [13], поломка элементов трансмиссии при транспортировке негабаритов, разрушение проушин гидроцилиндров, выход из строя уплотнительных соединений и разрыв шлангов, а также подъем погрузочной машины на задние колеса при погрузке негабарита в случае смещения его центра тяжести за ось поворота платформы (рисунок 1.2 з) [1, 18].

– поломка рукоятей и стрел, а также повышенный износ тяговых канатов [18];

Для уменьшения негативного влияния негабаритов на технологический процесс применяют ряд мероприятий [18, 32]:

1. Уменьшают сетку взрыва, при этом возникает риск получения переизмельченной фракции, что также как и негабарит представляет собой некондиционный материал и влечет потери продукции уже на первом этапе добычи [5, 19, 37, 39].

2. Применяют методы добычи без проведения буровзрывных работ. Так, в практике распространено использование виброрипперов, роторных и дисковых фрез, но данные методы не всегда подходят для добываемой породы. При добыче твердых и прочных пород, таких как диабаз, гранит, железные руды, вышеуказанные методы являются неэффективными и дорогостоящими [1].

3. Вторичное дробление негабаритов при помощи буровзрыва. Метод применяется, как правило, при наличии еденичных негабаритов большого размера, так как при потоковом их разрушении буровзрывом значительно возрастают сопутствующие затраты [5, 41].

4. Сортировка и отправка негабаритных кусков на склад. Стоит отметить, что данный метод не решает проблему негабаритов, а лишь позволяет отложить ее на определенное время, кроме того, он приводит к расходам на дополнительную транспортировку негабаритов на склад [9, 18].

1.2 Способы разрушения негабаритов горных пород и средства их реализации

Разрушение твердого тела в принятом смысле этого слова (исключая химические, тепловые или ядерно-физические процессы, например, растворение, разложение, плавление, радиоактивный распад вещества и т.д.) является в конечном счете механическим процессом, происходящим в результате воздействия механических напряжений, хотя природа, происхождение последних могут быть различными [1, 2, 87].

К выбираемому способу дробления негабаритов крепких горных пород предъявляется целый ряд требований, отражающих как специфику процесса, так и возможность использования его в промышленном масштабе. Основные из них следующие [69]:

1. Безопасность.
2. Достаточная производительность.
3. Низкая стоимость.
4. Низкая удельная энергоемкость процесса разрушения.
5. Простота подвода энергии к объекту воздействия и простота создания технических средств, необходимых для реализации способа.
6. Возможность создания установки, работающей в непрерывном производственном потоке.
7. Отсутствие отрицательного влияния на дальнейшие процессы переработки руд, в частности на их обогатимость.
8. Возможность максимальной механизации, автоматизации и программного управления процессом дробления.
9. Низкие удельные капитальные затраты.
10. Простота монтажа, эксплуатации и ремонта установки.
11. Соответствие условиям круглогодичной работы карьера с ведением взрывных работ, т.е. установка должна быть надежна при работе в атмосфере с

абразивом и пылью, при значительных сейсмических и температурных колебаниях и в различных атмосферных условиях.

12. Отсутствие избирательности способа по физическим свойствам дробимых пород.

13. Достаточная степень изученности, освоенности способа, что способствует наиболее быстрому внедрению результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в промышленность.

1.2.1 Взрывные способы

Взрывные способы исключительно широко применяются для отбойки ископаемых от массива и вторичного дробления породы (негабаритов), которые из-за больших размеров не могут быть погружены или разрушены в дробилках. Разработано множество способов взрывания, предназначенных для различных горно-технических условий и требований к взорванной массе [4, 7, 18, 37]. Основные достоинства взрывных способов - универсальность, разрушение кусков практически любого размера. Основные недостатки метода - относительно высокие удельные затраты энергии (до $15 \cdot 10^6$ Дж/м³), высокая стоимость и специфические особенности взрывной технологии, нарушающие ритмичность производства [37].

Для разрушения негабаритных кусков горной породы наибольшее распространение получили методы накладных или шпуровых зарядов.

При шпуровом способе возможно применение любых типов ВВ. Шпуры бурят ручными или колонковыми перфораторами. Их глубина составляет 1/2-1/4 толщины негабаритного куска, удельный расход ВВ – 0,1-0,3 кг/м³, а масса заряда в зависимости от крепости пород – 50-400 г [18].

Метод накладных зарядов применяется для разрушения хрупких и легкодробимых пород, а также при небольшом объеме работ, если затраты на повышенный расход ВВ меньше затрат на бурение шпуров [41]. Удельный расход ВВ зависит от прочностных свойств пород и формы куска, составляет от 1,5 до 3,0

кг/м³. Накладной заряд толщиной 4-5 см располагается на поверхности негабарита и прикрывается слоем глины или песка (рисунок 1.3 *а*) [41].

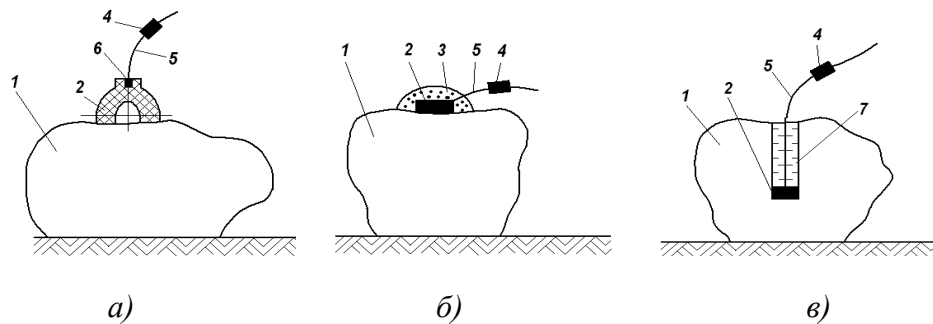


Рисунок 1.3 – Разрушение негабаритных кусков взрывом:

1 – негабарит; 2 – заряд ВВ; 3 – слой песка или глины; 4 – инициатор; 5 – детонирующий шнур;
6 – промежуточный детонатор; 7 – вода

Для повышения эффективности накладных зарядов используют специальные заряды мощных ВВ с кумулятивной выемкой (рисунок 1.3, *б*), которые позволяют снизить расход ВВ в 5-7 раз [41]. Они инициируются от стандартного электродетонатора (капсюля-детонатора) или неэлектрических волновых систем. За счет направленного действия взрыва такого заряда резко уменьшен разлет кусков породы и сокращен удельный расход ВВ до 0,4-0,6 кг/м³ [37]. Недостаток кумулятивных зарядов – их высокая стоимость.

Одним из модификаций взрывного способа разрушения негабаритов является способ гидровзрывного разрушения горных пород, заключающийся во взрывании зарядов в специальной камере с дальнейшим движением ударной волны и продуктов взрыва в шпур, заполненный водой (рисунок 1.3 *в*). Вследствие малого коэффициента объемного сжатия жидкости энергия взрыва переходит с небольшими потерями в ударную волну. Блок породы (негабарит) разваливается на части без разлета осколков, так как метательное действие взрыва выражено слабо, вследствие небольшого объема газообразных продуктов взрыва. При взрывании негабаритных кусков шпуровыми зарядами глубина шпура составляет 0,25-0,5 высоты куска. Расход бурения равен 0,2-1,0 м/м³ взорванной породы [37]. Удельный расход ВВ обычно составляет 0,1-0,3 кг/м³.

1.2.2 Термический, акустический, электрический и гидравлический способы и средства их реализации

Термический способ основан на неравномерном расширении тел при концентрированном нагреве. Разрушение негабаритов осуществляется ручными термобурами с огнеструйными горелками ракетного типа или термитами. Применение термитов основано на воздействии на негабарит теплом, получаемым при сжигании термитного состава. Процесс разрушения протекает быстро, не даёт разлёта кусков и образования вредных газов (за исключением дробления негабаритов сернистых руд), однако требует дополнительного механического воздействия для полного разрушения негабаритов. Применение термобуров ограничено; процесс разрушения отличается относительно высокой энергоёмкостью (до $7 \cdot 10^6$ Дж/м³). Производительность ручного термобура с мощностью горелки 100 кВт (на карьерах Кривбасса) 10-15 м³/ч [75].

Разрушение пород упругими гармоническими колебаниями, включая ультразвуковые, является механическим процессом, однако в связи с особенностями физической сущности акустических явлений, процесса разрушения пород и спецификой применяемого рабочего оборудования и подвода энергии к разрушаемому телу выделяются в отдельную группу. Для разрушения применяют диапазоны частот от 8-25 Гц при амплитуде до 15 мм. Применение низкочастотных вибраций для разрушения крепких горных пород не нашло широкого применения в связи с весьма низкой их эффективностью. Но, как показывает опыт, рыхлые, сильнотрещиноватые породы довольно эффективно разрушаются на грохотах и вибропитателях, работающих с частотой: 8-25 Гц при амплитуде до 15 мм. Поэтому в последнее время рассматривается вопрос [84, 85] о применении указанного оборудования, а также вибролотков для доразрушения негабаритных кусков пород, обработанных контактным способом токами различных частот, электромагнитным полем или другими физическими способами, не гарантирующими полное разрушение негабарита на отдельные куски.

Физическая сущность процессов разрушения горных пород электрическими способами может быть двойственной:

а) разрушение, когда используется явление, подобное взрыву, в результате чрезвычайно быстрого качественного изменения состояния вещества в процессе электрического воздействия;

б) электротермическое разрушение, при котором сущность процесса подобна термической.

По способу подвода энергии электрические способы имеют несколько разновидностей: разрушение с помощью электрогидроэффекта; контактный подвод электроэнергии к разрушаемой породе; воздействие переменным электромагнитным полем конденсатора; воздействие переменным электромагнитным полем индуктора (соленоида); обработка потоком заряженных частиц.

Основой процесса разрушения пород чаще всего является тепловой эффект, наводимый в породе под влиянием указанных факторов, но особенностью электрических способов является не только применение определенного вида энергии – электрического тока, но главным образом то, что эта энергия вводится внутрь породы или, по крайней мере, на некоторую ее глубину. Коэффициент преобразования тепла в механическую работу, как и при термических способах, невысокий. Но относительно высокая степень превращения электроэнергии в тепло определяет сравнительно небольшие ее удельные расходы – от 1 до 5 кВт·ч/м³ [31]. Такой эффект зачастую предопределяет выбор электрических способов при разработке рабочих органов буровых, отбойных машин и установок для разрушения негабаритных кусков пород [48, 85].

Возможны следующие химические способы разрушения или ослабления горных пород: путем химического разложения (растворения) вмещающих минералов (пустых пород) и связующих компонентов; путем обработки поверхностно-активными веществами. Практическое применение химических способов разрушения пород в горнодобывающей промышленности неизвестно, однако эти способы представляются наиболее простыми, малотрудоемкими, легко автоматизируемыми и применимыми для работы в потоке [41].

Различают два способа гидравлического разрушения горных пород: непрерывными струями жидкости и импульсными гидравлическими ударами.

Разрушение непрерывными струями воды довольно широко применяется при разработке пород, легко поддающихся размыву, типа песков и глин, а также слабых пород (например, мела) и углей. Гидроотбойка угля с предварительной нарезкой щелей находит все более широкое применение. Удельный расход электроэнергии на нарезку, смыв и транспортировку угля до камеры гидроподъема составляет 8,35 кВт·ч/т [23].

1.2.3 Механические способы разрушения и средства их реализации

Механические способы разрушения горных пород, заключающиеся в непосредственном подведении механической энергии к объекту воздействия – горной породе, отличаются большим разнообразием. Одним из главных преимуществ является отсутствие избирательности процесса по минеральному составу и физическим свойствам разрушаемых пород, за исключением их крепости. Применение механического способа разрушения исключает химические превращения, ухудшающие обогатимость руд, отличается сравнительно высокой производительностью, низкой энергоемкостью и стоимостью [6, 8, 10, 16, 17, 22, 40].

Наиболее существенными достоинствами процесса механического дробления негабаритов являются:

- простота подвода энергии к объекту воздействия;
- отсутствие необходимости превращения энергии в другие виды, что обуславливает сравнительно высокий КПД процесса;
- достаточно высокая производительность;
- непрерывность процесса;
- возможность автоматизации процесса;
- зависимость производительности только от крепости и фракционного состава исходного продукта;
- исключается необходимость обращения с взрывчатыми веществами, как следствие, уменьшается риск возникновения несчастного случая;
- устраняется образование ядовитых газов и загрязнение окружающей атмосферы;

- нет необходимости в использовании бурового оборудования для бурения шпуров в негабарите;
- исключается повреждение кабелей и оборудования кусками породы, разлетающимися при применении ВВ;
- не прерываются работы по погрузке и транспортированию горной массы;
- при первичном взрывании массива горных пород расстояние между скважинами можно увеличить при той же величине заряда.

Таким образом, при применении ударных машин для разрушения негабаритов не только уменьшаются негативные последствия для работы горных предприятий, вызванные применением взрывчатых веществ, но и повышается эффективность горных работ. Однако, существующие конструкции бутобоев не позволяют производить разрушение негабаритных фракций руд в массовом потоке, так как они нуждаются в индивидуальном наведении инструмента на место нанесения удара [30, 24, 97].

Согласно общепринятой классификация ударных машин для разрушения негабаритов – бутобоев по виду подводимой энергии они различаются: на пневматические (пневмомолоты), гидравлические (гидромолоты), дизельмолоты и гравитационные [1,96,94].

В пневмомолотах в качестве энергоносителя используется сжатый воздух. Они работают по принципу пневматических молотков, но энергия удара их увеличена до 500 Дж при частоте ударов около 300-900 в мин [9, 15]. Производительность разрушения пород средней крепости и крепких достигает 30 м³/ч, а энергоемкость разрушения – 4-6 кВт·ч/м³ [15]. Масса бутобоев может достигать 200 кг и более, поэтому их устанавливают на манипуляторах [15]. Работу бутобоев можно считать достаточно эффективной при разрушении отдельных кусков небольшой величины.

Большое распространение при проведении операций по разрушению негабаритов горных пород, а также рыхления мерзлых грунтов получили пневматические молоты таких производителей как Furukawa из Японии, Demag из Германии, Ingersoll-Rand из США и др [93].

Среди главных достоинств пневмомолотов можно отметить надежность соединительных узлов и уплотнений и хорошую ремонтнопригодность. Они могут работать в условиях высоких температур окружающей среды [25].

К недостаткам данных молотов можно отнести необходимость в применении дорогостоящих и громоздких компрессоров для создания сжатого воздуха, которые требуют соответствующего обращения с повышенными мерами предосторожности, кроме того, существует риск появления их отказа при эксплуатации при низких температурах и с высокой влажностью воздуха. Также к недостаткам можно отнести потребность в обеспечении насыщения рабочего цилиндра смазочным маслом воздуха, что обуславливает необходимость применения специальных устройств для этой цели [25].

Гидравлический молот представляет собой, как правило сменное рабочее оборудование гидравлических экскаваторов, гидрофицированных машин (стационарных глыборазбивочных установок, погрузчиков, манипуляторов), используемое для обработки прочных материалов (горных пород, грунта, металла) или погружения свайных элементов действием ударов падающих частей, разгоняемых жидкостью, находящейся под высоким давлением. Энергия удара гидравлических молотов варьируется в пределах 0,5...20 кДж; частота ударов 10...40 Гц [30]. Современные средства дробления единичных негабаритов позволяют достичь производительности не более 30-40 м³/ч.

Гидравлические ударные устройства лишены многих недостатков пневматических молотов, перечисленных выше [34]. В этой связи, в настоящий момент, они практически заменили собой последние при операциях по разделки негабаритов в карьерах и шахтах. Среди главного достоинства данного типа машин следует отнести высокую плотность потока энергии, обусловленную применением гидросистемы. Так, сообщается [50], что в среднем плотность потока энергии составляет 77 Вт/см², а коэффициент полезного действия – до 38 %, а ударная мощность – до 40 кВт [60].

В машинах ударного действия используются традиционные и оригинальные механизмы перемещения: гусеничные; пневмоколесные; опорно-шагающие; рас-

порно-шагающие, которые обеспечивают достаточную мобильность, устойчивость и несущую способность, и в каждом отдельном случае рационально сочетаются со вспомогательными машинами и оборудованием [66].

Гидравлические бутобои, могут быть выполнены как на базе гидравлических экскаваторов, шасси автомобилей и тракторов (рисунок 1.4 а) так и представлять собой стационарную установку (рисунок 1.4 б).



а)



б)

Рисунок 1.4 – Гидравлическая установка для дробления негабаритов на базе экскаватора (а) и стационарная установка для дробления негабаритов на приемной решетке грохота (б)

Стационарный манипулятор-бутобой представляет собой устройство, внешне напоминающее обычный экскаватор с гидромолотом, но закрепленный на поворотной колонне, которая имеет четыре степени подвижности. Гидравлическая энергия машине передается посредством электрической насосной гидростанции.

Модели манипуляторов, также как и экскаваторов, имеют различные зоны досягаемости и варианты установки гидромолота. Рабочая зона, обслуживаемая установкой, зависит от геометрических размеров и кинематики манипулятора. Диапазон варьируется от 2 метров и грузоподъемности гидравлического молота 200 кг до 17 метров и грузоподъемности гидромолота 5 тонн. Манипуляторы в настоящее время успешно применяются на российских предприятиях горной промышленности для разрушения негабаритов на питателе, грохоте и дробилке [68].

Преимущества манипуляторных установок перед другими решениями [67]:

1. Простота управления – не требуется наличие специализированных навыков у оператора.
2. Экономичность – электрический привод насосной станции дешевле, проще и надежнее в эксплуатации и обслуживании.
3. Безопасность – нет необходимости нахождения людей в опасной зоне.
4. Высокая производительность – быстрое устранение затора.

Однако, важно отметить, что бутобои гидравлического действия требуют обеспечения высокой точности изготовления и чистоты обработки деталей, что обуславливает высокую стоимость данных машин. Кроме того, в качестве источника энергии используется гидравлический привод, который также значительно удорожает производство работ устройствами данного типа.

Дизельмолот – устройство для разрушения горной породы, традиционно используемое для забивания свай в землю, нашедшее применение и в горной промышленности для разрушения негабаритов (рисунок 1.5). Принцип действия аналогичен работе дизельного двигателя [63,66].



Рисунок 1.5 – Дизель-молот штанговый ДМ-150 при дроблении известняка

Рабочий процесс в дизельмолоте происходит следующим образом: при движении вниз ударного элемента – бабы, который выполняет функцию и бойка, и поршня, происходит сжатие воздуха, находящегося в рабочем цилиндре, одно-

временно с этим дозатор подает топливо в лунку шабота и после того, как баба ударяет по шаботу происходит воспламенение топливно-газовой смеси, после чего баба отбрасывается обратно наверх газами. После подъема в крайнюю верхнюю точку, израсходовавшая энергию баба снова падает вниз, после чего цикл повторяется вновь. То есть, кинетическая энергия ударного элемента затрачивается на удар, а возврат в исходное положение осуществляется за счет работы газов [67].

Особенностью рабочего цикла является низкое качество распыла топлива, что приводит к выбросу сажи и снижению коэффициента полезного действия (КПД). При этом, стоимость дизель-молота на порядок ниже стоимости гидромолота, то же касается и технического обслуживания агрегатов [67].

Сложности использования дизель-молота при дроблении негабаритов:

- необходимость поддержания устойчивой работы, т. е. плотность прижатия шабота с инструментом к поверхности негабарита: степень сжатия (влияет на высоту подпрыгивания поршня-ударника, устойчивость работы дизеля) зависит от величины нормальной реакции, имеющей место при ударе шабота о негабарит - отсюда необходимость прижатия шабота с инструментом к поверхности негабарита;
- необходимость повторного пуска дизель-молота после каждого последующего разрушения негабарита в связи с потерей степени сжатия;
- влияние температуры окружающей среды на КПД дизель-молота;
- влажность воздуха влияет на качество приготовляемой рабочей смеси;
- молот при работе должен находиться в вертикальном положении (допускается отклонение от вертикальной оси на 5^0);
- необходимость жесткой фиксации дизель-молота на стреле экскаватора существенно уменьшается радиус действия всей установки;

Одним из самых первых и наиболее испытанных методов разрушения негабаритов горных пород является разрушения устройствами гравитационного дей-

свия. Известно, что и в настоящее время разрушение горной породы на открытых карьерах в ряде случаях производится с помощью буюба гравитационного действия, известного как клин- и шар-баба [61,69]. В этом случае с экскаватора, оборудованного стрелой драглайна, снимается ковш и на подъемном канате подвешивается ударный рабочий орган в виде клин- или шар-бабы (рисунок 1.6 *а, б*).

*а)**б)*

Рисунок 1.6 – Вид рабочего органа буюба гравитационного действия (*а*) шар-баба; (*б*) клин-баба

Также шар-бабу поднимают в ковше карьерного экскаватора в «прямой» или «обратной лопате», после чего ее сбрасывают на негабарит, раскалывая его на части нужного размера (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Сбрасывание шар-бабы с ковша экскаватора

При работе машинист крана поднимает бабу на определенную высоту, а затем, заставляя ее свободно падать, производит раскалывание. После разрушения

негабарита по всей ширине с одной стоянки экскаватор передвигается на 0,5-1,5 м, и цикл повторяется [17].

Разрушение негабаритов клин и шар-бабами проводят также при помощи стационарного крана, на рабочую площадку которого негабаритные куски подвозят экскаватором (рисунок 1.8). Стационарным краном 1 устройство для дробления негабаритов гравитационного действия 3 при помощи механизма подъема 2 и троса 4 поднимают на заданную высоту над негабаритом, далее осуществляют сбрасывание устройства путем расторможения механизма подъема. При необходимости нанесения повторных ударов цикл повторяется снова.

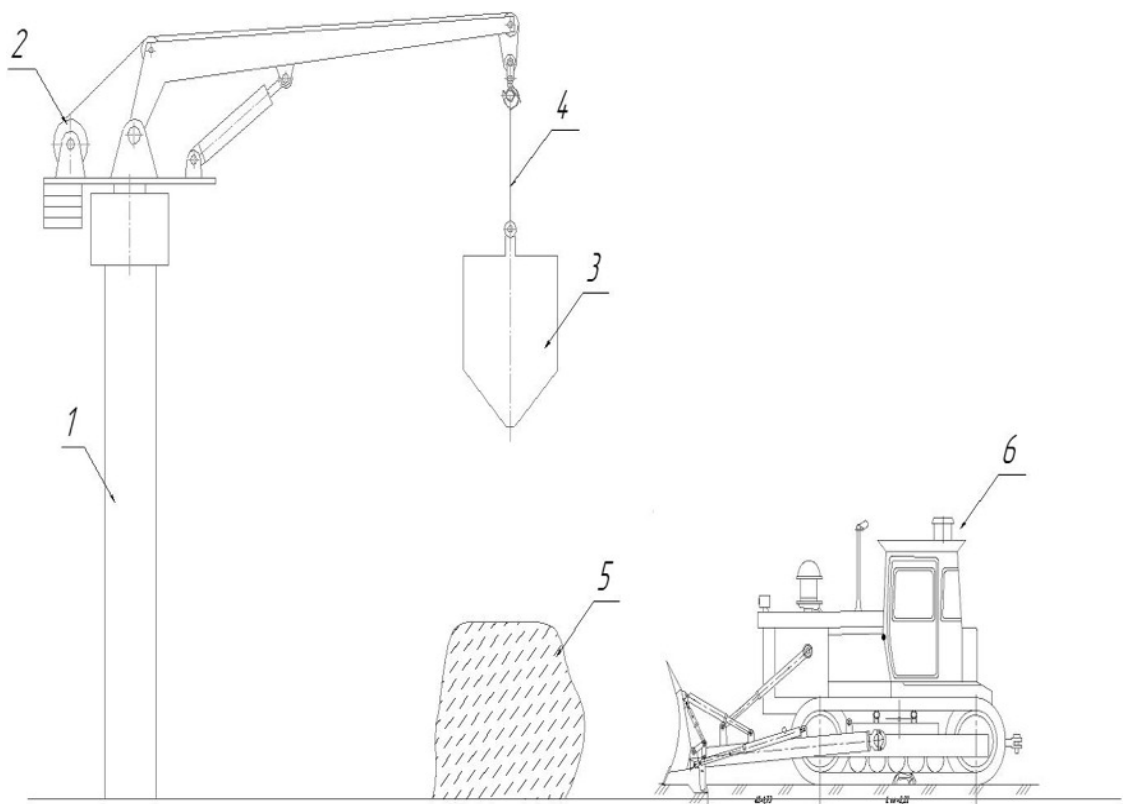


Рисунок 1.8 – Разрушение негабарита гравитационным способом

1- кран; 2 – механизм подъема; 3 – устройство дробления негабаритов; 4 – трос; 5 – негабарит;
6 – экскаватор

Существующие типоразмеры шар-баб:

- 1) 5 тонн – диаметр 1,075 м;
- 2) 6 тонн – диаметр 1,130 м;
- 3) 9 тонн – диаметр 1,300 м.

Шар изготавливается путем цельного стального литья высокой твердости, которая находится в пределах от 120 до 170 НВ. Для работы с шаром необходимо специальное исполнения ковша (возможность изготовления уточняется дополнительно у производителя).

Применение находят самые разные конструкции клин- и шар-баб. У большинства клин-баб тело и рабочий зуб представляют единое целое, по некоторые изготавливаются со встраиваемым зубом. Угол заострения рабочих зубьев у клин-баб составляет $20-65^{\circ}$ [61]. Одним из недостатков клин-баб является их опрокидывание при ударе об объект. Чтобы избежать его, на острие клина приваривают зубья, рабочие поверхности которых направляют твердым сплавом.

Область применения бутобоев гравитационного действия: скальные породы (граниты, габбро, диабаз, кварцит и т.д.), а также осадочные породы (известняк, доломит, мергель, гипс) [66].

Одним из недостатков устройств гравитационного действия является значительные потери энергии удара на упругие деформации. В связи с этим необходимо увеличивать вес устройства и высоту подъема, то есть повышать энергию единичного удара для того, чтобы минимизировать потери энергии удара на упругие деформации.

Значительное влияние на работу клин-бабы оказывает соотношение между ее длиной и поперечным сечением. Разрушение падающим грузом или под действием собственного веса достаточно эффективно при средней и ниже средней крепости пород. Затраты энергии при этом находятся около $0,1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$. При дроблении пород высокой крепости производительность разрушения значительно снижается.

Согласно данным [61] гравитационный способ разрушения может найти применение для вторичного дробления надгрохотного продукта при циклично-поточной технологии добычи крепких полезных ископаемых.

Как можно заключить из сказанного выше, устройства гравитационного действия для дробления негабаритов типа клин-бабы или шар-бабы являются од-

ними из давно испытанных и широко зарекомендовавших, применяемых с давних времен. Однако, относительно низкая производительность данного типа устройств, привела к тому, что в настоящее время предпочтение отдается таким современными устройствами как гидромолоты. Впрочем, применение клин-бабы для разделки негабаритов горных пород по сравнению с другими механическими устройствами имеет и свои существенные преимущества: хорошая изученность и испытанность способа; низкая зависимость от источников энергии; безопасность воздействия способа на окружающую среду; простота в изготовлении, эксплуатации и ремонте. В этой связи исследования, проводимые для повышения эффективности и производительности данного вида устройств, являются актуальными.

1.3 Анализ факторов, влияющих на процесс разрушения негабаритов

Исследованию процесса ударного разрушения негабаритов горных пород и разработке технических решений по усовершенствованию ударного инструмента посвящены работы сотрудников таких институтов как ИГД СО РАН, ННЦ ГПИГД имени А. А. Скочинского, ОАО «ВНИИстройдормаш», МИСИС, СПГУ, УГГУ, КарГТУ, ДонУГИ, КузГТУ, ОрелГТУ и др. Среди специалистов, внесших значительный вклад в создание и развитие теории ударного разрушения можно перечислить отечественных исследователей В.Б. Соколинского, Е.В. Александрова, Л.А. Шрейнера, Р.М. Эйгельса, Л.И. Барона, Л.С. Ушакова, И.С. Покровского, Н.С. Успенского, А.И. Остроушко, О.Д. Алимова и зарубежных Valci S., Bilgin N., и др.

Однако, несмотря на значительное количество выполненных исследовательских работ, существуют вопросы, которые до сих пор остаются дискуссионными, в том числе, такие как, влияние продолжительности ударного воздействия на энергоемкость дробления, соотношение между величиной энергии удара и частоты ударов и т.др.

1.3.1 Основные положения существующих теорий дробления

Известно, что работа разрушения в процессах дробления материалов затрачивается на деформацию разрушаемого объекта, преодоление сил сцепления составляющих его частиц, на создание новой поверхности и т.д., поэтому для количественного описания параметров процесса разработаны теории дробления.

Одной из первых классических теорий дробления считается созданная в 1867 Риттенгером теория, согласно которой работа, затрачиваемая на разрушение горной породы в процессе ее дробления оценивается в зависимости от характеристик исходного и конечного материалов [3, 27]. Главное положение теории утверждает, что энергия, расходуемая на измельчение, прямо пропорциональна разности площадей поверхности частиц исходного и конечного продуктов: расход энергии A_S , необходимой для разделения дробимого материала по одной плоскости, пропорционален величине вновь образованной поверхности S , по формуле (1.1):

$$A_S = K_S S = K_S D_0^2 \quad (1.1)$$

где K_S – коэффициент пропорциональности, устанавливаемый опытным путем, D_0 – эквивалентный диаметр куска.

Развитием данной теории послужили работы, проведенные В.А. Кирпичевым в 1874 г. и Киком в 1885 г. [3, 73]. Данная гипотеза получила название гипотезы Кирпичева – Кика. Она гласит, что расход энергии A_v при дроблении прямо пропорционален напряжениям σ , возникающим при деформации дробимого тела, его объему V и обратно пропорционален модулю Юнга E , определяемый по формуле (1.2):

$$A_v = K_v D_0^3 = \frac{\sigma^2 V}{2E} \quad (1.2)$$

Следует отметить, что первые теории дробления нашли ограниченное экспериментальное подтверждение справедливости своих формулировок и не применимы для всего диапазона крупностей, подходит для крупного дробления – раскалывания.

Теории Кирпичева – Кика и Риттингера в 1951 г. развил американский инженер Ф. Бонд, предложив свою гипотезу, разработанную им для среднего дробления, которая занимает промежуточное положение между ними, согласно которой работа A_δ , затрачиваемая в процессе разрушения твердого куска, пропорциональна приращению среднегеометрического между объемом V и поверхностью S , умноженная на коэффициент пропорциональности K_δ (1.3):

$$A_\delta = K_\delta \sqrt{VS} = K_\delta D^{2,5} \quad (1.3)$$

А.К. Рундквист в 1956 г. разработал свой вариант обобщенной формулы дробления, в которой степень n у линейного размера частицы определяют экспериментальным путем для каждого конкретного случая измельчения. Его формула имеет вид (1.4):

$$A_\Sigma = \frac{cV}{(K_p - 1)D^{K-1}} (i^{K_p - 1} - 1) \quad (1.4)$$

где A – энергия, расходуемая на измельчение;

K_p – коэффициент пропорциональности;

D – коэффициент пропорциональности;

i – степень измельчения.

При значениях $K_p = 2$ и $K_p = 2,5$ формула А.К. Рундквиста преобразуется соответственно в формулы Риттингера и Бонда, а при $K_p = 3$ после раскрытия неопределенности выводится формула Кирпичева–Кика.

В том же 1956 г. П.А. Ребиндер выдвинул гипотезу, согласно которой энергия, идущая на измельчение, складывается из энергии, расходуемой на деформацию тела при доведении его до разрушения Кирпичева–Кика, и энергии поверхности вновь образованных частиц после разрушения Риттингера. Таким образом, энергия, идущая на измельчение, представляет собой сумму двух энергий, из которых первая определяется по гипотезе Кирпичева–Кика, а вторая – по гипотезе Риттингера (1.5):

$$A = K_p S + K_p V = \sigma D^2 + K_p D^3 \quad (1.5)$$

Классические теории дробления неоднократно подвергались уточнениям и переосмыслениям. Так профессор С.Е. Андреев [1, 81] в своих исследованиях рассматривал всю работу, затрачиваемую на механическое дробление материала от диаметра D до диаметра d , как сумму работ по последовательным приемам: после каждого дробления часть куска затем снова дробится пополам и так последовательно до конечного диаметра. С.Е. Андреев [1, 81] пришел к выводу, что единый закон дробления устанавливает только гипотеза академика П.А. Ребиндера, в которую необходимо вводить поправки в зависимости от степени измельчения материала i .

Анализа исследований по определению затрачиваемой на разрушение горных пород энергии позволяет сделать следующий вывод: на данный момент не разработана теория, которая бы полностью и однозначно объясняла процессы дробления, обладала бы достаточно точным математическим аппаратом для расчета необходимой энергии и гранулометрического состава измельченного продукта. в настоящее время наиболее распространенными гипотезами являются эмпирические законы Риттингера и Кирпичева–Кика. Для количественной оценки энергоемкости дробления негабаритов горных пород используются гипотезы П. Риттингера, В.П. Кирпичева – Ф.Кика, Ф. Бонда, П.А. Ребиндера и др. [1].

1.3.2 Анализ процессов ударного разрушения породы

Объяснению механизма разрушения горной породы посвящено значительное количество исследований. Одними из первых работ, посвященных объяснению механизма разрушения, возникающего при внедрении индентора является проведенное в 1881 г. Г. Герцем исследование, в котором он описал процесс зарождения и развития системы конических трещин, возникающих в стекле вокруг контактной площадки, при достижении критической нагрузки [74] С момента появления первых теорий разрушения горной породы при одиночном внедрении индентора, и до настоящего времени постоянно предпринимаются попытки ее уточнения и переосмысления. Среди проведенных отечественных исследований, по-

священных объяснению механизма разрушения породы, кроме Н.С. Успенского, можно отметить работы И.С. Покровского, И.А. Остроушко, Л.А. Шрейнера, Б.В. Байдюка, Н.Н. Павловой, Б.В. Соколинского, Е.В. Александрова, Эйгельса и др., среди зарубежных исследователей – это Н. Е. Wagner и Н. Rschumann, В. Lawn и Т. R. Wilshaw, М. Hood, N.G.W. Cook, Р. А. Lindqvist. Их исследованиями установлены основные стадии процесса разрушения и главные факторы, влияющие на его интенсивность.

Согласно мнению Н.С. Успенского, рассматривавшего механизм разрушения горной породы при ударно-вращательном бурении, внедрение долота, как рабочего инструмента бура, происходит следующим образом (рисунок 1.9): внедряемое под действием силы P в породу долото в форме симметричного клина раздвигает и раздавливает частицы, при этом процесс разрушения продолжается до момента, «пока вся живая сила долота не будет поглощена этой работой разрушения породы и преодоления попутных вредных сопротивлений» [76,79].

Согласно предложенной им модели, временное сопротивление породы раздавливанию (согласно современной классификации, предел прочности породы на сжатие $\sigma_{сж}$) пропорционально отношению действующего усилия на площадь контакта. При этом автор [76] полагал, что главными действующими напряжениями, приводящими к разрушению породы, являются напряжения сжатия.

И.С. Покровский считал, что теория Н.С. Успенского не отражает действительности, поскольку клин не может внедряться и раздвигать частицы без потери сплошности породы. Вследствие того, что клин бура всегда имеет некоторую площадку притупления и при ударе бура о породу, площадка породы AB (рисунок 1.9), равная площадке притупления, воспринимает давление, которое будет производить сжатие породы [77]. В результате в породе образуется призма ABC максимальных сжатий по всей длине лезвия бура, объем породы внутри которой подвергнется выколу и будет действовать на остальную породу, как клин. Боковые плоскости этого клина AC и BC после потери сплошности по ним, в свою очередь, будут давить на окружающую породу, при этом произойдет выкалывание призм ACK и BCL и наконец откалывание породы по плоскости DK и LE .

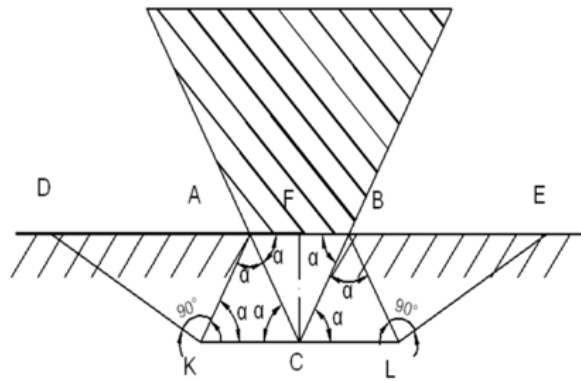


Рисунок 1.9 – Схема разрушения породы при внедрении клина согласно Покровскому

Теория ударного разрушения горных пород и бурения И.С. Покровского получила дальнейшее развитие в трудах других исследователей. Так, основываясь на ней И.А. Остроушко вводит такие понятия, как «главный объем давления» и «объем скалывания», определяющие механизм ударного разрушения. Образующийся при внедрении «объем давления» расширяется под действием приложенной нагрузки и, при достижении определенного значения, скалывает прилегающую к нему породу в направлении к свободной поверхности (рисунок 1.9). Далее происходит мгновенная разгрузка «главного объема давления» путем его взрывообразного разрушения с образованием под индентором переизмельченной породы, через которую в дальнейшем, нагрузка передается на окружающий массив. При дальнейшем увеличении нагрузки цикл повторяется снова, но при существенно больших усилиях, чем при первом цикле.

Один из значимых этапов в объяснении механизма разрушения горных пород связывают с работами Л.А. Шрейнера. Исследователь на основании основных принципов теории упругости и пространственной задачи Бруссинеска описал механизм разрушения в процессе внедрения индентора в пластичные и хрупкие горные породы. Согласно автору, в случае деформирования пластической породы при вдавливании индентора в полупространство наблюдается ее упругий прогиб, который приводит к возникновению растягивающих напряжений у границы контура давления, благодаря чему, находящийся вблизи контактной

поверхности индентора объем породы, испытывает напряжения сжатия (рисунок 1.10).

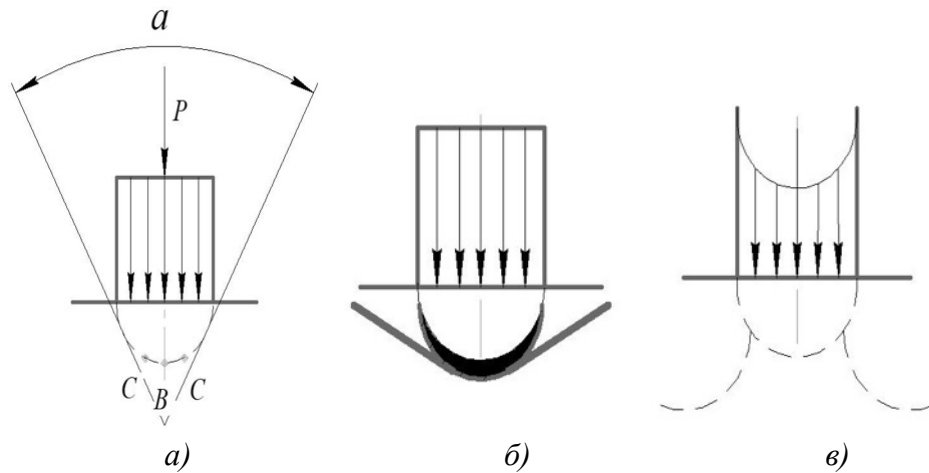


Рисунок 1.10– Механизм разрушения малопластической (а), пластической (б), и хрупкой (в) пород по Л.А. Шрейнеру

В процессе внедрения на границе индентора возникает кольцевая трещина, при дальнейшем возрастании нагружения в породе начинают увеличиваться касательные напряжения пока они не достигнут своих предельных значений на оси симметрии (точка В). Глубина точки В примерно соответствует радиусу индентора. Касательные напряжения, после достижения своих предельных величин, начинают распространяться по плоскостям, ориентированным под углом 45 градусов к оси симметрии, после чего происходит выход их к контуру контакта.

В случае внедрения индентора в пластичные породы, начинают происходить по всей поверхности контактной площадки вдавливания (рисунок 1.10 б), при этом коническая поверхность сдвига тангенциально ориентирована по отношению к деформированной зоне. При дальнейшем увеличении нагружения, внутренняя зона превращается в порошок и конус скалывания выходит на поверхность, при этом боковые участки отделяются крупными сколами. Л.А. Шрейнер считает, что минералы и хрупкие горные породы обладают существенно различным от описанных выше механизмом разрушения. Появление на поверхности кольцевой трещины диаметром, существенно превосходящим диаметр индентора является первым признаком такого вида разрушения (рисунок 1.10, в). Дальней-

шие этапы механизма связаны с развитием образовавшейся трещины, выходом ее на поверхность и раздавливанием материала под индентором [76].

По мнению Б.В. Соколинского процесс контактного разрушения хрупких материалов состоит из следующих основных стадий: упругой (рисунок 1.11), контурного трещинообразования (2), осевого трещинообразования, образования ядра дробления (3), продвижения индентора через разрушенный материал, разгрузки, которые могут быть повторены [64].

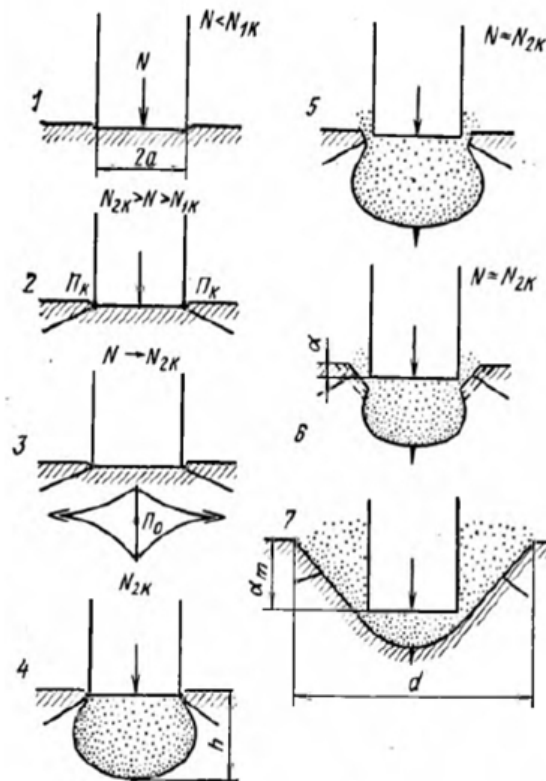


Рисунок 1.11 – Основные стадии разрушения горной породы по Соколинскому

Б.В. Соколинский в своих работах описал следующие особенности контактного разрушения плоскосимметричными инденторами – эллипсным, торовым штампом в отличие от разрушения, описанного выше, имеет некоторые особенности:

1. Контурные трещины появляются сначала у концов большой оси эллипса и затем по мере увеличения нагрузки растут, образуя эллиптический контур, независимо от формы индентора. При разрушении осесимметричным индентором круговая трещина появляясь одновременно по всему контуру давления [78].

2. Угол распространения трещин в глубину неодинаков в различных точках эллипсной трещины. Около малой оси контурного эллипса он пологий, около большой оси трещина круто ходит вглубь массива. Угол падения трещины в этой точке определяет величину превышения продольного размера зоны разрушения, определяющего диаметр буримой скважины, над диаметром индентора.

3. После разрыва материала в полюсе разрушения образуется не группа осевых трещин, а только одна трещина, распространяющаяся от оси к периферии в направлении большей оси индентора.

В любом случае параметры нагрузочных характеристик контактного разрушения определяются жесткостями системы индентор – материал и факторами переключения – критическими усилиями, а при многоактном разрушении критическими внедрениями индентора. Б.В. Соколинский полагает, что контактная жесткость системы зависит от формы и размеров индентора, его упругих постоянных, свойств разрушаемого материала и его формы вблизи поверхности контакта.

На основании вышеизложенного анализа можно сделать вывод о том, что механизм разрушения горных пород под ударным воздействием индентора до конца не выяснен и некоторые вопросы продолжают являться предметом дискуссий, что обуславливает актуальность дальнейших исследований в этом направлении.

1.3.3 Влияние свойств горной породы на процесс разрушения

На механизм разрушения породы также значительное влияние оказывает структурная неоднородность и различного рода нарушения и несовершенства, такие как трещиноватость, слоистость и т.д. Наличие трещин обуславливает резкое перераспределение действующих в среде напряжений и вызываемых ими деформаций. Концентрация напряжений сжатия по поверхности трещины способствует развитию и нарушению сплошности среды. Вследствие этого порода из напряженного состояния сжатия переходит в напряженное состояние растяжения и по плоскости данной микротрещины происходит ее отрыв. При этом образование

начальных микротрещин даже в случае действия лишь усилий сжатия является следствием тангенциальных напряжений. Поэтому трещины всегда перпендикулярны нормальным напряжениям [78,70,51]. На разрушение влияют также скорость и глубина прорастания трещин, зависящие от величины начальной упругой энергии, средой, и от условий образования новых поверхностей, а также кинетической энергии ударного инструмента.

Экспериментальные исследования по ударному разрушению горных пород, выполненные при широком диапазоне варьирования крепости горных пород ($f = 1,5 \dots 10$) показывают, что зависимость энергии разрушения от глубины внедрения инструмента неоднозначна и в общем случае имеет экспоненциальный характер [26].

Так, в работе [34] авторами экспериментально установлена зависимость параметров процесса разрушения от крепости горных пород. Так, согласно приведенным в работе сведениям, производительность и энергозатраты процесса разрушения под воздействием ударной нагрузки для слабых пород ($f = 1,5 \dots 4$ по шкале Протоdjяконова) – зависит от времени удара, а для пород средней крепости ($f = 5 \dots 10$) – зависит от скорости удара. Удельная энергоемкость процесса разрушения горной породы увеличивается с возрастанием ее крепости. Так, при увеличении крепости с $f = 3$ до $f = 9$ единиц по шкале Протоdjяконова, энергоемкость увеличивается в ~ 6 раз.

1.3.4 Зависимость энергоемкости процесса разрушения от энергии удара

Изучению влияния прикладываемой энергии удара на энергоемкость разрушения горных пород посвящено значительное количество работ [28], однако до сих пор нет единого мнения относительно того, как наиболее рационально с точки зрения энергоэффективности разрушать негабариты – еденичным ударом большой энергии или серией ударов меньшей энергии.

Вид зависимости энергоемкости разрушения от прикладываемой энергии удара по мнению авторов [29] в большинстве случаев имеет гиперболический характер (рисунок 1.12)

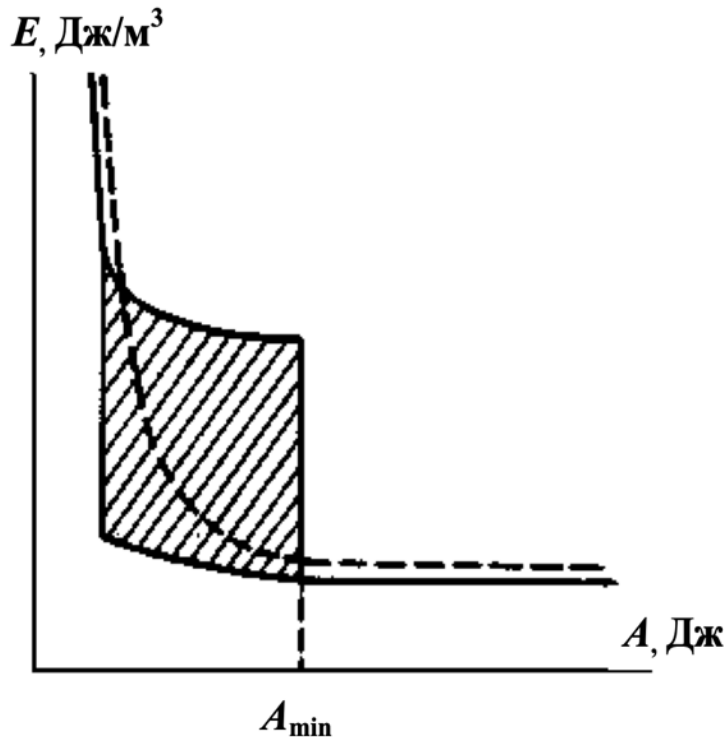


Рисунок 1.12 – Зависимость энергоемкости от процесса разрушения негабарита от энергии удара

Как видно из графика с уменьшением удара энергоемкость процесса начинает резко возрастать (пунктирная линия). При разрушении негабаритов обычно стараются выбирать такую величину энергии удара, при которой она обеспечит минимальную энергоемкость процесса разрушения. По результатам анализа исследований, проведенных в различных работах [22, 31, 71, 80, 89], можно сделать вывод о том, что при многократном ударе в определенном диапазоне энергии удара, отмеченном заштрихованной зоной (рисунок 1.12), возникает неустойчивое протекание процесса разрушения, при котором может происходить как поверхностное (верхняя кривая) так и объемное разрушение (нижняя кривая) горной породы. Правая граница зоны смещается в сторону больших энергий при увеличении скорости ударного воздействия ударника с породой, при увеличении же массы ударника смещается в противоположную сторону. В этой связи наиболее рациональным представляется разрушение горной породы ударным воздействием с

энергией удара выше определенных критических величин, что обеспечит работу за правой границей разрушения.

Данные других экспериментальных исследований [76], подтвердили описанные выше закономерности процесса разрушения от энергии удара. Экспериментальные работы [76] проводились при помощи вертикального копра КДР – 1 методом еденичных ударных нагрузок. Применявшиеся ударники имели постоянную массу и разные геометрические размеры: площадь сечения и длину. Удары наносили по буровой штанге диаметром 25 мм и длиной 1 м. На конце штанги находилась долотчатая коронка с углом приострения лезвий 110^0 . В качестве разрушаемой среды использовали блоки гранита и мрамора. Опыты показали, что энергоемкость разрушения твердой среды (породы) уменьшается с увеличением энергии удара. Вместе с тем было показано, что на эффект разрушения существенное влияние оказывает амплитуда силового импульса и его длительность.

На основании вышеизложенного можно заключить, что разрушение крупных кусков горной породы наиболее эффективно происходит при больших значениях энергии удара, в то время как при малой величине будет наблюдаться процесс поверхностного дробления, чему соответствует нижняя кривая. Так, практика горных работ показывает, что производительность машины с большой энергией при малой частоте удара значительно выше, чем машина той же мощности, но с меньшими величинами энергии удара при большей их частоте нанесения.

1.3.5 Влияние скорости нагружения ударной нагрузки

Изучение процессов разрушения горных пород ударом и в квазистатических условиях, т.е. при сравнительно медленном внедрении породоразрушающего инструмента в породу, на протяжении многих лет является темой многочисленных научных исследований, например, [20, 33, 78, 86, 88, 98]. При этом до настоящего времени нет единого мнения относительно схожести и различия в механизме их протекания.

Так, отмечается [20] схожесть механизма послойного разрушения породы при динамическом и статическом воздействии нагрузки, заключающейся в том, что на начальном этапе процесса разрушения в динамических условиях происходит диспергирование поверхностного слоя разрушаемой породы и при дальнейшем внедрении инструмента происходит ее контактное упрочнение, что с физической точки зрения представляется аналогичным квазистатическому вдавливанию в поверхность твердого тела жесткого недеформируемого пуансона (штампа).

В работе [33] делается заключение, что непосредственно конечная стадия процесса разрушения горных пород как при статическом, так и при динамическом нагружении – фрагментация, т.е. утеря сплошности поверхности, что обеспечивается развитием дефектов структуры. При этом при динамическом нагружении, как и при статическом, процесс разрушения не протекает мгновенно, а характеризуется накоплением повреждений, распределенных во времени, т.е. динамическое разрушение – многостадийный процесс. В свою очередь, при статическом нагружении микроразрушение горных пород происходит в квазистатическом режиме, а последующее развитие магистральной трещины – в динамическом режиме со скоростью, близкой к скорости звука в среде.

Исходя из результатов работ [23], проведенных в Ленинградском горном институте, авторы отмечают, что при динамическом (скорость взаимодействия до 5 м/с), так и при статическом вдавливании пуансона в породе под площадкой контакта образуется уплотненное ядро. В результате расширения его в направлении, приблизительно перпендикулярном действию силы вдавливания, возникают трещины, действие которых приводит к появлению выколов на поверхности блоков или их разрыву. В этих же исследованиях обнаружено существенное превышение энергии, требующейся для разрушения объектов в динамических условиях, по сравнению со статическими. Так для разрушения угля вдоль слоистости ($\sigma_{сж} = 30$ Мпа) при использовании пуансона со сферической формой рабочей поверхности эти энергии соотносятся, как 12,5 Дж и 2,0 Дж, что авторы объясняют увеличением сопротивления пород пластической деформации и разрушению при ударе.

К такому же выводу приходят и авторы других исследований, например, [51, 64], где показано, что при переходе от статического скалывания крупной стружкой к ударному затраты энергии на разрушение антрацита возрастают от 1,18 до 1,9 МДж/м³, а для глинистого сланца – от 1,83 до 6,48 МДж/м³, т.е. в 1,6 и 3,5 раз соответственно.

Отмечая, что в процессе многократного ударного разрушения горной породы удельная энергоёмкость на порядок превосходит энергоёмкость при квазистатическом раздавливании образцов, различие в удельной энергоёмкости разрушения горных пород в статических и динамических условиях авторы [64, 68, 31, 54, 46] объясняют увеличением доли энергии на образование новых поверхностей при динамическом разрушении, поскольку наибольшее количество расходуемой энергии поглощается на создание уплотнённого ядра и очень небольшое – на отделение кусков от массива.

Если мнение о существенном превышении энергоёмкости процесса разрушения при динамической нагрузке по сравнению со статической практически во всех исследованиях практически единое, то точка зрения на различие усилий, необходимых для разрушения породы в статических и динамических условиях, в литературных источниках разнится.

Так в работе [85] представлены данные по ударному внедрению в известняк Indiana ($\sigma_{сж} = 40 - 130$ МПа) стержня с прикрепленным к его концу зубцом долота в сравнении с результатами вдавливания того же стержня в статических условиях. Усилия, возникающие при ударе, измерялись при помощи проволочных датчиков, наклеиваемых на стержень в непосредственной близости к зубцу. Внедрение зубца в породу фиксировалось скоростной киносъемкой (3000 кадров/секунду). По данным измерений строились кривые деформации для различных скоростей соударения, которые сравнивались с аналогичными кривыми для статического вдавливания зубца. Было обнаружено, что диаграммы деформации при ударе (рисунк 1.13) [85] и в статических испытаниях имеют аналогичный характер. При этом, усилия, необходимые для разрушения известняка при статических и дина-

мических испытаниях вне зависимости от скорости воздействия приблизительно одинаковы.

Существенных различий между значениями усилий, потребных для разрушения породы в статических и динамических условиях нагружения, не обнаружил в своих работах [77, 78, 79] и Р.М. Эйгельс.

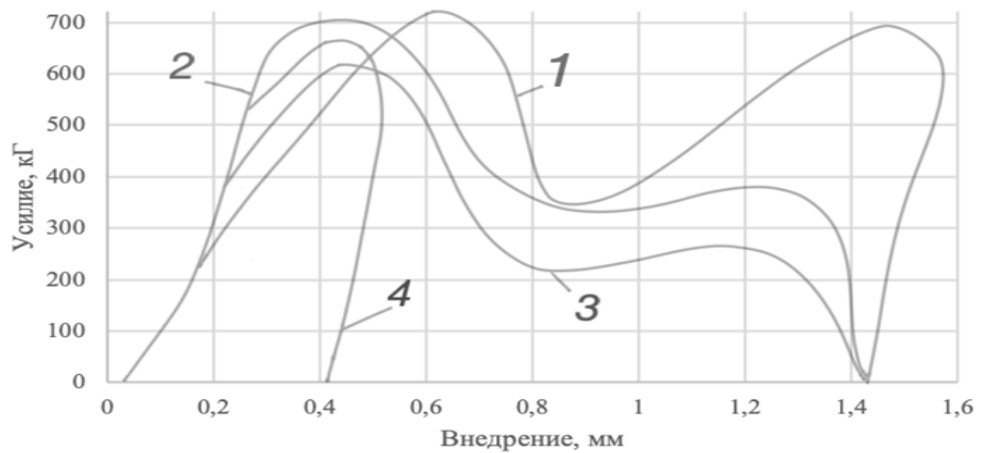


Рисунок 1.13 – Диаграммы деформации при разных скоростях соударения: 1, 2, 3 и 4 – соответственно $v = 1,75; 1,5; 1,4$ и $0,3$ м/с

В то же время, в других исследованиях [51, 75, 91] отмечено увеличение сопротивления разрушению породы с ростом скорости внедрения. Так, например, при вдавливании в блок известняка пуансона формы клина были получены кривые «усилие – внедрение» (рисунок 1.14) [76], различающиеся для статических условий и ударного воздействия, осуществляемого с различной скоростью.

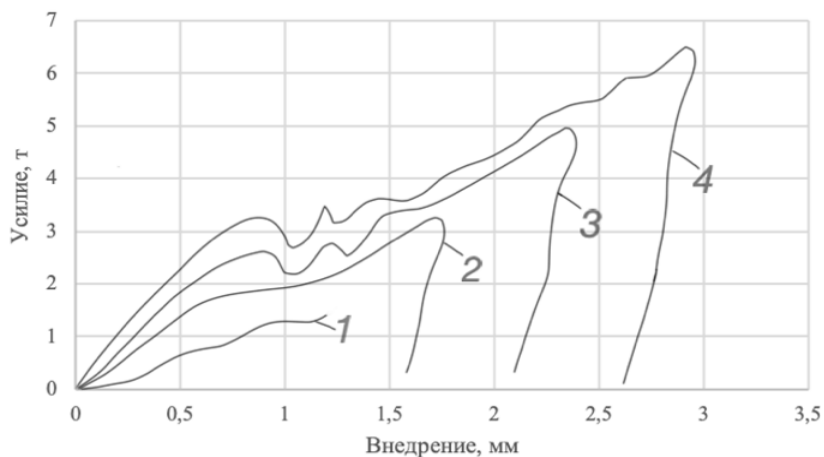


Рисунок 1.14 – Кривая «усилие-внедрение» при различных скоростях соударения: статическое нагружение, 2 – скорость соударения $3,1$ м/с, 3 – $4,4$ м/с, 4 – $5,4$ м/с

Как можно заключить из вида графика рисунка 1.14, усилия, соответствующее моменту разрушения породы, для динамических условий от 3 раз (для скорости соударения 3,1 м/с) до 6 раз (5,4 м/с) превышают усилие разрушения для статического нагружения.

Согласно выводам В.Б. Соколинского [11, 64] коэффициент жесткости g ударной системы, определяемый углом наклона начальной части нагрузочной характеристики «усилие»-«величина перемещения», практически не зависит от скорости удара (рисунок 1.15), что дает основание рассматривать взаимодействие исполнительных органов ударных машин с материалом как квазистатический процесс.

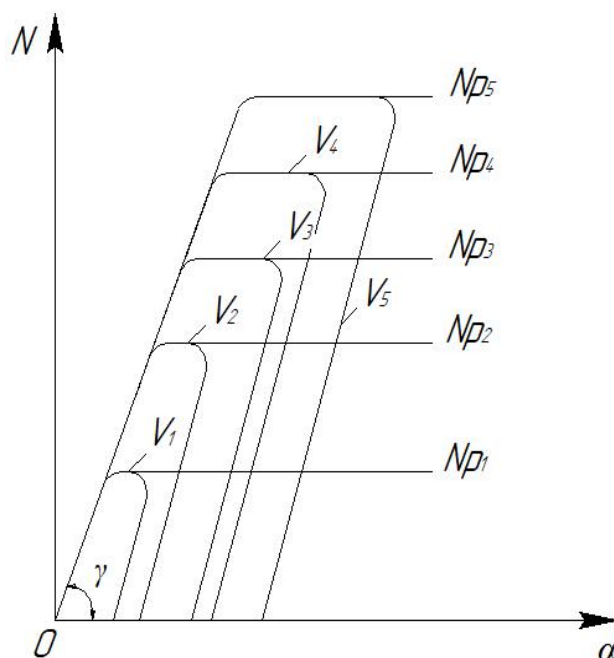


Рисунок 1.15 – Зависимость силы сопротивления породы контактному разрушению от глубины внедрения при увеличении скорости удара: $Np_1 - Np_5$ – нагрузки разрушения при различных скоростях удара V_{1-5} ($g = tg\gamma$) [64]

Отличие ударного разрушения от статического заключается не в величине прикладываемой силы, не в повышении или понижении прочности материалов при ударе, а в высокой интенсивности нарастания этих сил и соответствующей им деформации, достигающей 10^9 Н/с даже при обычных скоростях удара.

При воздействии такой интенсивности можно ожидать изменения структур и полей напряжений (относительно статических полей) вообще и перемещения

связи с этим точки полюса разрушения в частности; увеличения сил сопротивления вследствие инерции разрушаемого материала. При этом сила сопротивления материала ударному разрушению должна выражаться функцией $N=f(a, a', a'')$, где a', a'' – скорость и ускорение внедрения. В самом упрощенном виде эта зависимость имеет вид: $N=K_1a+K_2a'+K_3a''$ (K_1, K_2, K_3 – постоянные материала и индентора). В этой зависимости первый член определяет упругие силы, второй упругость и инерционность, третий только инерционность.

Вместе с тем, расчеты по этим формулам показывают, что при тех скоростях разрушения, которые достигнуты современными машинами ударного разрушения (до 20 м/с), второй и третий члены приведенной зависимости дают прибавку в несколько процентов. Аналогичный результат получен при регистрации нагрузочных характеристик в одинаковых условиях разрушения, но при различных скоростях удара, определяющих при прочих равных условиях интенсивность воздействия. Результаты этих экспериментов показывают, что коэффициенты жесткости, практически не зависят от интенсивности воздействия. Это дает основание пренебречь во многих случаях динамическими добавками и рассматривать взаимодействие исполнительных органов ударных машин с материалом как квазистатический процесс.

1.3.6 Влияние продолжительности ударного воздействия

Одной из принципиальных особенностей ударного разрушения наряду с высокой интенсивностью является ограниченность времени их действия.

Продолжительность удара при разрушении горных пород должна быть достаточной для создания, развития и перемещения зон пластического течения (предразрушения) и областей разрушения [64]. За это время макропараметры напряженного и деформированного состояния, достигающие некоторого критического уровня, должны, действуя на структуру материала, произвести и закончить в них такие изменения (дислокации, микротрещины), в результате которых тело превращается из исходного состояния в разрушенное. В связи с этим существует возможность явления незавершенности разрушения, когда трещина, скорость распространения которой значительно меньше скорости звука, за время действия

сил не успевает достичь свободной поверхности и отделить часть от целого [10, 14]. Движение трещины может возобновиться и завершить разрушение при нанесении повторных ударов. Однако это, как показано выше, невыгодно с энергетической точки зрения. Если время действия t_y силы удара соответствует времени распространения трещины от полюса разрушения до свободной поверхности, то разрушение может произойти от первого удара.

Согласно [64] следует различать продолжительность ударного взаимодействия и собственно продолжительность разрушения. Первая равна полному времени удара, вторая — интервалу времени между моментом появления трещины в полюсе разрушения и моментом выхода трещины на свободную поверхность, вследствие которого и отделяется часть от целого, т. е. происходит собственно разрушение. Первый момент заметить трудно, второй момент четко регистрируется датчиками силы, поскольку сопротивление материала в этот момент резко уменьшается. Таким образом, для данного материала и условий разрушения (тип индентора, точка приложения сил и т. д.) эту величину можно считать постоянной. Существование продолжительности разрушения порождает явление увеличения регистрируемого экспериментально усилия разрушения при увеличении интенсивности воздействия. При этом за одно и то же время t силы, увеличивающиеся более интенсивно, успевают возрасти до большей величины, которая и регистрируется датчиком. При прочих равных условиях, интенсивность воздействия пропорциональна скорости удара. Отмеченное явление самопроизвольного увеличения усилий при ударе сверхдействительно «необходимой для возникновения и расширения трещины величины повышает энергоемкость разрушения и поэтому является нежелательным».

В работе [75] установлено, что время удара является функцией скорости и массы соударяющихся тел. Так в классической работе Петровой О. П., Шрейнера Л. А. [76] акцентируется внимание на влиянии скорости приложения нагрузки на параметры разрушения породы. Из результатов экспериментов видно (рисунок 1.16), что с возрастанием скорости деформирования (переход от осциллограмм 4 к осциллограммам 1), достигаемой увеличением энергии ударника, усилие, требу-

ющееся для разрушения одного и того же фрагмента породы, возрастает, а деформация фрагмента, предшествующая разрушению, и время ударного воздействия убывают. Поскольку указанные эксперименты проведены при различной энергии удара из них нельзя сделать однозначный вывод, как продолжительность ударного взаимодействия влияет на эффективность разрушения.

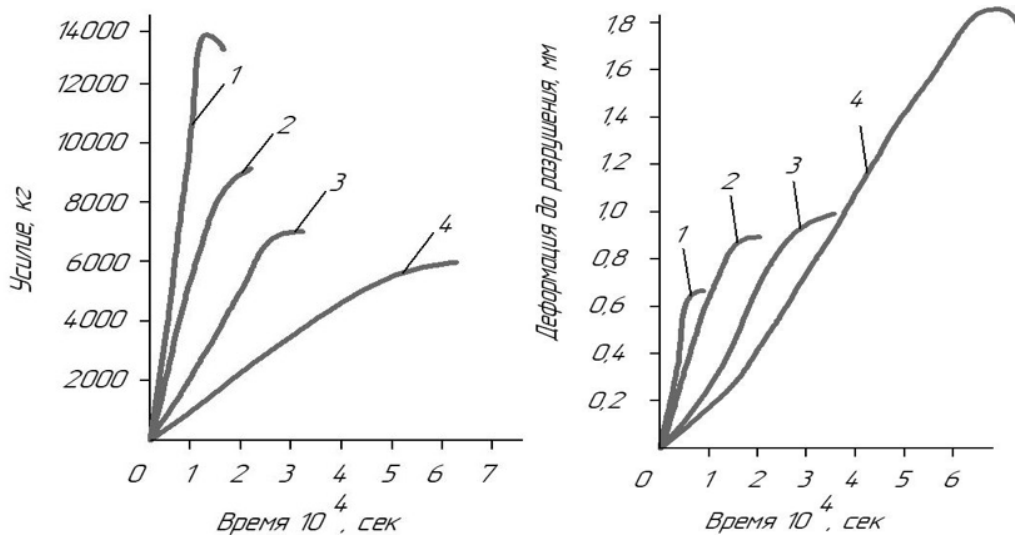


Рисунок 1.16 – Осциллографические записи усилий и деформации мрамора при различных скоростях деформирования

В случае металлов установлению связи между интенсивностью их пластической деформации и временем удара посвящены работы [42 - 45]. Так при изучении процесса ударного деформирования металлических заготовок на молотах авторами [42] отмечается, что при увеличении продолжительности удара, за которую принималось время контакта бойка молота и заготовки, возрастает количество и продолжительность прохождения волн упругой и пластической деформации по заготовке, что увеличивает величину пластической деформации заготовки. Кроме того, при возрастании времени ударного воздействия уменьшается средняя скорость деформации, что способствует снижению сопротивления деформированию и, как следствие, увеличению КПД удара [53-55].

Приведенные в работе [44] результаты экспериментально-теоретического исследования свидетельствуют, что увеличение до 2,6 раз продолжительности нагрузочной фазы удара приводит к возрастанию интенсивности формоизменения

и величины деформации заготовок в 1,15–1,56 раз, снижению силы деформирования до 3,89 раз (рисунок 1.17), а также увеличению работы пластической деформации и КПД удара (до 1,15 раза).

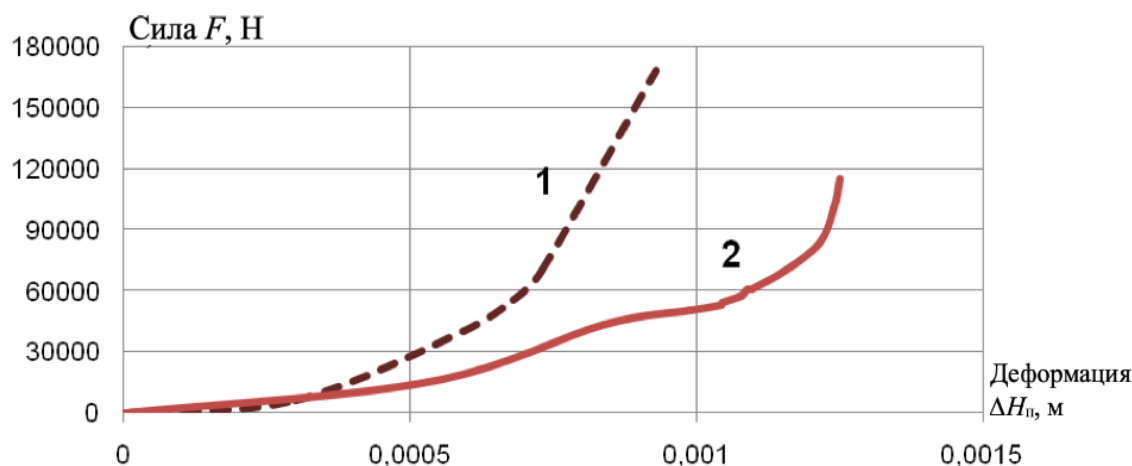


Рисунок 1.17 – Зависимость силы деформирования, возникающей при горячей осадке заготовки из стали 20 на копре, от величины деформации заготовки при времени удара 1,7 мс (1) и 4,4 мс (2)

1.3.7 Влияние формы контактной поверхности и геометрии ударного инструмента на энергоёмкость разрушения

Известно, что механизм разрушения горной породы существенно различается для инденторов с различной формой контактной поверхности, которая существенно влияет как на образование напряжений, так и на процесс трещинообразования. Известно большое количество работ [28, 29, 36, 98], посвященных исследованиям влияния формы контактной поверхности ударного инструмента на энергоёмкость разрушения горной породы.

Так в работах [28, 36] установлено, что максимальную силу ударного взаимодействия и минимальную продолжительность соударения обеспечивает сферический и крестообразный инструмент, в тоже время инструмент с более выраженным концентратором напряжения (конусная пика), обеспечивает большее время ударного воздействия при минимальном усилии разрушения.

Инструмент в виде клина предпочтительнее применять в тех случаях, когда желательно, чтобы трещины в обрабатываемом материале распространялись в

стороны от лезвия клина, например, при устройстве траншей. При рыхлении вязких пород или, например, мерзлых грунтов наибольшая производительность при прочих равных условиях достигается в случае применения клина с углом заострения $20 - 30^\circ$. Из практики известно, что инструменты клиновидной формы наиболее эффективны при разрушении негабаритных кусков крепких скальных горных пород, однако они быстро затупляются, неравномерно изнашиваются, а также наблюдается выкрашивание лезвия вплоть до преждевременного разрушения самого инструмента.

При применении сферического инструмента характерным является относительное увеличение производительности дробления трещиноватых пород на 15-25%. Разрушение в этом случае происходит по естественным трещинам, тогда как при применении долотчатого инструмента происходит направленное разрушение негабарита. При применении конусного инструмента с наиболее выраженным концентратором напряжения происходят значительные местные разрушения без раскола негабарита, что снижает эффективность его применения [92].

Согласно данным, приведенным в работах [25, 3] наибольшее значение коэффициента передачи энергии удара наблюдается при нанесении удара конусной и долотчатой пикой, которое составляет 0,85-0,90. Резко снижается коэффициент передачи энергии у затупленных инструментов. Для кресто-образной формы инструмента он составляет 0,62, сферической – 0,6. Однако другие [97] эксперименты показали, что, если энергоемкость разрушения пикой принять за 1, то для двустороннего клина она составит около 0,8, а для плоского штампа – 4,0.

В работе [2] исследован процесс разрушения твердой среды ударниками переменной формы. С этой целью наряду с другими были также изготовлены два ударника, имеющие форму усеченного конуса. Масса ударников 7 кг. Размеры их следующие: диаметр большого основания 94 и 110 мм, диаметр меньшего основания 27 и 26 мм, длина обоих ударников 230 мм. Испытания проводились на граните. Результаты опытов показаны на рисунке 1.18.

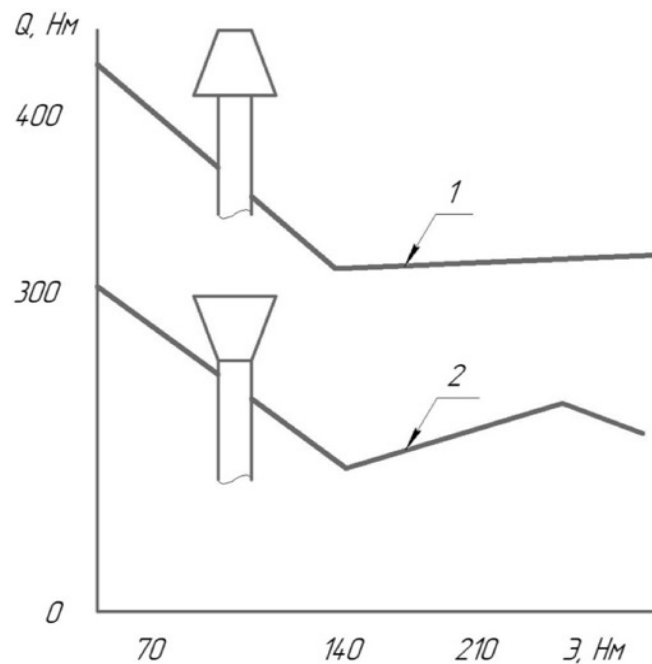


Рисунок 1.18 – График изменения энергоемкости разрушения Q гранита коническими ударниками при ударе по штанге толстым (1) и тонкими концами (2)

Из рассмотренных графиков следует, что энергоемкость процесса разрушения этими ударниками неодинакова. Наименьшая энергоемкость наблюдается при использовании ударника, совершающего удары тонким концом по буровой штанге. При ударе толстым концом энергия отражения от забоя составила 23 Дж, а при ударе тонким концом – 16 Дж (общая энергия удара 60 Дж). Количество энергии, перешедшей в среду в первом случае, составляет 27 Дж, а во втором – 44 Дж, т. е. вышед 1,6 раза. Величина внедрения инструмента в среду составляет соответственно 0,58 и 0,72 мм. Время длительности импульса $t = 625$ мкс.

Данное явление можно объяснить так: форма силового импульса при ударе о штангу тонким концом соответствует по времени форме сопротивления горной породы внедрению [2]. Усилие внедрения, начиная с небольших значений, начинает возрастать по мере углубления индентора в породу, при этом и площадь контакта лезвия с породой возрастает, в соответствии с такой же зависимостью возрастает и амплитуда силового импульса.

Таким образом, для эффективного разрушения любой твердой среды должны создаваться силовые импульсы, близко совпадающие с разрушающим усилием. Необходимо также обеспечить продолжительность силового импульса, вели-

чина которого определяется длиной ударяющего тела. Чрезмерная длина ударяющего тела может привести к нерациональному использованию энергии силового импульса.

1.4 Анализ существующих устройств повышенной эффективности для дробления негабаритов

Разработке технических решений по повышению эффективности разрушения негабаритов горных пород и пластической деформации металлов посвящен ряд работ [53-55], главным образом, по повышению продолжительности ударной нагрузки в случае обработки металлов давлением.

Так, известна баба молота (патент RU № 150981, опубл. 29.07.2014), выполненная с цилиндрическими полостями, в которых размещен наполнитель в виде шариков, имеющих такой же диаметр, как и полость, что обеспечивает однорядное размещение наполнителя, причем масса шариков составляет 15-20% от общей массы бабы (рисунок 1.19). При ударе наполнитель перемещается внутри бабы в сторону, противоположную направлению удара, до контакта с крышкой, после чего движется вниз, тем самым замедляя отскок бабы с увеличением времени ударного взаимодействия бабы молота с обрабатываемым изделием.

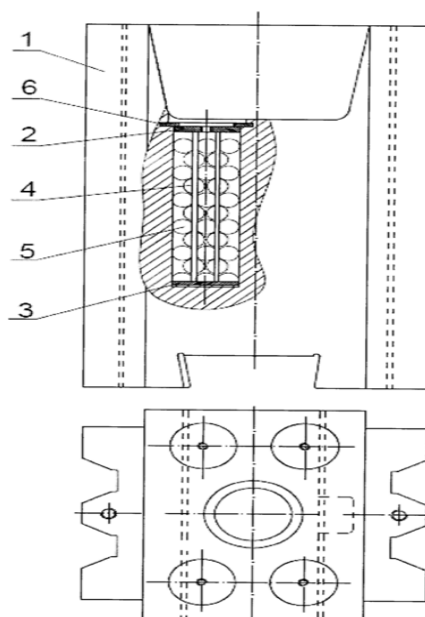


Рисунок 1.19 – Баба-молота для деформирования металлов

Недостатком устройства является использование в ней шаров, что при постоянных ударах ведет к их пластической деформации, что приводит к снижению эффективности деформации.

Известна конструкция бабы молота (патент RU № 2438825, опубл. 10.01.2012) для обработки металлов давлением и забивки свай, имеющая полость с наполнителем в виде шариков, масса которых составляет 20-50% от массы бабы молота, а отношение массы бабы к массе одного шарика находится в пределах от $2 \cdot 10^3 \dots 3 \cdot 10^3$. Для фиксации наполнителя предусмотрены пружины, которые воздействуют на шарики с силой, равной или превышающей вес шариков. В результате обеспечивается повышение степени деформации заготовки, уменьшение эффекта пружинения.

Недостатком конструкции является использование пружин сжатия, которые при постоянных ударных нагрузках, будут утрачивать силу своего нажима на шары, что обуславливает невозможность обеспечения стабильной работы устройства. Также недостатком конструкции является использование шаров, так как при постоянных ударах они будут терять свою форму вследствие пластических деформаций, что приведет к снижению эффективности удара.

На рисунке 1.20 представлены технические решения, позволяющие изменять форму ударного импульса и продлевать его продолжительность.

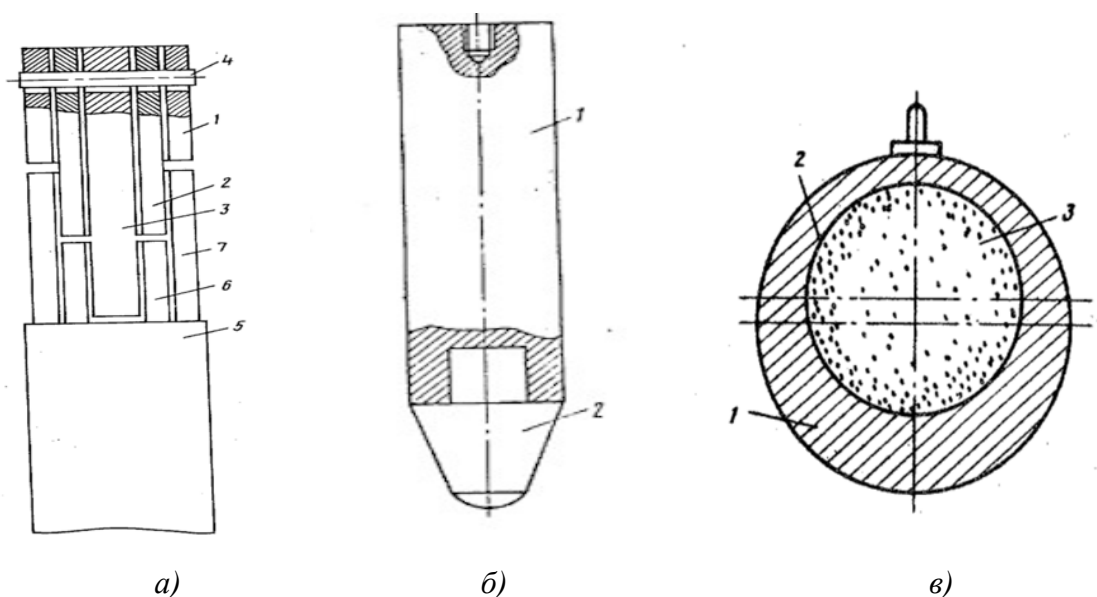


Рисунок 1.20 – устройство для разрушения горных пород

Так, например, известно техническое решение (патент SU 857415) (рисунок 1.20 *a*), в конструкции которого ударники 1,2,3 закреплены на штифте 4 с некоторым люфтом и благодаря тому, что они имеют разную длину, их удары по промежуточным элементам 5,6 и 7 смещены по времени. Это приводит к тому, что волны напряжения, получаемые при соударении элементов, приобретают прямоугольную форму, которая при служении импульсов получает вид ступенчатой, что приводит к более эффективной передаче энергии удара в породу и снижения энергоемкости процесса разрушения.

В другом техническом решении (рисунок 1.21 *б*) конструкция ударника выполнена также составной, состоящей из корпуса 1 с центрирующим отверстием и ступенчатого бойка 2 в виде усеченного конуса вращения с углом конусности составляющей 50-60°. Благодаря тому, что предел прочности на сжатие материала бойка выше, чем предел прочности материала корпуса, а также благодаря особенностям конструктивного исполнения ударник имеет повышенную эффективность разрушения. В техническом решении, представленном на рисунке 1.20 *в*) ударник для разрушения негабаритов (патент SU № 571608, опубл. 05.09.1977) выполнен в виде стального шарового корпуса с внутренней сферической полостью, заполненной стальной дробью. Нижняя часть корпуса выполнена утолщенной за счет эксцентричного смещения внутренней полости к его верхней части. При сбрасывании ударника на негабарит, благодаря тому что он заполнен стальной дробью, снижается осткок его от разрушаемого объекта, так как волна отраженная от объекта ударная волна гасится в массе дроби. Однако недостатком устройства является применение в ее конструкции стальной дроби, что обуславливает значительные потери энергии удара, которые затрачиваются на трение между шарами при ударе, на их упругую и пластическую деформацию.

Анализируя представленные выше патенты можно отметить, что все существующие в настоящее время устройства ударного действия для разрушения негабаритов отличаются сложностью изготовления, низкой эффективностью разрушения. Отсутствует теория, объясняющая влияние составной конструкции ударника

на продолжительность ударного воздействия, на энергоемкость процесса разрушения горной породы и коэффициент передачи энергии удара (КПЭ) породе.

1.5 Выводы по главе 1

1. Проанализированы причины появления негабаритов горных пород при проведении буровзрывных видов работ и их негативное воздействие на технико-экономические показатели разработки месторождений.

2. Рассмотрены преимущества и недостатки основных способов разрушения негабаритов – взрывом, термическим, акустическим, электрическим, гидравлическим, механическим – и средств их реализации.

3. При рассмотрении разрушения негабаритов горной породы устройствами гравитационного действия клин- и шар-бабами отмечено, что разрушение происходит со значительными потерями энергии удара на упругие деформации, что существенно снижает эффективность применения этих устройств.

4. Проанализированы основные существующие теории дробления горных пород с выводом об отсутствии на данный момент единой теории, способной объяснить процессы дробления.

5. Проанализированы основные факторы влияющие на эффективность ударного разрушения горных пород – свойства породы, энергия удара, скорость возрастания ударной нагрузки, продолжительность ударного воздействия, форма контактной поверхности и геометрия ударного инструмента – с выводом, что, 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.

6. При рассмотрении существующих устройств повышенной эффективности для дробления негабаритов и пластической деформации металлов отмечено, что все они отличаются сложностью изготовления, препятствующему их широкому применению. В этой связи, разработка новых технических решений, основан-

ных на применении сравнительно простой многомассной конструкции устройства, в том числе, и с аккумулятором энергии, позволяющей повысить энергию удара и снизить отскок инструмента с увеличением продолжительности ударного воздействия, является актуальной.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ МНОГОМАССНОГО УДАРНОГО ИНСТРУМЕНТА, ОСНАЩЕННОГО АККУМУЛЯТОРОМ ЭНЕРГИИ

В виду сложности осуществления экспериментальных исследований в натуральных условиях, а также отсутствия необходимых данных в литературных источниках, экспериментальные исследования по определению закономерностей внедрения в породу ударного многомассного инструмента проводили на лабораторной установке в условиях, моделирующих процесс внедрения клин-бабы в горную породу.

Поскольку для проведения расчетов по разработанной математической модели возникла необходимость в сведениях о жесткости системы «ударный инструмент – порода», которые, как заключали, наиболее целесообразно определять при сравнительно медленном передвижении индентора, потребовалось провести эксперименты по определению параметров взаимодействия модельного инструмента с породой не только при ударе, но и в квазистатических условиях.

Описанные в литературе методы [1, 5, 9, 67] и аппаратное оформление исследований процессов разрушения горной породы ударной нагрузкой, а также разработанные с участием автора и использованные в настоящей работе методики, и экспериментальная установка [10], представлены ниже.

2.1 Анализ существующих методов и экспериментальных стендов для исследования процессов разрушения горной породы ударной нагрузкой

Лабораторные экспериментальные стенды, которые позволяют смоделировать отдельные удары по объектам с последующими колебаниями системы, представляют собой особую группу оборудования для проведения механических испытаний. К таким устройствам выдвигаются следующие требования:

- максимальная близость результата экспериментального испытания ударным воздействием с реальным, проведенным в натуральных условиях;

- достаточная повторяемость экспериментальных испытаний;

Существующие ударные стенды классифицируют на группы по следующим признакам (рисунок 2.1):

I – по способу формирования ударного импульса;

II – по характеру проводимых испытаний;

III – по типу моделируемого ударного воздействия;

IV – по принципу действия;

V – по виду источника энергии.



Рисунок 2.1 – Классификация ударных стендов

Схема испытательного стенда, как правило, из следующих элементов: анализируемого объекта, который закрепляют на основании с датчиком ударной перегрузки, средства разгона для придания объекту ускорения и кинетической энергии, устройства торможения; регистрирующей аппаратуры для фиксации параметров объекта и законы изменения ударной нагрузки; системы управления; первич-

ных преобразователей; вспомогательных приборов, источников питания. Схематично структура испытательного стенда представлена на рисунке 2.2.

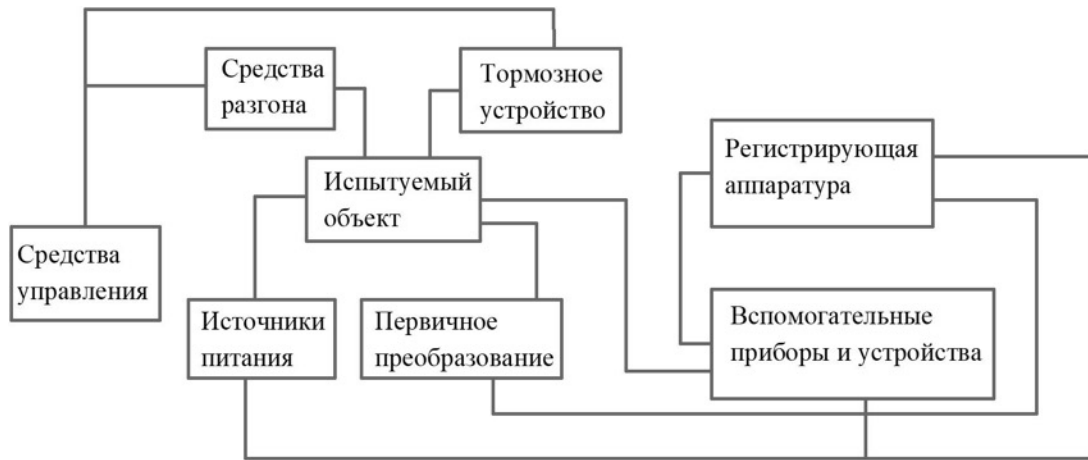


Рисунок 2.2 – Структурная схема ударного стенда

Функциональные возможности экспериментальных стендов определяются конструктивным исполнением их тормозного устройства:

1. В процессе ударного взаимодействия объекта с жестким основанием возникает торможение за счет упругих сил в контактной зоне. Данный тип торможения характеризуется тем, что может обеспечивать большие величины перегрузки с малым фронтом нарастания (рисунок 2.3, *a*).

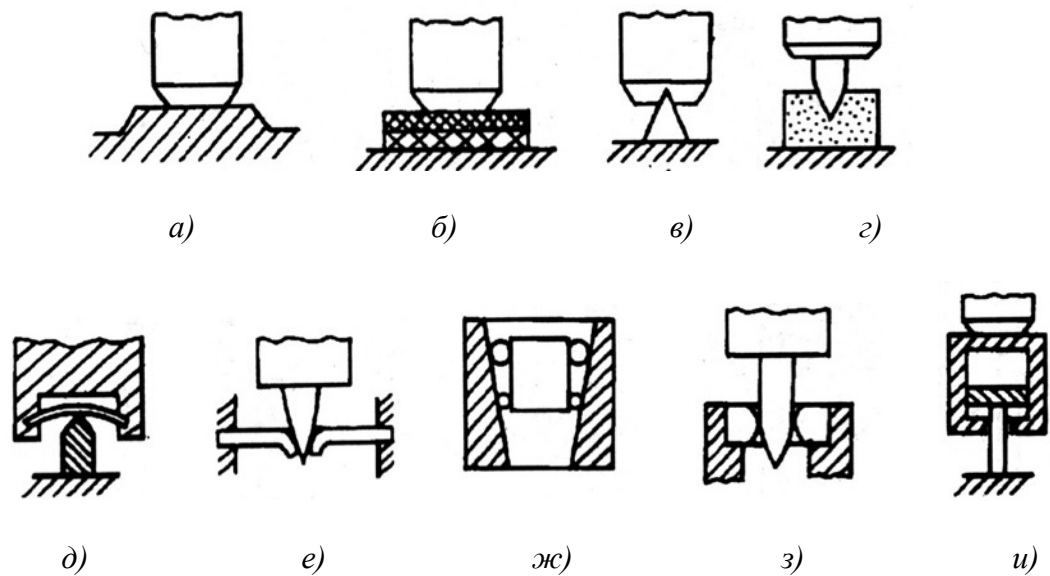


Рисунок 2.3 – Схемы тормозных устройств для ударных стендов

2. В данном типе устройств применяют деформируемые элементы в виде прокладки или пластин, выполненных из стали, меди, свинца или резины и располагающихся на жестком основании. Такая конструкция дает возможность получать значения силовых перегрузок в широком интервале значений, от нескольких десятков до тысяч единиц, с временем нарастания от микросекунды до нескольких миллисекунд (рисунок 2.3, б).

3. В данном типе стендов деформируемые элементы выполнены в виде наконечника, который устанавливают между плитой и разрушения объектом, что позволяет устанавливать какой-либо конкретный закон изменения усилия и времени в определенном диапазоне (рисунок 2.3, в).

4. С целью моделирования ударного взаимодействия со сравнительно большим путем торможения применяют устройства торможения из хорошо деформируемого материала, такого, например, как свинец, которое находится на жестком основании (рисунок 2.3, г). При внедрении в него жесткого наконечника соответствующего профиля возникают перегрузки с небольшим временем нарастания, достигающим до десятков миллисекунд.

5. В стенде в качестве тормозного устройства применяют упругий элемент, например, рессору (рисунок 2.3, д), которая закреплена на подвижной части стенда. Данный вид исполнения тормозного устройства обеспечивает получение сравнительно небольших по величине перегрузок полусинусоидальной формы продолжительностью, измеряемой миллисекундами.

6. В данном типе стенда используют пробивную металлическую пластину, которая закреплена в основании и в сочетании с жестким наконечником ударника позволяет получать сравнительно небольшую величину перегрузки.

7. В представленном на рисунке 2.3 (ж) стенде деформируемые элементы, в сочетании с жестким коническим ударником позволяют получать перегрузки продолжительного действия с временем порядка десятков миллисекунд.

8. Данный стенд позволяет получать значительные величины пути торможения разрушаемого объекта (до 300 мм) при небольших деформациях шайбы (рисунок 2.3 ж).

9. В стенде используется пневматическое тормозное устройство – пневмодемпфер, который позволяет создавать ударные импульсы большой интенсивности и различной формы (рисунок 2.3 и).

Экспериментальные испытания, проводимые в лабораторных условиях, должны осуществляться при выполнении ряда специальных требований, так максимальное поперечное смещение не должно превышать 30 % от номинальной величины, кроме этого, необходимо обеспечить возможность надежного закрепления объекта в трех взаимно перпендикулярных положениях.

В роли разгонного устройства могут выступать пневмо- или гидроприводы, упругие элементы в виде пружин и различного рода амортизаторов, сила гравитации.

Примером стенда, использующего пневматический привод, является стенд, использованный для проведения научных исследований авторами работы (рисунок 2.4) [9].

Пневматический копер для испытания горных пород состоит из следующих основных узлов: метательного устройства 6, направляющей трубы 3, баллонов 5 со сжатым азотом, кирпичной стойки 2, фундамента 1 для установки блоков и плиты 4.

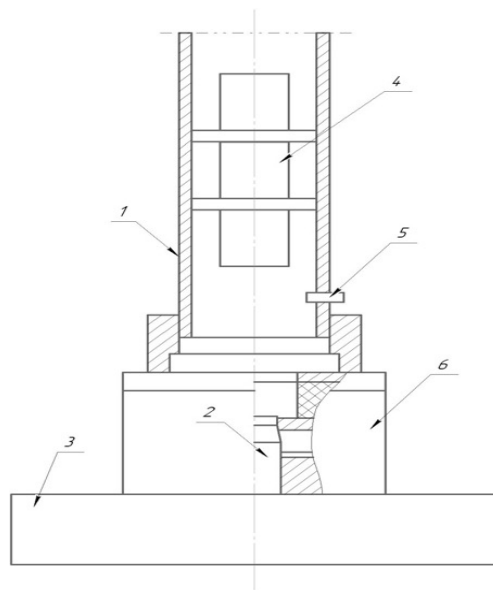


Рисунок 2.4 – Схема проведения испытания пород на вдавливание при динамическом нагружении

В процессе испытания цилиндрический штамп 2 устанавливался на блок породы 3 под направляющей трубой 1 пневматического копра в специальном устройстве – емкостном датчике для замера деформации 6. Боек-ударник 4,двигающийся в направляющей трубе с определенной скоростью, создаваемой давлением в метательном устройстве копра, при помощи специального контактного устройства 5 включал систему регистрации измеряемых механических характеристик. После этого боек ударял по штампу, который вдавливался в породу и производил ее разрушение. Соприкасающиеся плоскости бойка, штампа и породы перед испытанием тщательно притирались.

Специальной проверкой было установлено, что контакт бойка и штампа при ударе осуществляется по всей площади соприкасающихся плоскостей и что соосность бойка и штампа выполняется достаточно хорошо.

Примерами стендов, использующих для разгона ударного инструмента силу гравитации, является стенды, описанные в работе [3].

Известна экспериментальная установка позволяющая осуществлять свободное падение ударника для определения дробимости горных. Принципиальная схема установки представлена на рисунке 2.5.

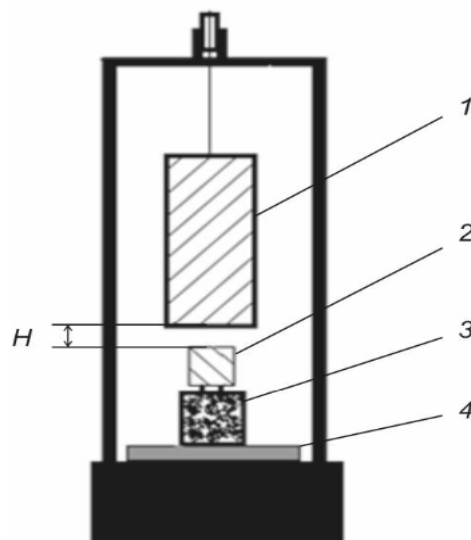


Рисунок 2.5 – Схема стенда для создания ударного воздействия по образцам породы: 1 – ударник; 2 – модель инструмента; 3 – образец породы; 4 – стальная плита

Конструкция такого копра проста в изготовлении и эксплуатации. Масса падающего груза 16 кг. Груз сбрасывается с высоты 0,5 м – максимальная энергия удара составляет 80 Дж. Величина энергии единичного удара для каждой серии эксперимента изменяется в диапазоне от 16 до 80 Дж, принимая последовательно значения 16, 32, 48, 64, 80 Дж. Копер позволяет использовать блоки породы 90×90×90 мм, имеющие все плоскопараллельные грани, по каждой из которых наносятся удары.

Для исследования процесса разрушения горных пород известна лабораторная установка (рисунок 2.6), которая состоит из несущей и ударной частей [1]. Несущая часть содержит стойку 1, опорную плиту 12 с предохранительным устройством, направляющие 2 и держатель 16. Предохранительное устройство состоит из втулки 9 и пальца 8. Направляющие 2 крепятся на поперечных планках 13 при помощи винтов 15 с контргайками 14. Ударная часть содержит шток 3, связанный с несущей пластиной 5 и сменным наконечником 6. Сменные грузы 4 установлены на несущей пластине 5 и закреплены при помощи прижимной гайки 11.

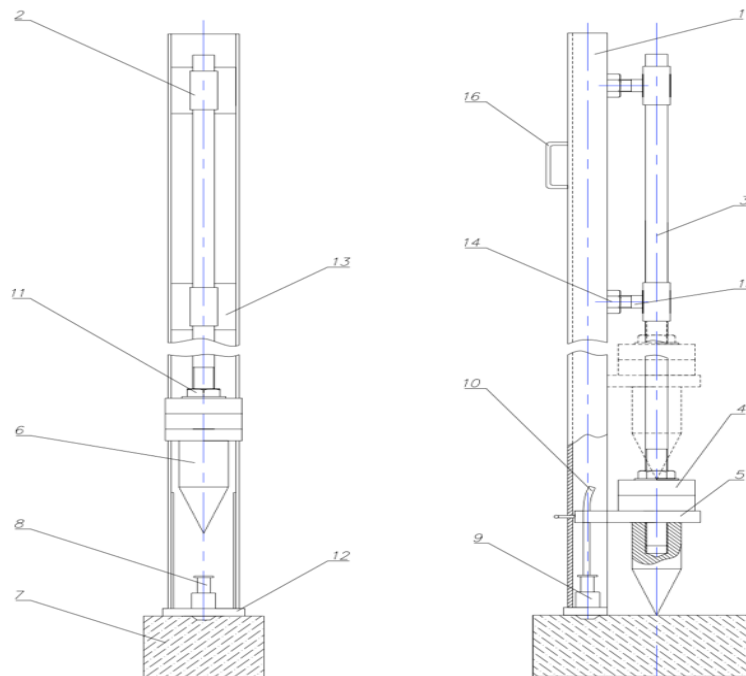


Рисунок 2.6 – Экспериментальная установка: 1 – стойка, 2 – направляющие, 3 – шток, 4 – сменный груз, 5 – несущая пластина, 6 – наконечник, 7 – образец материала, 8 – палец, 9 – втулка, 10 – захват, 11 – прижимная гайка, 12 – опорная плита, 13 – поперечные планки, 14 – контргайка, 15 – винт, 16 – держатель

Лабораторная установка позволяет варьировать независимыми факторами: геометрические размеры инструмента – за счет сменных наконечников, энергия удара – при помощи сменных грузов и высоты подъема ударной части.

Методика предполагает проведение серии экспериментов: определение высоты подъема ударной части H и энергии единичного удара Q , при которых происходит раскол, от высоты образца и угла заострения инструмента α .

Другой известный стенд, представленный на рисунке 2.7 включает направляющую трубу 1, установленную вертикально, ударник 2, долото 3 с шариком 4 и плоскопиленный блок горной породы 5. Долото 3 оснащено восемью породоразрушающими вставками из сплава ВК со сферическими рабочими поверхностями радиусом 4 мм и располагаемые по периметру торца долота 3 с равным шагом. Ударный импульс от ударника 2 к породе передается через шарик 4, что позволяет, меняя положение шарика 4 на поверхности долота 3, изменять эксцентриситет приложения удара.

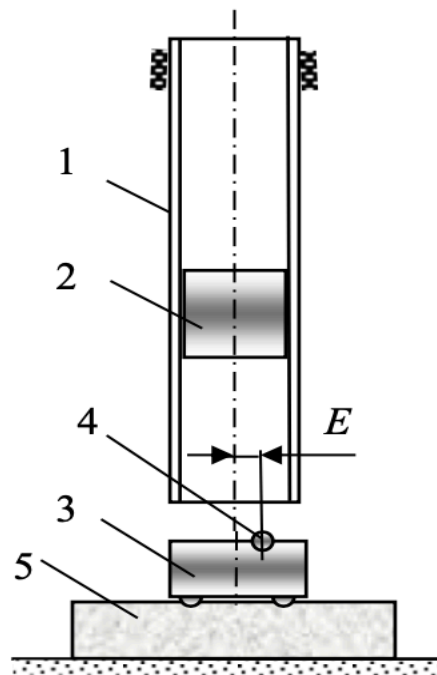


Рисунок 2.7 – Схема установки для исследования процесса разрушения горной породы внецентренными ударами

Приведенные методы ударных испытаний в лабораторных условиях, работающие по принципу сбрасывания ударного инструмента с некоторой высоты, т.е.

использующие для разгона силы земного тяготения, как методы, условия проведения которых наиболее близки к условиям воздействия на габарит породы ударным инструментом гравитационного действия, были использованы в качестве прототипа при разработке представленной ниже методики испытаний.

2.2 Разработка методики и экспериментальной установки по изучению эффективности схемных решений многомассного ударного инструмента, оснащенного аккумулятором энергии, при разрушении металлов и хрупкой горной породы

Исходя из заключения [64], считали, что для обеспечения подобия условий внедрения модельного ударного инструмента в породу условиям внедрения в породу клин-бабы необходимо обеспечить в эксперименте уровень контактных напряжений между модельным инструментом и породой, близкий, к имеющему место при ударном внедрении острия клин-бабы.

Указанное заключение учитывалось при разработке методики испытаний по ударному внедрению модельного инструмента в породу.

2.2.1 Методика и экспериментальная установка для изучения закономерностей взаимодействия ударного инструмента с породой

Эксперименты проводились с использованием экспериментальной установки внешнего вида, который представлен на рисунке 2.8.



Рисунок 2.8 – Вид установки по разрушению горной породы и пластической деформации металлов

Установка (рисунок 2.9) позволяет осуществлять свободное падение элементов 1, 2 модельного ударного инструмента внутри направляющей трубы 4 с заданной высоты H с нанесением индентором 3 удара по образцу 5 анализируемого материала, лежащему на жесткой стальной плите 6.

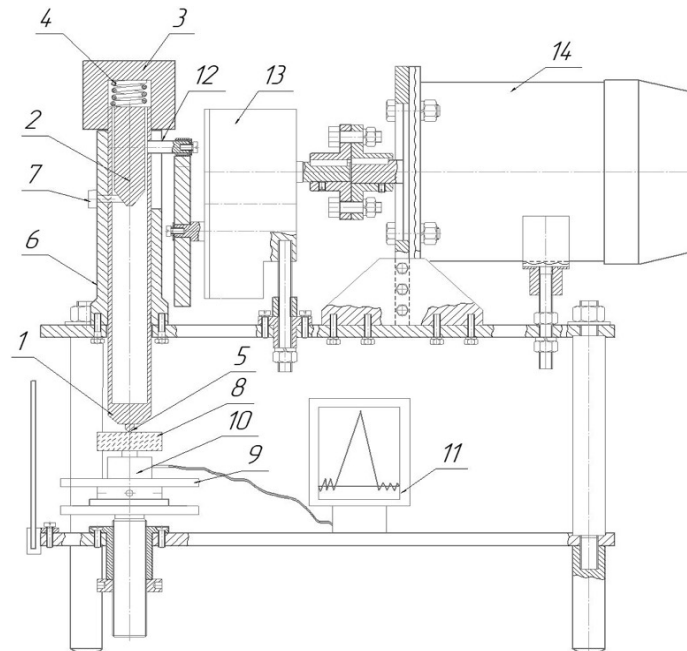


Рисунок 2.9 – Принципиальная схема установки по разрушению анализируемых материалов: 1 – корпус модельного инструмента; 2 – вставка; 3 – крышка; 4 - пружина; 5 – индентор с полусферической площадкой притупления радиусом $R_m = 3\text{ мм}$; 6 - направляющая труба; 7 - стопор; 8 - пластина породы или металла; 9 – установочная плита; 10 – датчик силы РК 1000; 11 – аналого-цифровой преобразователь NI USB 6008; 12 – кулачок; 13 – редуктор; 14 – электродвигатель.

Энергия удара ($Q_{\max} = 6,0 \text{ Дж}$) и скорость соударения ($v_{\max} = 2,5 \text{ м/с}$) в экспериментах рассчитывались, исходя из массы падающего ударника и высоты его падения [12,13, 21].

Модельный инструмент суммарной массой 2 кг состоял из цилиндрического корпуса 1 ($L_k = 295 \text{ мм}$, $D_k = 38 \text{ мм}$, $M_k = 1 \text{ кг}$), одной или нескольких вставок 2 в виде цилиндрических стержней с конусообразным острием с плоской площадкой притупления, крышки 3 и съемной сжатой, оттарированной заранее, пружины 4, с реализацией перехода ее потенциальной энергии ($Q_{np} \sim 3 \text{ Дж}$) в кинетическую энергию вставки в момент соприкосновения индентора корпуса инструмента со

средой. Для получения сравнительных данных изготавливался модельный инструмент тех же внешних размеров и массы, но одномассной конструкции.

В отдельных экспериментах для снятия осциллограмм ударных нагрузений под пластиной 8 материала размещался пьезоэлектрический датчик силы 10 марки РК 1000, связанный с вторичным прибором 11.

Объектом контактного и объемного разрушения породы являлись пластины, толщиной $\delta = 30$ мм, и образцы 10x10x10 мм, 15x15x15 мм и 18x18x18 мм, вырезанные вдоль слоистости из монолитных кусков песчаника крепостью $f = 4$ по шкале М.М. Протоdjeяконова с пределом прочности на сжатие $\sigma_{сж} = 82 - 112$ МПа. Для подтверждения положительного влияния составной конструкции инструмента на передачу энергии объекту внедрения другими испытываемыми материалами являлись пластины ($\delta = 20$ мм) алюминиевого сплава твердостью $27 HB$ и технической меди ($40 HB$) после проката, подвергающиеся в результате удара пластической деформации.

С учетом того, что все обнаруженные в результате патентного поиска ударные инструменты с повышенной интенсивностью воздействия представляли собой составные конструкции, модельный ударный инструмент (рисунок 2.8 поз. 1, 2) вида клин-бабы (рисунок, а) так же состоял из нескольких ударных элементов ($n_{max} = 4$) – корпуса 1 (рисунок 2.10) и находящихся в нем свободно перемещающихся вставок 2 – одной, двух или трех.

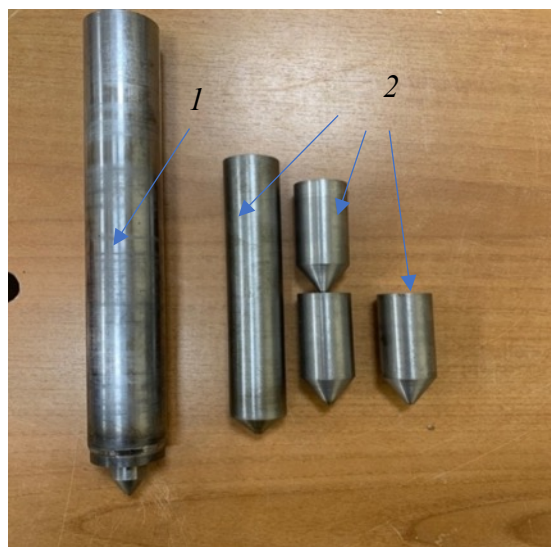


Рисунок 2.10 – Вид корпуса (1) и вставок (2) составного модельного инструмента

Корпус представлял собой полый цилиндр внешним диаметром $D_k = 34$ мм с конусообразным заострением в заглушенной донной части, к которому жестко крепился конусообразный ($\beta = 90^\circ$) индентор 3 с полусферической площадкой притупления радиусом $R = 3$ мм (рисунок 2.11).



Рисунок 2.11 – Вид индентора модельного инструмента

Вставки имели вид цилиндрических стержней ($D_{вст} = 28$ мм) с конусообразным заострением под углом $\beta = 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$, заканчивающимся плоской площадкой притупления радиусом $r = 3$ мм, которой они опирались на ниже лежащую вставку или дно корпуса инструмента (рисунок 2.9). Общая масса всех ударных элементов такого составного модельного инструмента во всех экспериментах составляла 2 кг. При разработке такой составной конструкции предполагали, что ее применение позволит обеспечить многократное ударное воздействие, суммарная продолжительность которого превысит время удара цельного инструмента. Это должно сказаться на повышении эффективности разрушения и пластической деформации анализируемых материалов.

Для получения сравнительных данных изготавливался модельный инструмент тех же внешних размеров, но цельной, а не составной конструкции, т.е. представляющий собой один ($n = 1$) ударный элемент. Он также имел полость внутри, но большую толщину донной части, что обеспечивало равенство его массы ($M = 2$ кг) массе составного ударника. Оба ударника изготавливались из качественной стали 45 и подвергались закалке с высоким отпуском. Для изготовления индентора корпуса использовалась инструментальная сталь У8, подвергаемая закалке и низкому отпуску до достижения твердости поверхности (~ 60 HRC), обес-

печивающей сохранение радиуса r площадки притупления индентора на протяженности всех испытаний на постоянном уровне.

В первой серии испытаний при заданных высоте H (энергии Q_0) в различные точки пластин породы и металлических материалов модельным инструментом каждой конструкции наносилась серия из 10 ударов со смещением точки нанесения каждого последующего удара на расстояние $\geq 3d_l$, где d_l – диаметр лунки (рисунок 2.12).

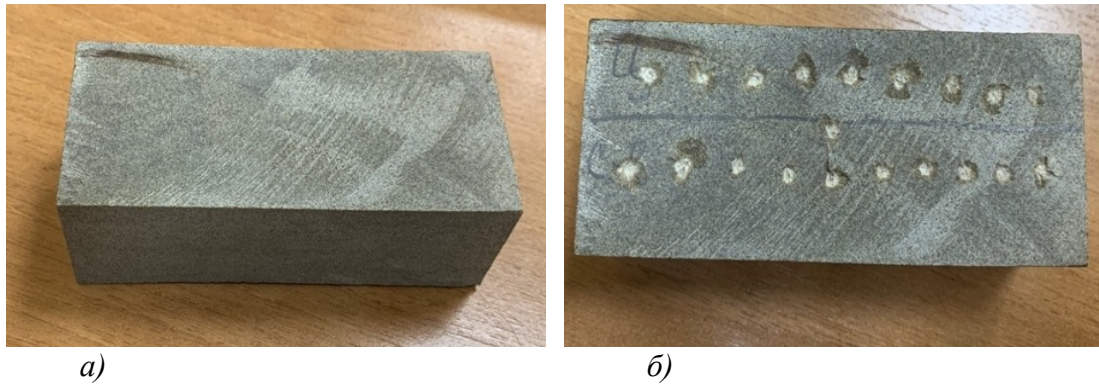


Рисунок 2.12 – Вид поверхности фрагмента песчаника до (а) и после (б) нанесения серии ударов модельным инструментом

После нанесения серии ударов анализировались вид лунок, образующихся на пластинах в результате их контактного разрушения (пластической деформации) при ударе, с замером их глубины (точность замера 0,01 мм) (рисунок 2.13) и установлением истинного значения глубины лунки $\alpha_l = \bar{\alpha}_l + \sigma_{\alpha_l}$, σ_{α_l} - среднеквадратичное отклонение.



Рисунок 2.13 – Вид индикатора часового типа ИЧ 0-10 0.01, используемого для измерения глубины лунок в пластинах породы и металлов

Важно отметить, что значения угла заострения индентора ($\beta = 90^\circ$), радиуса его полусферической площадки притупления ($r = 3$ мм), массы модельного инструмента ($M = 2$ кг), были выбраны, исходя из выполнения критерия подобия в экспериментах условиям работы реальной клин-бабы (п. 0).

Изменяя материал пластин и вид модельного инструмента, для каждого из них проводили серию указанных экспериментов, по результатам которых строили зависимости α_d от энергии удара Q_0 .

В этих же экспериментах снимались осциллограммы ударных нагружений, из вида которых определялись количество максимумов силы при ударном воздействии и время t удара.

Во второй серии опытов для каждой высоты падения ударных инструментов (энергии удара) определялось число ударов, которое необходимо нанести в одну и ту же среднюю точку поверхности пластины породы разной толщины (10 мм, 15 мм, 18 мм) для ее раскалывания. После разрушения производились замеры величины поверхности скола и рассчитывалась удельная энергия процесса разрушения (2.1):

$$Q_{уд} = Q_{0i} N_i / F_{ск}, \quad (2.1)$$

где Q_{0i} – энергия единичного удара, Дж;

N_i – число ударов до разрушения;

$F_{ск}$ – площадь скола m^2 , с построением зависимости $Q_{уд} = f(Q_{0i})$.

Проведя эксперименты на образцах различного размера (10x10x10 мм, 15x15x15 мм и 18x18x18 мм), определяли для каждого из них удельную поверхностную энергию разрушения $Q_{уд}$ – минимальную энергию ударного воздействия, требующуюся для разрушения образца за один удар, отнесенную к площади возникающей поверхности разрушения (скола).

Все измерения проводились на сертифицированном оборудовании.

Основной задачей исследований на разработанной установке являлось определение влияния составной конструкции модельного инструмента на глубину

его внедрения в горную породу и металлические материалы, а также на энергию удара, необходимую для раскалывания пластин песчаника различной толщины.

2.2.2 Обоснование подобия процессов внедрения в породу модельного инструмента и клин-бабы

Для обоснования возможности переноса экспериментальных данных, полученных с применением модельного ударного инструмента, на натурные условия устанавливали рабочие параметры эксперимента, при соблюдении которых его условия будут подобны условиям работы клин-бабы.

Исходя из заключения исследователей [33, 37, 67], которые считали, что для обеспечения подобия условий внедрения модельного ударного инструмента в породу условиям внедрения в породу клин-бабы необходимо обеспечить в эксперименте уровень контактных напряжений между модельным инструментом и породой, близкий, к имеющему место при ударном внедрении острия клин-бабы.

На основании [11, 14, 16, 30, 34, 40, 41, 50, 53, 56, 58, 62, 64, 68, 82, 94] физическое уравнение процесса внедрения модельного и натурального (клин-бабы) инструмента в породу представляли в виде функционала (2.2) [9]:

$$\varphi = (A_0, \sigma_k, E_{me}, E_p, \mu_{me}, \mu_p, R_p, \beta_p, k_p), \quad (2.2)$$

где A_0 – энергия удара, Дж;

σ_k – напряжение контакта, МПа;

E_{me}, μ_{me} – модуль упругости и коэффициент Пуассона металла инструмента, МПа;

E_p, μ_p – то же породы, МПа;

R_p – радиус площадки притупления объекта внедрения в породу, м;

β_p – угол заострения объекта внедрения;

k_p – поправочный коэффициент.

Размерность параметров, определяющих процесс внедрения (2.3):

$$\left. \begin{array}{l} [A_0] = [L^2 M^1 T^{-2}] \Rightarrow P_1 \quad [\mu_n] = [L^0 M^0 T^0] \Rightarrow P_6 \\ [\sigma_k] = [L^{-1} M^1 T^{-2}] \Rightarrow P_2 \quad [R] = [L^1 M^0 T^0] \Rightarrow P_7 \\ [E_{me}] = [L^{-1} M^1 T^{-2}] \Rightarrow P_3 \quad [\beta] = [L^0 M^0 T^0] \Rightarrow P_8 \\ [E_n] = [L^{-1} M^1 T^{-2}] \Rightarrow P_4 \\ [\mu_{me}] = [L^0 M^0 T^0] \Rightarrow P_5 \end{array} \right\}, \quad (2.3)$$

где L – длина;

M – масса;

T – время.

Таким образом, полная матрица размерностей имела размер $n \times q$, где $n = 8$ – общее число параметров, определяющих процесс внедрения, $q = 3$ – число основных единиц измерения параметров.

После исключения в (2.3) безразмерных параметров (P_5, P_6, P_8) и сокращения до одного параметра, имеющих одинаковые размерности (в нашем случае из параметров P_2, P_3 и P_4 целесообразно оставить параметр P_2), получали сокращенную матрицу вида (2.4):

$$\|A\| = \left\| \begin{array}{ccc} 2 & 1 & -2 \\ -1 & 1 & -2 \\ 1 & 0 & 0 \end{array} \right\| \Rightarrow \begin{array}{l} A_0 \\ \sigma_k \\ R \end{array}. \quad (2.4)$$

Общее количество критериев подобия N_π , определяемое, как $N_\pi = m - l$, [8] (здесь m, l – общее количество (A_0, σ_k, R) и число независимых (A_0, R) параметров), для нашего случая равно $3 - 2 = 1$. Конкретное выражение критерия подобия π для независимых параметров A_0 и R имело вид (2.5):

$$\pi = P_3 (P_1^x, P_2^y)^{-1} = \sigma_k (A_0^x, R^y)^{-1}, \quad (2.5)$$

где x, y – неизвестные показатели степеней при независимых параметрах для раскрытия конкретного вида критерия подобия.

Поскольку критерий подобия безразмерная величина, то размерности числителя и знаменателя должны быть одинаковы и из соотношения (2.3) записывали (2.6):

$$[\sigma_k] = [A_0]^x [R]^y \quad (2.6)$$

Раскрывая размерность параметров последнего выражения (2.7):

$$[L^{-1}M^1T^{-2}] = [L^2M^1T^{-2}]^x [L^1M^0T^0]^y, \quad (2.7)$$

и решая полученную систему уравнений (2.8):

$$\left. \begin{array}{l} 2x+y = -1 \\ x = 1 \\ -2x = -2 \end{array} \right\} \quad (2.8)$$

получали $x = 1$; $y = -3$.

Таким образом, критерий подобия для условий моделирования (π_m) и натуральных условий (π_n) имел вид (2.9):

$$\pi = \text{idem} \Leftrightarrow \pi_m = \pi_n \Leftrightarrow \sigma_{k,m} A_{0,m}^{-1} R_m^3 = \sigma_{k,n} A_{0,n}^{-1} R_n^3. \quad (2.9)$$

Откуда, для обеспечения равенства σ_k получали (2.10):

$$\frac{\sigma_{k,m}}{\sigma_{k,n}} = \frac{A_{0,m}}{A_{0,n}} \left(\frac{R_m}{R_n} \right)^{-3}, \quad (2.10)$$

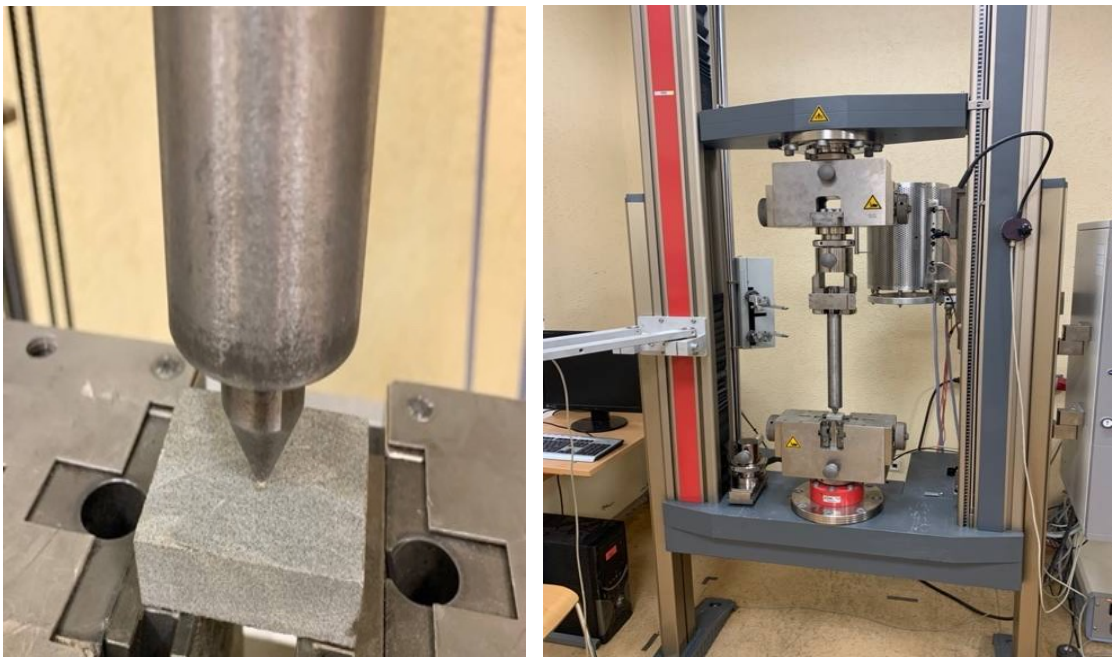
где $\sigma_{k,m}$, $\sigma_{k,n}$, $A_{0,m}$, $A_{0,n}$, R_m , R_n – контактные напряжения, энергии удара и радиусы площадки притупления модельного и натурального инструмента.

Выбрав для модельного инструмента массой 2 кг максимальную высоту падения $H = 320$ мм, как удобную для проведения экспериментов, получали значение энергии удара $A_{0,m} = Q_0 = 6,5$ Дж, после подстановки в (2.10) которого совместно со значениями $A_{0,n} = 176$ кДж и $R_n = 90$ мм устанавливали необходимую величину радиуса площадки притупления модельного ударного инструмента $R_m = 3$ мм.

Таким образом, для моделирования условий внедрения клин-бабы в породу высота падения инструмента и его радиус должны составлять в экспериментах величины 320 мм и 3 мм, соответственно, что и было осуществлено.

2.2.3 Методика и экспериментальная установка для изучения закономерностей взаимодействия модельного инструмента с породой в квазистатических условиях

Эксперименты в квазистатических условиях проводились с использованием универсальной испытательной Zwick ZHU 100 (погрешность измерения по усилию $N = \pm 0,4$ Н, по деформации 0,1 мм в среднем) и заключались в сравнительно медленном ($1,3 \cdot 10^{-5}$ м/с) внедрении индентора модельного инструмента в среднюю точку поверхности пластин песчаника (рисунок 2.14) до их раскалывания.



а)

б)

Рисунок 2.14 – Машина Zwick ZHU 100, подготовленная к испытаниям, (а) и вид модельного инструмента в момент внедрения индентора в пластину песчаника (б)

С фиксацией зависимостей усилия N от перемещения h траверсов машины, из вида которых устанавливались:

- максимальное внедрение индентора в породу α_p , предшествующее раскалыванию пластины;

- глубина образовавшейся после внедрения лунки $\alpha_{л.ст}$;
- усилие раскалывания N_p ;
- коэффициент жесткости $g_{ст}$ системы «индентор– порода» в статических условиях;
- работа раскалывания A_p ;
- удельная поверхностная энергоемкость раскалывания $A_{р.уд} = A_p/F_p$, где F_p – площадь образовавшейся поверхности фрагментов раскалывания;
- контактное разрушающее напряжение $\sigma_{кр} = N/F_k$, где F_k - площадь контактной поверхности индентора с породой.

Для уточнения закономерностей протекающих процессов опыты по внедрению индентора в квазистатических условиях проводились и на пластинах металлических материалов – алюминиевого сплава (27 *НВ*) и технической меди (40 *НВ*). Как и в случае внедрения в породу определялась зависимость усилия N от перемещения h траверсов машины, из вида которой устанавливался коэффициент жесткости $g_{ст}$ системы «индентор – металл».

В другой серии экспериментов на различных стадиях вдавливания (значениях N) опыт прекращался для установления глубины образовавшейся лунки $\alpha_{л.ст}$, после чего строилась зависимость $\alpha_{л.ст} = f(N)$.

2.3 Выводы по главе 2

1. Проанализированы существующие методики проведения экспериментальных исследований по ударному разрушению образцов горной породы. Рассмотрены конструкции и принципы действия существующих лабораторные установок по изучению процесса ударного разрушения материалов.

2. Исходя из критерия подобия ударных систем, обоснованы рабочие параметры эксперимента по ударному внедрению модельного инструмента в горную породу, при которых условия проведения опытов будут подобны условиям работы клин-бабы в условиях гравитационного действия.

3. Исходя из выполнения условий подобия модельного и натурального инструмента, разработаны методика и экспериментальная установка по изучению эффективности схемных решений многомассного ударного инструмента, оснащенного аккумулятором энергии, при разрушении металлов и хрупкой горной породы.

4. Предложены методика и аппаратное оформление экспериментов по изучению закономерностей взаимодействия модельного инструмента с породой и металлическими материалами в квазистатических условиях.

ГЛАВА 3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ ПЕРЕДАЧИ ТВЕРДОЙ СРЕДЕ ЭНЕРГИИ УДАРА ОДНО- И МНОГОМАССНОГО УДАРНОГО ИНСТРУМЕНТА

3.1 Основные методы расчета параметров удара ударной системы

Известны четыре основных метода расчета параметров удара:

- классический,
- контактно-классический,
- волновой,
- контактно-волновой.

Уравнения классической механики связывают скорости двух тел до центрального удара и после него, при условии, что тела свободны, т. е. во время удара никакие силы, кроме ударных, на них не действуют [9]. При этих условиях ударяющее тело массой m_1 , движущееся со скоростью v_0 , получает после удара о неподвижное тело массой m_2 , скорость (3.1):

$$v_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_0, \quad (3.1)$$

сообщая ударяемому телу скорость (3.2):

$$v_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_0, \quad (3.2)$$

при коэффициенте передачи энергии при ударе от одного тела к другому (3.3) [8]:

$$\eta = \frac{m_2 v_2^2}{2} \bigg/ \frac{m_1 v_1^2}{2} = \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} \quad (3.3)$$

Классическая динамика позволяет определить только эти параметры, и все попытки перехода к силам, деформациям, времени путем введения эмпирических коэффициентов или произвольных параметров лишают методику расчета удара, построенную на классической динамике, необходимой точности и строгости [9].

Контактно-классическая теория удара, предложенная Герцем, объединяет классическую динамику со статическими решениями теории упругости, что позволяет в ряде случаев достаточно точно оценить силу удара, деформации и продолжительность соударения. В соответствии с этой теорией процесс соударения двух тел описывается системой уравнений динамики для каждого тела (3.4) [2,9]:

$$\frac{m_1 d^2 x_1}{dt^2} = -N; \quad \frac{m_2 d^2 x_2}{dt^2} = N \quad (3.4)$$

и зависимостью между сближением (суммой деформаций) и действующей силой $N = f(\alpha) = f(x_1 - x_2)$. Если второе тело очень велико и перемещением его центра тяжести можно пренебречь ($x_2 = 0, \alpha = x_1$) [9], то (3.5):

$$m \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = -N. \quad (3.5)$$

Функция $N = f(\alpha)$, необходимая для решения этого уравнения, определяется формой и размерами тел в области контакта и их упругими постоянными.

Противоречия между результатами решения задачи о соударении тел по изложенным выше теориям удара Ньютона и Герца и результатами эксперимента, возникающие при ударе по объекту значительной длины, объясняются волновой теорией удара Сен-Венана, основывающейся на ограничении скорости распространения напряжений и деформаций (скорость звука, волны) в соударяющихся телах при ударе. По этой теории при ударе по телу (или телом) относительно большой протяженности в соударении участвует не вся масса тела, а только та ее часть m_y , на которую успела распространиться ударная волна за время удара t , что описывается формулой (3.6) [9]:

$$m_y = \rho F a t, \quad (3.6)$$

где ρ – плотность материала объекта;

F – площадь его поперечного сечения;

a – скорость ударной волны (скорость звука).

Выражение (3.6) позволяет получить все основные количественные соотношения удара в стержнях значительной длины.

Для решения вопроса о возможности применения формулы (3.6) при расчете ударных процессов предложен критерий вида (3.7):

$$t_y \geq 3T, \quad (3.7)$$

при выполнении которого допустимо рассматривать, соударяющиеся тела как тела классической механики [9]. Здесь t_y продолжительность соударения, T – период собственных колебаний ударяющего или ударяемого тела (3.8):

$$T = \frac{2L}{a}, \quad (3.8)$$

где L – наибольший размер тела.

Контактно-волновая теория расчета ударных процессов, предложенная Сирсом [2], учитывает не только волновые процессы в стержнях, но и местные деформации их торцов при реальном неплоском ударе. Для учета этих местных деформаций используют решения контактных задач теории упругости, которые дают возможность определить силовую функцию $N = f(\alpha)$ торцевой области контакта [8].

Согласно [64] взаимодействие ударника и разрушаемого материала, как составляющих двухэлементной ударной классической системы, описывается базовым уравнением упругого удара (3.9) [2,9]:

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} = -\frac{N}{m}, \quad (3.9)$$

где α – сближение центра тяжести ударника с разрушаемым материалом во время удара, складывающееся из внедрения и деформации ударника;

t – время, отсчитываемое от начала удара;

N – сила взаимодействия ударника с разрушаемым материалом;

m – масса ударника;

t_y – время удара;

T – период собственных колебаний ударника. [9]

Условие применимости этого уравнения – выполнение неравенства (3.7) ($t_y \geq 3T$).

3.2 Теоретические исследования по оценке эффективности передачи твердой среде энергии удара ударным инструментом

Теоретические исследования проводили на примере ударного внедрения в пластины песчаника, алюминия и меди полусферического индентора модельного одно- и многомассного инструмента, в том числе и с аккумулятором энергии (рисунок 2.9). Масса инструмента $m_0 = 2$ кг, скорость в момент контакта с породой v_0 – до 2,4 м/с, энергия удара Q_0 – до 5,8 Дж.

Учитывая, что рассматриваемый модельный инструмент представляет собой упругий элемент относительно небольшой длины, считали, что влиянием волновых процессов на его параметры удара можно пренебречь и процесс взаимодействия инструмента и разрушаемого материала может быть описан уравнениями двухэлементной классической ударной системы В.Б. Соколинского [9, 64]. (Как подтвердили результаты проведенного расчета ($t_y \sim 0,3$ мс, $T \sim 0,08$ мс), условие их применимости (3.7) – выполняется) [9].

Исходя из выводов [64] о существующих видах нагрузочных характеристик контактного разрушения хрупкой породы, с учетом собственных наблюдений за процессом внедрения модельного инструмента в пластины песчаника и металлов (далее материалов), заключали, что зависимость силы сопротивления материала N от перемещения α_Σ модельного инструмента при его внедрении в материал состоит из двух силовых функций, имеющих линейный характер вида $N = g\alpha$: нагрузки N_1 и разгрузки N_2 ,

Каждая из которых характеризуется своей жесткостью g_1 , g_2 . Стадия нагрузки с суммарной жесткостью g_Σ отвечает одновременному протеканию двух процессов:

- внедрения инструмента в среду с жесткостью g_1 и

- упругой деформации инструмента и среды под площадкой контакта с жесткостью g_2 (рисунок 3.1).

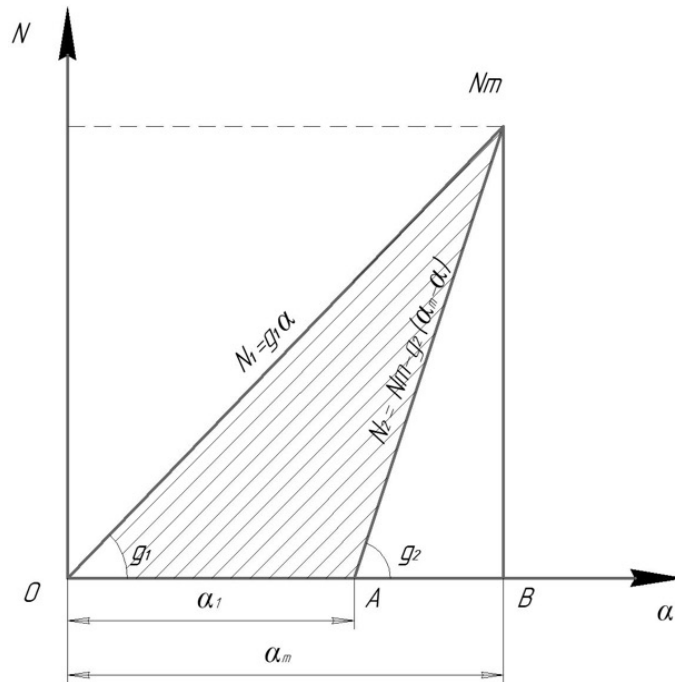


Рисунок 3.1 – Нагрузочная характеристика контактного разрушения породы и металлических материалов при внедрении (вдавливании для металлов) модельного инструмента

При этом процесс внедрения для породы складывается, в свою очередь, из серии актов микроразрушений (рисунок 3.2).

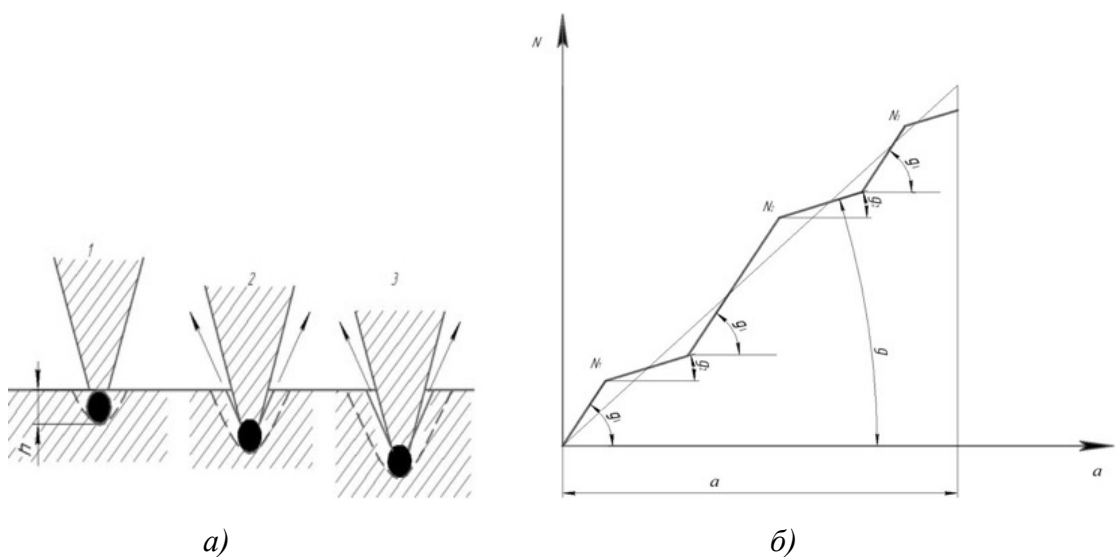


Рисунок 3.2 – Схема многоактного разрушения при внедрении модельного инструмента в породу (а) (1-3 акты разрушения) и эквивалентная характеристика (б)

Каждый из актов включает все стадии контактного разрушения, т.е. акты сжатия микрообъемов породы и их разрушения, но небольшие по глубине и скоротечные по времени

В случае металлов, как пластичных материалов, стадии нагрузки отвечает пластическая деформация прилегающего к индентору слоя металла с выдавливанием его из лунки.

Стадия разгрузки с жесткостью g_2 отвечает процессу отбрасывания инструмента силами остаточной упругости инструмента и среды.

Для такой схемы взаимодействия остаточная глубина внедрения α_1 и КПЭ ударного импульса η соответственно равны (3.10), (3.11):

$$\alpha_1 = (2Qg_\Sigma)^{0,5}(1/g_\Sigma - 1/g_2) = [(2g_\Sigma)^{0,5}(1/g_\Sigma - 1/g_2)] Q^{0,5} = K Q^{0,5} \quad (3.10)$$

$$\eta = Q_p/Q = 1 - g_\Sigma/g_2 \quad (3.11)$$

В случае многомассного инструмента с аккумулятором энергии (пружиной) энергия удара складывается из кинетической энергии корпуса и вставки, 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 пружины (3.12):

$$\frac{M_k V^2}{2} + \left(\frac{M_{вст} V_{пр}^2}{2} + \frac{M_{вст} V^2}{2} \right) = \frac{M_k \sqrt{2gh}}{2} + \left(\frac{M_{вст} \sqrt{\frac{Fx}{M_{вст}}}}{2} + \frac{M_{вст} \sqrt{2gh}}{2} \right) \quad (3.12)$$

где M_k – масса корпуса, кг;

$M_{вст}$ – масса вставки, кг;

V – скорость, развиваемая под действием свободного падения, в момент контакта со средой, м/с;

$V_{пр}$ – скорость, развиваемая под действием пружины м/с;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

h – высота падения, м.

Важно отметить, что передача дополнительного 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. В обоих случаях, их воздействие, условно, эквивалентно увеличению жесткости g_2 системы на стадии разгрузки до уровня g_2^* (рисунок 3.3) в выражении (3.13):

$$\alpha_1^* = [(2g_\Sigma)^{0,5}(1/g_\Sigma - 1/g_2^*)] Q_\Sigma^{0,5} = K^* Q_\Sigma^{0,5} \quad (3.13)$$

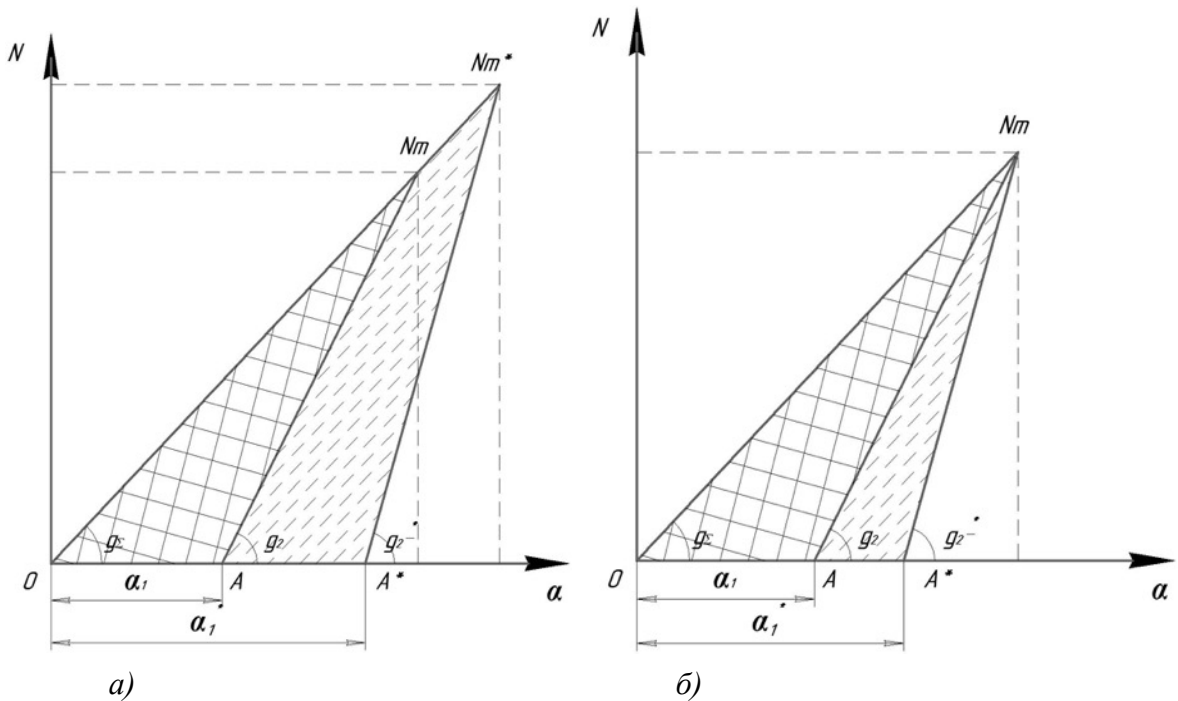


Рисунок 3.3 – Нагрузочная характеристика контактного разрушения среды при внедрении одномассного (линия $ONmA$) и многомассного инструмента с аккумулятором (а) и без аккумулятора (б) энергии (линия $ONmA^*$). (Полезные энергии Q_p и Q_p^* – площади треугольников $ONmA$, $ONmA^*$)

При таком допущении, увеличение глубины лунки при использовании инструмента с аккумулятором энергии (3.14):

$$\alpha_1^* / \alpha_1 = K^* Q_\Sigma^{0,5} / K Q_\Sigma^{0,5} \quad (3.14)$$

Установление величин g_Σ , g_2 , необходимых для расчета α_1 и КПЭ удара, проводили, исходя из вида нагрузочных характеристик системы «инструмент - анализируемый материал», полученных в квазистатических условиях (рисунок 3.3). При этом, исходили из вывода В.Б. Соколинского, что «коэффициент жесткости g ударной системы, определяемый углом наклона начальной части нагру-

зочной 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».

Для проведения расчетов по предложенной модели требуются данные о величинах g_1 , g_2 контактной жесткости системы «инструмент – порода», которые были получены экспериментально-расчетным путем.

3.3 Анализ процессов, происходящих при внедрении модельного инструмента в песчаник и металлические материалы в квазистатических условиях

На рисунке 3.4 представлен типичный вид зависимостей «усилие N » - «перемещение траверсы испытательной машины h », полученных при внедрении индентора модельного инструмента в пластину песчаника под действием нагрузки, приложенной к торцевой поверхности инструмента (методика в пункте 2.4). Конечная точка кривой с координатами a_p , N_p соответствует моменту раскалывания пластины.

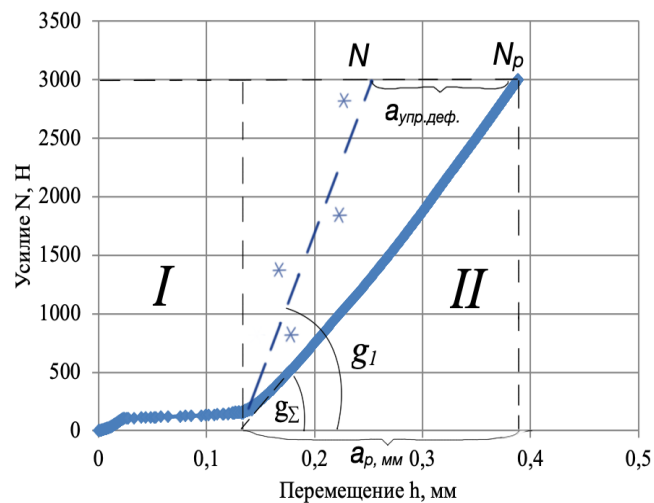


Рисунок 3.4 – Типичный вид кривой зависимости усилия от перемещения траверсов машины при внедрении индентора модельного инструмента в пластину песчаника

На начальном этапе I перемещение происходит без заметного увеличения нагрузки N , на этапе II нагрузка возрастает по зависимости, близкой к линейной. Исходя из отсутствия следов внедрения в породу на этапе I перемещения заключали, что этот этап соответствует выбору зазоров между движущимися элемента-

ми оснастки машины, вследствие чего сжатию инструмента и породы, а также внедрению индентора в породу и соответствует только этап *II* диаграммы с выражением перемещения величиной α на графике.

Экстраполируя зависимость $N = f(\alpha)$ прямой линией, определяли угол ее наклона к оси перемещений, тангенс которого принимали за эквивалентную жесткость системы g_{Σ} ($\sim 1,1 \cdot 10^7$ Н/м) с заключением, что нагрузочная характеристика при внедрении индентора в песчаник может быть описана силовой функцией вида $N = g_{\Sigma} \alpha$.

Как показали результаты экспериментов по вдавливанию модельного инструмента в металлические пластины, указанная зависимость, как и в случае породы, так же оказалась состоящей из двух участков, участок *I* из которых соответствует выбору зазоров между движущимися элементами оснастки машины, а только второй – внедрению индентора в пластину с выражением перемещения величиной α на графике. При этом зависимость $N = f(\alpha)$ на этом участке также представляла собой плавную кривую, стремящуюся к прямой (рисунок 3.5). После экстраполяции указанной зависимости прямой линией установленные значения g_{Σ} составляли: $0,45 \cdot 10^7$ Н/м для алюминия и $0,55 \cdot 10^7$ Н/м для меди.

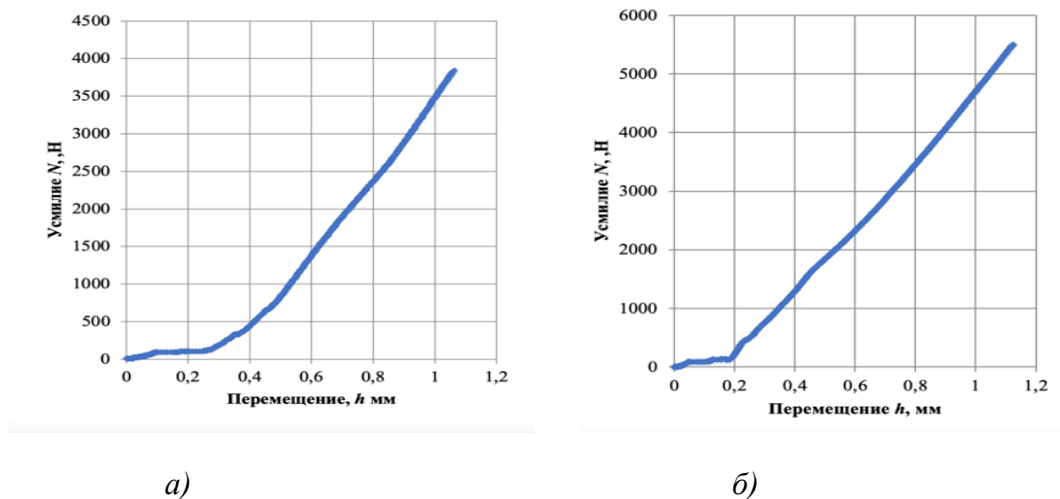


Рисунок 3.5 – Типичный вид кривых зависимости усилия от перемещения траверса машины при внедрении индентора модельного инструмента в пластины меди (*a*) и алюминия (*б*)

Как показали замеры глубины $\alpha_{л.ст}$ лунок, остающихся на пластинах после снятия нагрузки на инструмент при достижении того или иного значения N , их

величина оказалась меньше, чем перемещение α траверсы машины для этого же значения N , что объясняется упругой деформацией $\alpha_{\text{упр.деф}}$ инструмента и породы под площадкой контакта при внедрении индентора, исчезающей после снятия нагрузки. Как оказалось, экспериментальные точки зависимостей $N = f(\alpha_{\text{л.ст}})$, $N = f(\alpha_{\text{упр.деф}})$ удовлетворительно аппроксимируются линейными функциями вида $N = g_1 \alpha_{\text{л.ст}}$, $N = g_2 \alpha_{\text{упр.деф}}$ (рисунок 3.6) с коэффициентами пропорциональности g_1 , g_2 равными:

- $1,67 \cdot 10^7$ Н/м для песчаника; $0,64 \cdot 10^7$ Н/м для алюминия и $0,90 \cdot 10^7$ Н/м для меди (g_1);
- $1,86 \cdot 10^7$ Н/м для песчаника; $1,41 \cdot 10^7$ Н/м для алюминия и $1,52 \cdot 10^7$ Н/м для меди (g_2).

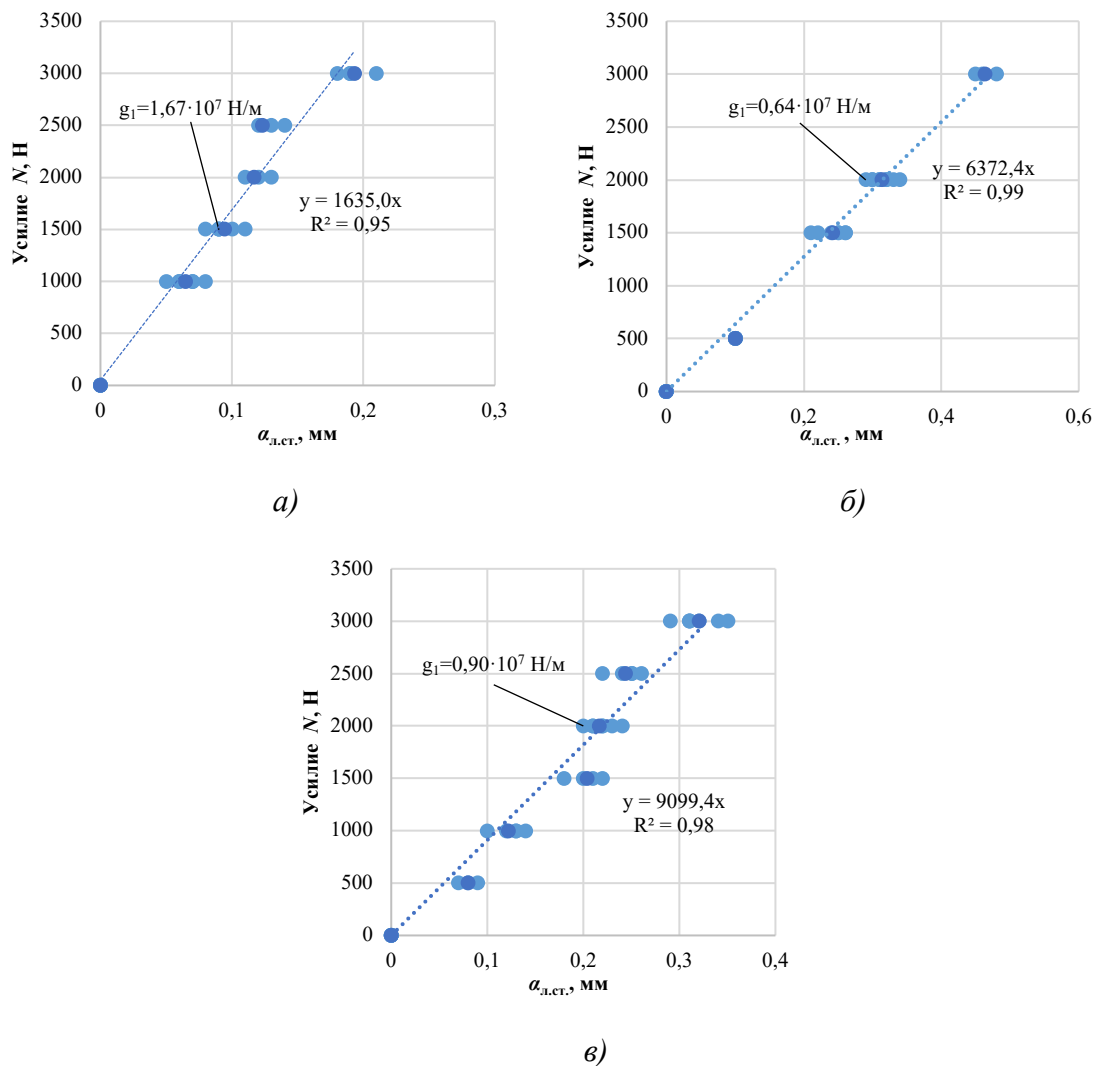


Рисунок 3.6 – Экспериментальная зависимость глубины лунок, образовавшихся на пластинах песчаника (а), алюминия (б) и меди (в), от прилагаемой нагрузки в квазистатических условиях и ее линейная экстраполяция

3.4 Выводы по главе 3

1. Рассмотрены основные методы расчета параметров удара ударной системы – классический, контактно-классический, волновой, контактно-волновой – и области их применения.

2. После анализа геометрических размеров модельного и натурального инструментов, представляющих собой упругие элементы относительно небольшой длины, делается вывод, что влиянием волновых процессов на параметры удара рассматриваемых инструментов можно пренебречь и процесс их взаимодействия с разрушаемым материалом может быть описан уравнениями двухэлементной классической ударной системы.

3. Исходя из вывода, что зависимость силы сопротивления среды от глубины внедрения инструмента при ударе состоит из двух силовых функций линейного вида нагрузки и разгрузки, первая из которых отвечает одновременному протеканию двух процессов – внедрению инструмента в среду и упругой деформации инструмента и среды под площадкой контакта, а вторая – процессу отбрасывания инструмента силами остаточной упругости инструмента и среды, предложено математическое описание процесса ударного внедрения модельного инструмента в металлы и хрупкую породу. При этом предполагали, что замедление отскока инструмента при ударе, имеющее место, как предполагается, при применении многомассного инструмента, в том числе, и с аккумулятором энергии, может быть учтено в математическом описании процесса увеличением жесткости системы на стадии разгрузки.

4. С учетом заключения В.Б. Соколинского, что «коэффициент жесткости 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», считали, что установление параметров жесткости системы «инструмент - анализируемый материал», необходимых для расчета глубины внедрения и коэффициента переда-

чи энергии при ударе, может быть осуществлено, исходя из вида нагрузочных характеристик этой системы, полученных в квазистатических условиях, что было осуществлено на практике.

ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ СРАВНЕНИЕ С РАС- СЧИТАННЫМИ ПО ПРЕДЛАГАЕМОЙ МОДЕЛИ

4.1 Закономерности внедрения модельного инструмента в анализируемые материалы в динамических условиях

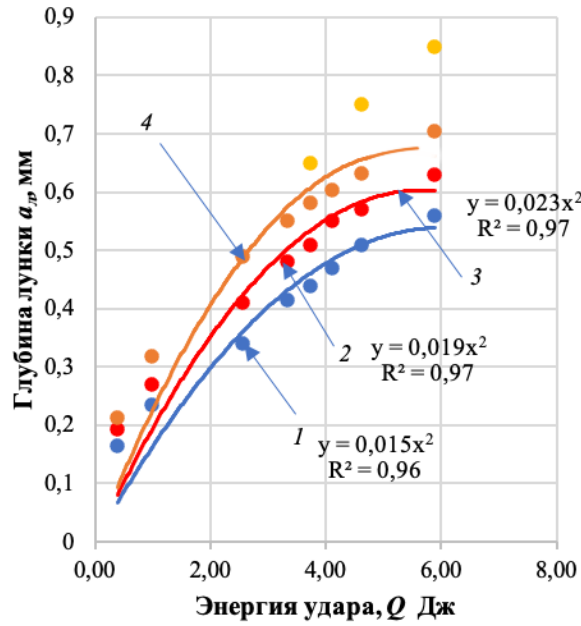
Результаты первой серии экспериментов по контактному разрушению породы и пластической деформации металлов представлены в таблице 4.1 и на рисунке 4.1.

Таблица 4.1 – Глубина α_l внедрения в пластины анализируемых материалов одно и многомассного инструмента при различных кинетических энергиях.

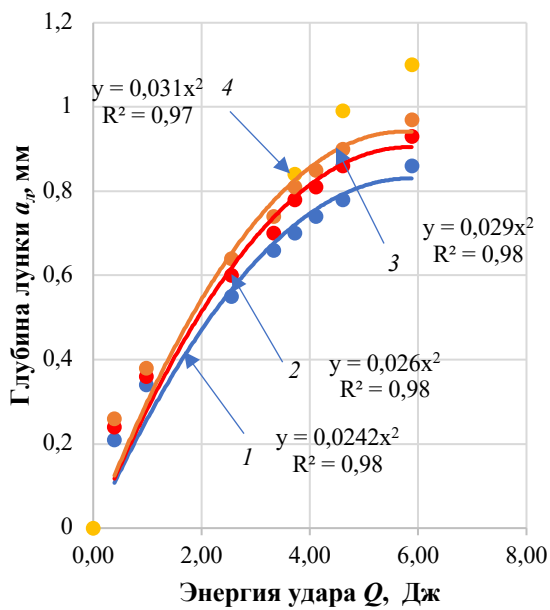
Число n ударных элементов в конструкции	Параметр	Значение α_l при величине Q , Дж							
		0,39	0,98	2,55	3,33	3,72	4,12	4,61	5,88
		Песчаник							
$n = 1$ (одно-массный)	α_l , мм	0,17	0,24	0,34	0,42	0,44	0,47	0,51	0,56
	σ_{α_l} , мм	$\pm 0,03$	$\pm 0,05$	$\pm 0,07$	$\pm 0,02$	$\pm 0,16$	$\pm 0,09$	$\pm 0,06$	$\pm 0,09$
$n = 2$ (двух-массный)	α_l , мм	0,193	0,27	0,41	0,48	0,51	0,55	0,57	0,63
	σ_{α_l} , мм	$\pm 0,03$	$\pm 0,06$	$\pm 0,08$	$\pm 0,06$	$\pm 0,10$	$\pm 0,07$	$\pm 0,05$	$\pm 0,04$
$n = 3$ (трех-массный)	α_l , мм	0,21	0,32	0,49	0,55	0,58	0,60	0,63	0,70
	σ_{α_l} , мм	$\pm 0,03$	$\pm 0,06$	$\pm 0,08$	$\pm 0,06$	$\pm 0,10$	$\pm 0,07$	$\pm 0,05$	$\pm 0,04$
$n = 2$ (с пружиной)	α_l , мм	-	-	-	-	0,65	0,70	0,75	0,85
	σ_{α_l} , мм	-	-	-	-	$\pm 0,10$	$\pm 0,04$	$\pm 0,05$	$\pm 0,04$
Медь									
$n = 1$ (одно-массный)	α_l , мм	0,21	0,34	0,55	0,66	0,70	0,74	0,76	0,86
	σ_{α_l} , мм	$\pm 0,01$	$\pm 0,04$	$\pm 0,12$	$\pm 0,09$	$\pm 0,03$	$\pm 0,023$	$\pm 0,03$	$\pm 0,03$
	$V_{\text{деф}}$, мм ³	0,41	1,05	2,68	3,80	4,26	4,73	5,23	6,30
	$M_{\text{деф}}$, мг	3,63	9,37	23,92	33,99	38,06	42,32	44,53	56,33
$n = 2$ (двух-массный)	α_l , мм	0,24	0,36	0,60	0,70	0,78	0,81	0,86	0,93
	σ_{α_l} , мм	$\pm 0,02$	$\pm 0,04$	$\pm 0,02$	$\pm 0,067$	$\pm 0,09$	$\pm 0,08$	$\pm 0,02$	$\pm 0,05$
	$V_{\text{деф}}$, мм ³	0,53	1,17	3,17	4,26	5,23	5,62	6,30	7,31
	$M_{\text{деф}}$, мг	4,72	10,48	28,30	38,06	46,80	50,28	56,33	65,31

Продолжение таблицы 4.1

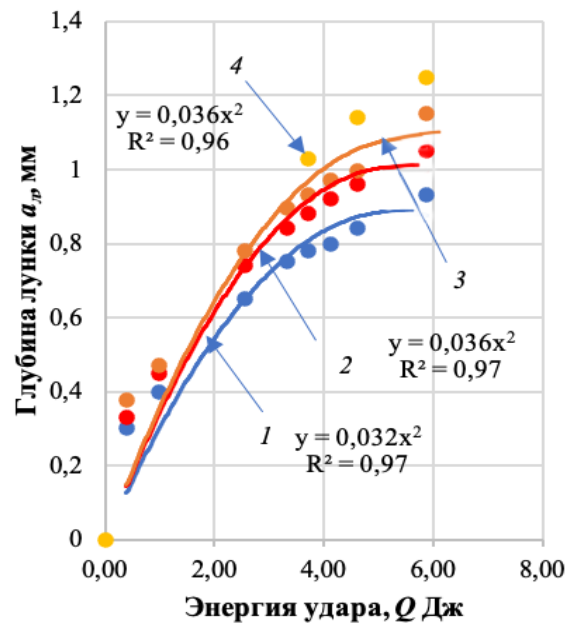
Число n ударных элементов в конструкции	Параметр	Значение α_l при величине Q , Дж							
		0,39	0,98	2,55	3,33	3,72	4,12	4,61	5,88
		Медь							
$n = 3$ (трехмассный)	α_l , мм	0,26	0,38	0,64	0,74	0,81	0,85	0,90	0,97
	$\sigma_{ал}$, мм	$\pm 0,04$	$\pm 0,10$	$\pm 0,09$	$\pm 0,07$	$\pm 0,04$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$	$\pm 0,04$
	$V_{деф}$, мм ³	0,62	1,30	3,58	4,73	5,62	6,16	6,87	7,91
	$M_{деф}$, мг	5,53	11,65	32,04	42,32	50,28	55,10	61,39	70,70
$n = 2$ (с пружиной)	α_l , мм	-	-	-	-	0,84	0,91	0,99	1,10
	$\sigma_{ал}$, мм	-	-	-	-	$\pm 0,04$	$\pm 0,06$	$\pm 0,05$	$\pm 0,04$
	$V_{деф}$, мм ³	-	-	-	-	53,88	62,69	73,46	89,45
	$M_{деф}$, мг	-	-	-	-	6,03	7,01	8,22	10,01
Алюминий									
$n = 1$ (одномассный)	α_l , мм	0,30	0,40	0,65	0,75	0,78	0,80	0,84	0,93
	$\sigma_{ал}$, мм	$\pm 0,02$	$\pm 0,04$	$\pm 0,06$	$\pm 0,03$	$\pm 0,24$	$\pm 0,10$	$\pm 0,15$	$\pm 0,07$
	$V_{деф}$, мм ³	0,82	1,44	3,69	4,86	5,23	5,49	6,03	7,31
	$M_{деф}$, мг	2,22	3,91	10,01	13,17	14,20	14,90	16,34	19,81
$n = 2$ (двухмассный)	α_l , мм	0,33	0,45	0,74	0,84	0,88	0,92	0,96	1,05
	$\sigma_{ал}$, мм	$\pm 0,04$	$\pm 0,03$	$\pm 0,02$	$\pm 0,012$	$\pm 0,03$	$\pm 0,04$	$\pm 0,05$	$\pm 0,06$
	$V_{деф}$, мм ³	0,99	1,81	4,73	6,03	6,58	7,16	7,76	9,17
	$M_{деф}$, мг	2,68	4,91	12,84	16,34	17,85	19,41	21,03	24,88
$n = 3$ (трехмассный)	α_l , мм	0,37	0,47	0,78	0,89	0,93	0,97	1,00	1,15
	$\sigma_{ал}$, мм	$\pm 0,02$	$\pm 0,09$	$\pm 0,10$	$\pm 0,012$	$\pm 0,01$	$\pm 0,04$	$\pm 0,07$	$\pm 0,08$
	$V_{деф}$, мм ³	1,28	1,97	5,23	6,80	7,34	7,92	8,34	10,87
	$M_{деф}$, мг	3,47	5,35	14,20	18,43	19,91	21,49	22,62	29,47
$n = 2$ (с пружиной)	α_l , мм	-	-	-	-	1,03	1,09	1,14	1,25
	$\sigma_{ал}$, мм	-	-	-	-	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,07$	$\pm 0,08$
	$V_{деф}$, мм ³	-	-	-	-	24,00	26,68	29,00	34,37
	$M_{деф}$, мг	-	-	-	-	8,85	9,84	10,69	12,67



а)



б)



в)

Рисунок 4.1 – Глубина лунок a_p при внедрении индентора в пластины песчаника (а), алюминия (б), меди (в) для инструмента одномассной (1) и двух- и трехмассной (2, 3) конструкции, а также с аккумулятором энергии (4), при различных кинетических энергиях

Как видно из таблицы 4.1 и рисунка 4.2 применение инструментов много-массовых конструкций, вне зависимости от природы разрушаемого или деформируемого материала – песчаник, алюминий, медь, – повышает глубину внедрения в

пластину по сравнению с ударником цельной конструкции. При нанесении ударов по пластинам песчаника многомассным инструментом без аккумулятора энергии глубина лунки внедрения увеличивается по сравнению с одномассовым на 15-18 % для песчаника с одной вставкой и на 18-25% с двумя вставками. Соответственно при деформировании алюминиевых пластин глубина лунки увеличивается на 12-14% с одной вставкой и на 18-24 % с двумя; при деформировании медных пластин глубина лунки увеличивается на 10-12 % с одной вставкой и на 13-16 % с двумя вставками. Как можно заметить, повышение глубины внедрения увеличивается при переходе от 2-х массовой (2) к 3-х массовой конструкции (3). (Как показали эксперименты, при применении инструмента 4-х массовой составной конструкции эффект повышения глубины внедрения не наблюдается и, по этой причине, результаты, полученные по внедрению такого инструмента, в данной работе не приводятся).

В случае применения многомассного инструмента с аккумулятором энергии (4) глубина внедрения в пластины анализируемых материалов по сравнению с ударником цельной конструкции (1) увеличивается на 47-50 % для песчаника, на 30-35 % для алюминия и на 20-27 % для меди. Полученное увеличение глубины лунок ($\sim 0,30$ мм) существенно превышает среднее квадратичное отклонение в определении их величины ($\sigma_l \pm 0,07$ мм).

На рисунке 4.2 приведены зависимости объема пластически деформированного металла от энергии удара. Как видно из графиков рисунков, зависимости $V_{\text{деф}} = f(Q)$ для обоих испытанных металлов близки к линейным со значениями коэффициентов пропорциональности $K_{\text{деф}}$ между $V_{\text{деф}}$ и Q , возрастающими при переходе от цельного к многомассного инструмента в практически одинаковое для обоих металлов число раз:

- в 1,27 (для 2-х массного), 1,43 раз (для 3-х массного) и 1,73 (для 2-х массного с аккумулятором энергии) для алюминия;

- в 1,20 (для 2-х массного) и 1,31 раз (для 3-х массного) 1,58 (для 2-х массного с аккумулятором энергии) для меди.

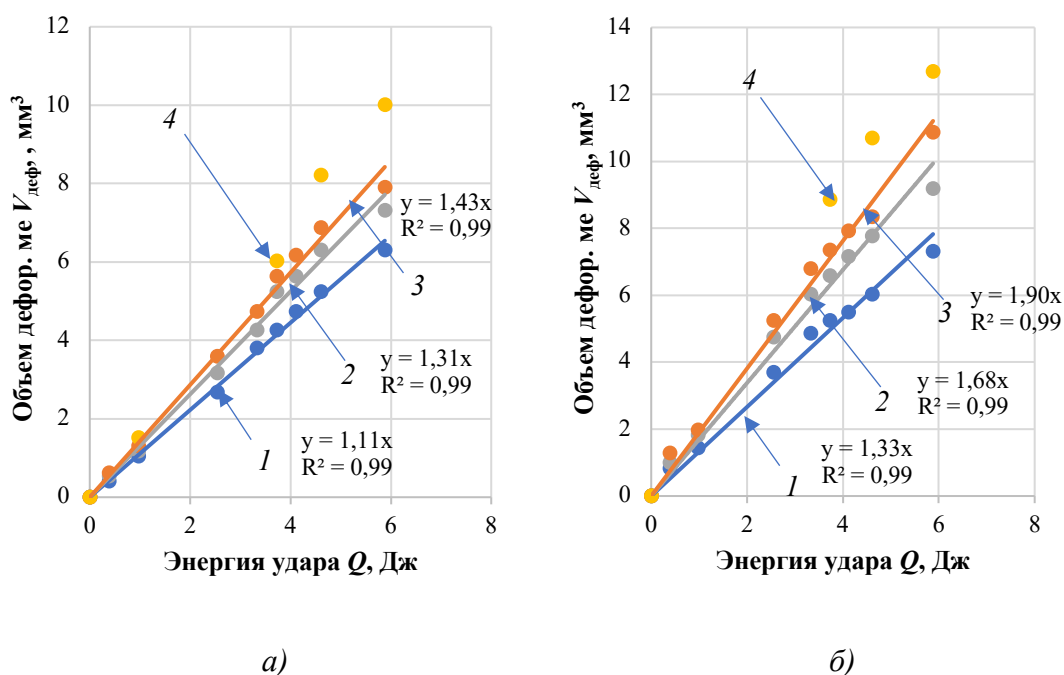


Рисунок 4.2 – Зависимость объема пластически деформированного металла на пластинах алюминия (а) и меди (б) для одномассного (1), составного инструмента с 2-я (2) и 3-мя (3) ударными элементами и инструмента с аккумулятором энергии (4).

Поскольку величина $V_{\text{деф}}$ характеризует полезную работу, затраченную на деформирование металла, считали, что обнаруженное увеличение $K_{\text{деф}}$ ($V_{\text{деф}}$) меди и алюминия является показателем такого же увеличения КПЭ удара.

При анализе осциллограмм установлено, что при переходе от одномассного к многомассному инструменту вместо одного максимума N_m на осциллограммах появляются два или три максимума, меньшей интенсивности, как отражающие появление в ударном импульсе нескольких дополнительных единичных импульсов. При этом продолжительности удара $t_{\text{уд}}$ для каждого вида инструмента оказалась близкими для всех материалов, мало зависящими от энергии удара и большими в случае применения составных ударников: $\sim 0,18$ мс для цельного одномассного инструмента; $\sim 0,25$ для составного с двумя массами ($n = 2$) и $\sim 0,32$ мс для составного с тремя массами ($n = 3$), т.е. возрастающими в 1,4 и 1,8 раз [14]. В случае применения модельного инструмента с аккумулятором энергии также увеличивается число ударов и их продолжительность.

Типичный вид осциллограмм усилий, возникающих при внедрении инструмента в пластины анализируемых материалов, представлен на рисунке 4.3.

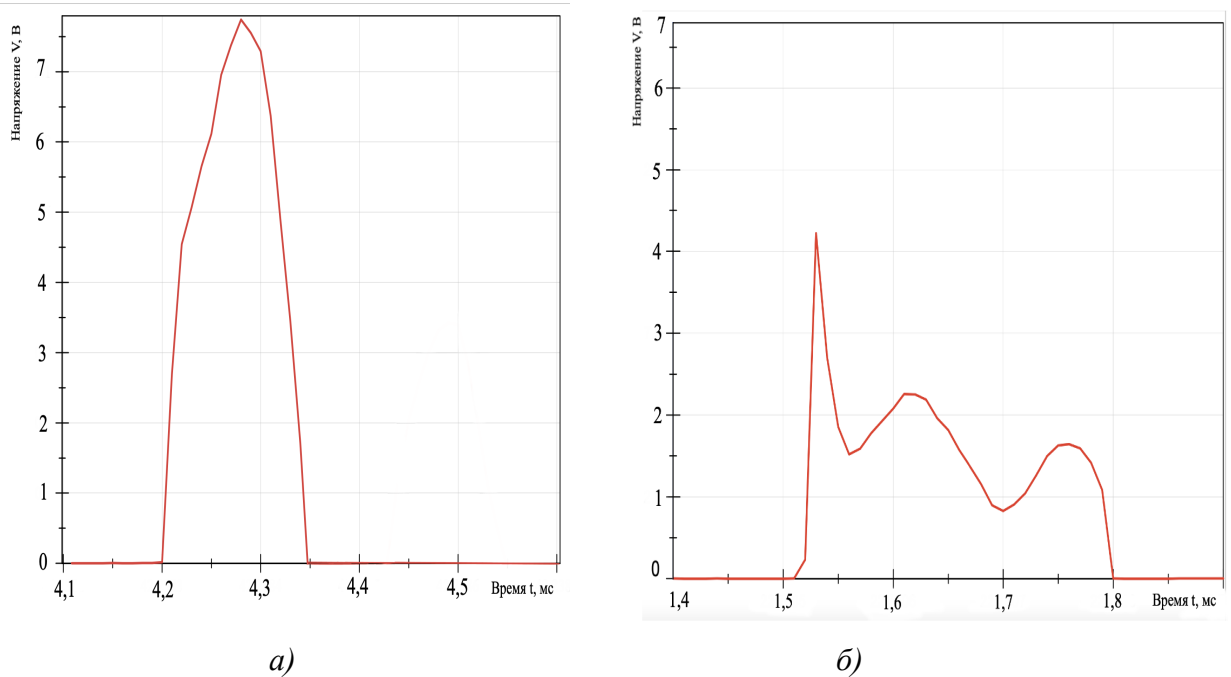


Рисунок 4.3 – Типичный вид осциллограмм усилий, возникающих при внедрении в пластину песчаника модельного инструмента одномассной *а)* и многомассной *б)* конструкции.

Можно отметить, что зафиксированные значения величин $t_{уд}$ для песчаника ($\sim 0,18$ мс) близки к установленным в работе [75] (0,1 – 0,6 мс из рисунка) для ударного внедрения штампа в мрамор, как материала ($\sigma_{сж} = 63,5$ МПа), имеющего прочность, близкую к прочности анализируемого песчаника.

Говоря о результатах анализа полученных осциллограмм, необходимо отметить, что значения усилий, фиксируемые в этих же экспериментах, оказались существенно отличающимися друг от друга и, по этой причине, в работе не приводятся. Это обстоятельство может найти объяснение в возможном нарушении соосности инструмента и стенок направляющей трубы, приводящем к соударениям инструмента со стенкой с потерей части энергии удара.

Как показал осмотр образцов, разрушенных в результате ударного воздействия модельного инструмента во второй серии экспериментов, подавляющая их часть раскалывается на 2-а примерно равных по размерам фрагмента с площадью скола близкой для всех образцов данного размера.

Типичный вид исходных образцов песчаника показан на рисунке 4.4 (а), подвергнутого раскалыванию показан на рисунке 4.4 (б, в).



а)



б)



в)

Рисунок 4.4 – Вид образцов песчаника, расколотых в результате ударного воздействия модельного инструмента

Результаты следующей серии экспериментов иллюстрирует рисунок 4.5.

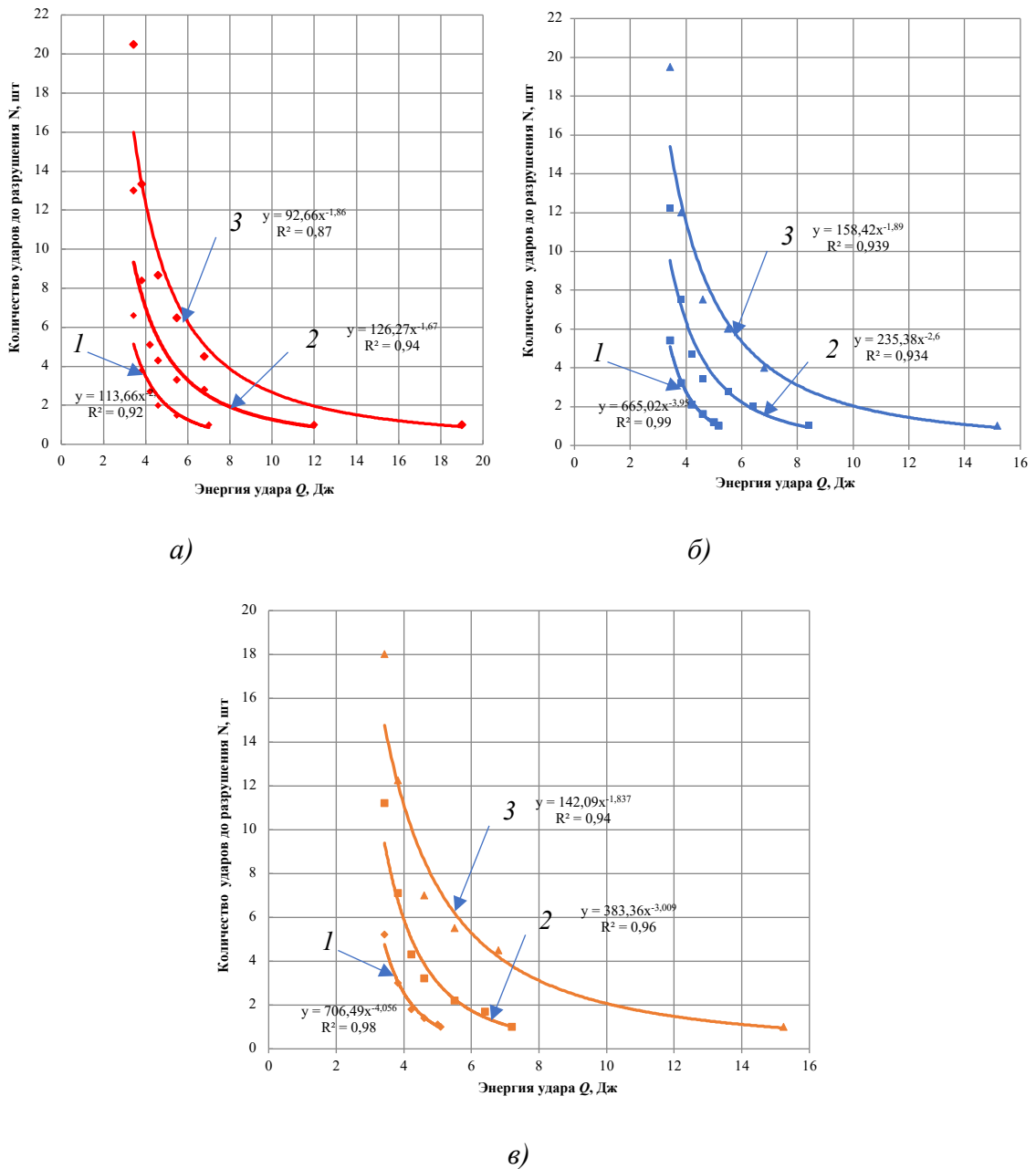


Рисунок 4.5 – Зависимость удельной энергии процесса разрушения пластин песчаника 10x10x10 мм (1), 15x15x15 мм (2) и 18x18x18 мм (3) от энергии единичного удара, наносимого цельным (а) и составным инструментом с 2-я (б), 3-мя (в) массами.

Как следует из вида кривых рисунка, с увеличением энергии единичного удара Q_i количество ударов N , которое необходимо нанести в среднюю точку поверхности образца песчаника для его разрушения, убывает по степенной зависимости до конечного значения, соответствующего минимальной энергии ударного

воздействия Q_p , требующейся для разрушения образца за один удар. При этом оказалось, что частное от деления Q_p на площадь скола, принимаемое за удельную поверхностную энергию разрушения $Q_{уд}$, оказалось весьма близким для всех анализируемых размеров образца (таблица 4.2), что позволило принять его за постоянную величину при раскалывании песчаника анализируемой крепости данным инструментом: ~ 55 кДж/м² для цельного инструмента; ~ 45 кДж/м² для составного инструмента с одной вставкой и ~ 40 кДж/м² для двух вставок, ~ 35 кДж/м² с аккумулятором энергии т.е. убывающими в 1,22, 1,38 и 1,57 раз соответственно.

Таблица 4.2 – Значения Q_p и удельной поверхностной энергии разрушения $Q_{уд}$, образцов песчаника при использовании инструмента одно- и многомассной конструкции

Число n ударных элементов в конструкции	Размер разрушаемого образца	Q_p , Дж	$Q_{уд}$, кДж/м ²
$n = 1$ (цельный инструмент)	10x10x10 мм	7,0	60
	15x15x15 мм	12,2	55
	18x18x18 мм	19,1	50
$n = 2$ (1 вставка)	10x10x10 мм	5,2	55
	15x15x15 мм	8,4	40
	18x18x18 мм	15,2	45
$n = 3$ (2 вставки)	10x10x10 мм	5,1	45
	15x15x15 мм	7,2	35
	18x18x18 мм	15,0	40
$n=2$ (с аккумулятором энергии)	10x10x10 мм	4,5	33
	15x15x15 мм	6,1	32
	18x18x18 мм	12,0	38

Необходимо отметить, что установленные величины $Q_{уд}$ оказались весьма близкими к значениям этого параметра по литературным данным, например, 30 - 70 кДж/м², зарегистрированным в экспериментах [52] по разрушению песчаника близкой крепости взрывным способом.

4.2 Подтверждение правомочности математической модели процесса ударного внедрения инструмента в анализируемые материалы

Правомочность описания нагрузочной характеристики ударного внедрения модельного инструмента в пластины материалов линейными функциями вида $N_1 = g_{\Sigma} \alpha$, $N_2 = g_2 \alpha$ с использованием уравнений (3.10), и значений жесткостей g_{Σ} , g_2 , установленных в квазистатических условиях, подтверждали экспериментальными данными по глубинам лунок $\alpha_{л}$, остающихся на пластинах анализируемых материалов после удара модельным инструментом.

Видно, что в случае справедливости описания процесса ударного внедрения инструмента в анализируемые объекты линейными уравнениями (3.10), между глубиной лунок $\alpha_{л}$, регистрируемых в экспериментах в динамических условиях и представляющих собой остаточную глубину внедрения α_1 , и энергией удара Q в степени 0,5 должна наблюдаться линейная зависимость. При этом коэффициенты пропорциональности $K_{расч}$, рассчитанные с использованием установленных в квазистатических условиях значений g_{Σ} , g_2 , должны быть близки к их значениям $K_{эсп}$, установленным в экспериментах при ударе.

Необходимо отметить, что установленные значения КПЭ удара в настоящих экспериментах оказались близки к значениям, описанным в литературе, например, к 0,54 [73] для внедрения в песчаник лезвия долотчатой головки бура при близкой скорости удара и массы ударного инструмента ($v \sim 3,3$ м/с и 1,95 кг по сравнению с 2,7 м/с и 2, кг в настоящих экспериментах) и $\sim 0,70$ [43] для пластической деформации металлов на молотах.

На рисунке 4.6 приведены экспериментальные данные таблицы 4.1 для внедрения цельного модельного инструмента в песчаник и металлические материалы, представленные в координатах $a_{л} - \sqrt{Q}$.

Из рисунка 4.6 видно, что параметры $a_{л}$, $Q^{0,5}$ для всех материалов, действительно, находятся между собой в линейной зависимости, а расчетные значения $K_{расч}$ отличаются от экспериментально установленных $K_{эксп}$, не больше, чем на 7%, что подтверждает правомочность предложенной математической модели.

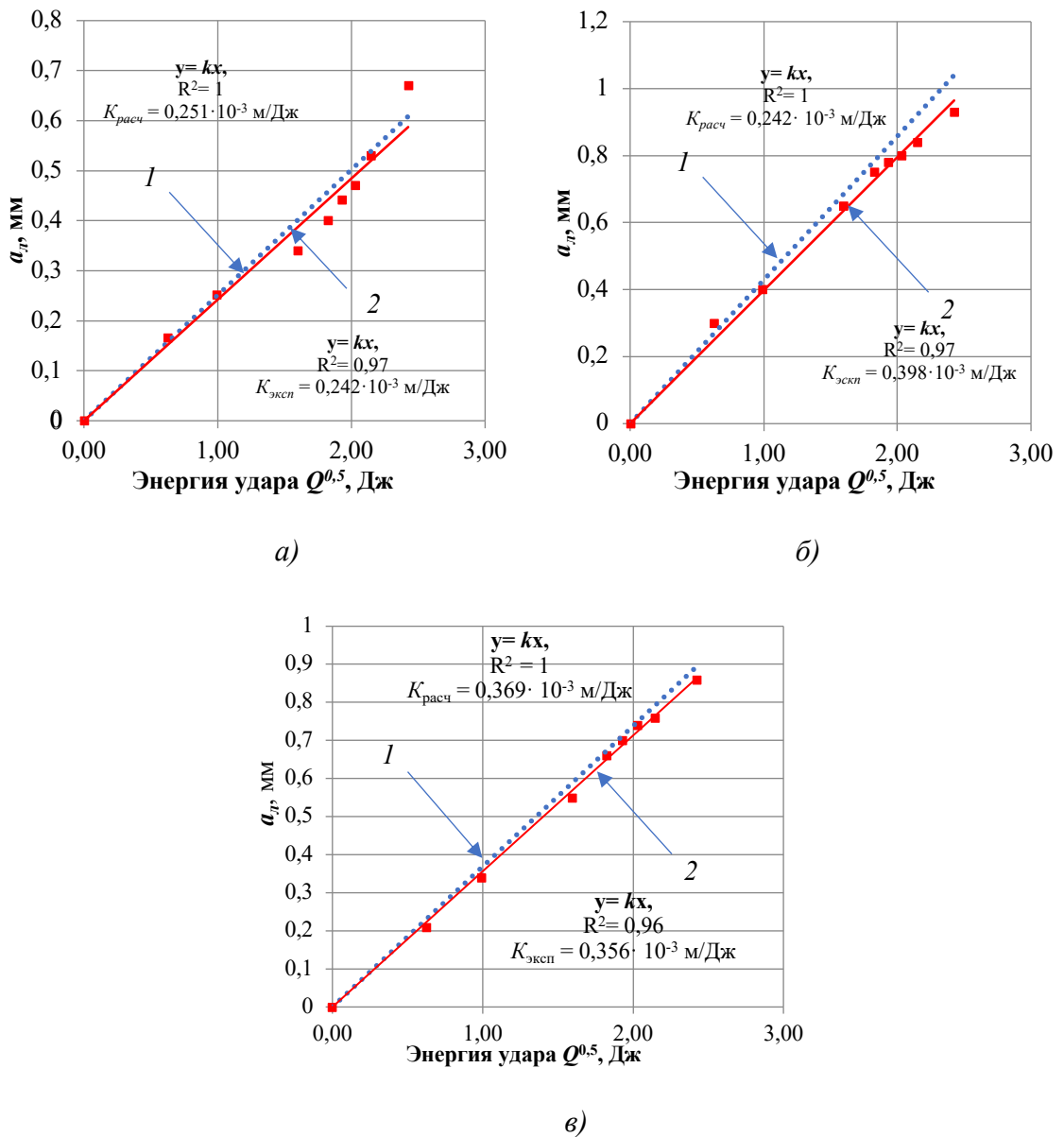


Рисунок 4.6 – Экспериментальные зависимости от энергии удара Q глубины лунок $a_{л}$, образовавшихся в результате ударного воздействия модельного инструмента цельной конструкции на пластины песчаника (а), алюминия (б) и меди (в) (пунктир - расчетные кривые)

4.3 Оценка влияния составной конструкции инструмента на КПЭ удара

Исходя из появления дополнительных максимумов на осциллограммах (рисунок 4.5) и факта увеличения времени удара (п. 4.1), заключали, что в случае использования инструмента составной конструкции каждый ее n_i ударный элемент наносит удар с некоторой задержкой времени относительно предыдущего, в результате чего его воздействие, замедляя отскок предыдущего элемента, увеличивает время взаимодействия инструмента с разрушаемым объектом и КПЭ удара.

Такое воздействие эквивалентно увеличению жесткости g_2 системы на стадии разгрузки до уровня g_2^* , при которой достигается остаточное внедрение, регистрируемое для составного инструмента в экспериментах.

Расчет остаточной жесткости g_2^* составного модельного инструмента проводили по уравнению (3.10) с использованием значения коэффициента пропорциональности K^* , полученного из вида зависимости $\alpha_{л} - \sqrt{Q}$ для составного инструмента

В результате расчета установлено, что параметры $\alpha_{л}$, $Q^{0,5}$ для всех материалов для составного инструмента, как и для одномассного, действительно, находятся между собой в линейной зависимости (рисунок 4.7), что подтверждает правомочность математической модели, предложенной для описания многомассного инструмента в породу и металлы.

При этом, значение коэффициента пропорциональности K^* между $\alpha_{л}$ и $Q^{0,5}$ возрастает с увеличением ударных элементов в составном инструменте и равно:

- $0,26 \cdot 10^{-3}$ м/Дж^{0,5} (для $n = 2$); $0,29 \cdot 10^{-3}$ м/Дж^{0,5} (для $n = 3$) и $0,35 \cdot 10^{-3}$ м/Дж^{0,5} (для $n = 2$ с аккумулятором энергии) для песчаника;

- $0,46 \cdot 10^{-3}$ м/Дж^{0,5} (для $n = 2$); $0,48 \cdot 10^{-3}$ м/Дж^{0,5} (для $n = 3$) и $0,45 \cdot 10^{-3}$ м/Дж^{0,5} (для $n = 2$ с аккумулятором энергии) для алюминия;

- $0,40 \cdot 10^{-3}$ м/Дж^{0,5} (для $n = 2$); $0,42 \cdot 10^{-3}$ м/Дж^{0,5} (для $n = 3$) и $0,53 \cdot 10^{-3}$ м/Дж^{0,5} (для $n = 2$ с аккумулятором энергии) для меди.

На рисунке 4.7 приведены экспериментальные данные таблицы 4.1 для внедрения всех видов модельного инструмента в песчаник и металлические материалы, представленные в координатах $a_{л} - \sqrt{Q}$.

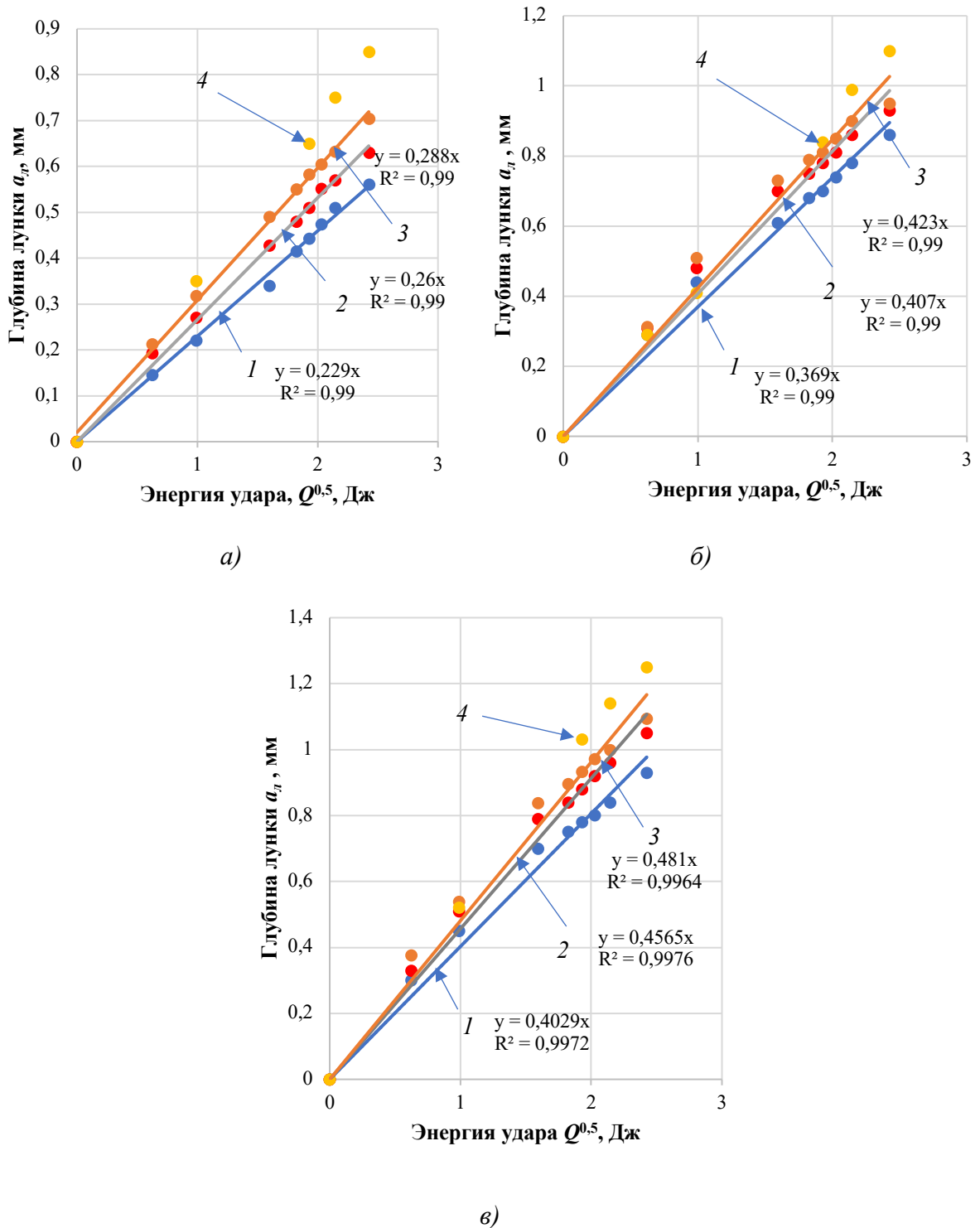


Рисунок 4.7 – Зависимость от энергии удара Q глубины лунок $a_{л}$, образовавшихся в результате ударного воздействия модельного одномассного инструмента (1) и многомассного с 1-ой (2) и 2-мя (3) вставками на пластины песчаника (а), меди (б) и алюминия (в)

Подставляя в (3.13) экспериментально установленные значения K^* получили значения g_2^* :

- $2,8 \cdot 10^7$ Н/м (для $n = 2$); $3,5 \cdot 10^7$ Н/м для ($n = 3$) и $5,9 \cdot 10^7$ Н/м (для $n = 2$ с аккумулятором энергии) для песчаника,

- $1,42 \cdot 10^7$ Н/м (для $n = 2$); $1,62 \cdot 10^7$ Н/м для ($n = 3$) и $2,22 \cdot 10^7$ Н/м (для $n = 2$ с аккумулятором энергии) для алюминия,

- $1,69 \cdot 10^7$ Н/м (для $n = 2$); $1,84 \cdot 10^7$ Н/м для ($n = 3$) и $2,17 \cdot 10^7$ Н/м (для $n = 2$ с аккумулятором энергии) для меди

откуда, в соответствии с (3.12), значения КПЭ удара η^* равны:

- 0,62 (для $n=2$); 0,68 (для $n=3$) и 0,81 (для $n=2$ с аккумулятором энергии) для песчаника;

- 0,68 (для $n=2$); 0,72 (для $n=3$) и 0,79 (для $n=2$ с аккумулятором энергии) для алюминия;

- 0,67 (для $n=2$); 0,70 (для $n=3$) и 0,74 (для $n=2$ с аккумулятором энергии) для меди.

Таким образом, переход от одномассного инструмента к многомассному позволяет увеличить КПЭ удара до 1,54 раз для песчаника, 1,29 для меди и 1,36 для алюминия, т.е. в близкое количество раз, как и рассчитанное увеличение КПЭ для металлов, исходя из величины их $V_{деф}$ (в 1,3 и 1,4 раза рисунок 4.2).

Полученное возрастание К.П.Э. удара при переходе к инструменту составной конструкции, как оказалось, находит своё отражение и в уменьшении удельной энергии разрушения образцов песчаника с 55 до 41 кДж/м², т.е. в 1,3 раза.

При этом истинные значения удельной поверхностной энергии, которую инструмент должен передать породе для ее разрушения, $Q_{уд.ист} = Q_{уд}\eta$ для всех видов инструмента и площади сечения разрушаемого фрагмента породы практически одинаковы и составляют величину $\sim 27 - 29$ кДж/м², практически совпадающую с удельной поверхностной энергией разрушения фрагментов песчаника взрывом (26,3 кДж/м²,) экспериментально установленной в работе [52].

4.4 Соотношение работы разрушения пластин породы в статических и динамических условиях

После подтвержденного выше вывода о близости процессов контактного разрушения породы в статических и динамических условиях (при скоростях ударного взаимодействия, имеющих место при работе инструмента гравитационного действия) представлял интерес сравнить при этих условиях параметры процесса разрушения (раскалывания) фрагментов (рисунок 4.8).



Рисунок 4.8 – Вид фрагментов после раскалывания пластин в квазистатических условиях

В таблице 4.3 приведены экспериментально установленные в квазистатических условиях значения глубины внедрения α_p индентора в пластину и усилия N_p , соответствующие моменту раскалывания пластин песчаника толщиной 10 и 15 мм, а также работы A_p их раскалывания, рассчитанной, как $0,5 \alpha_p N_p$, и времени воздействия на пластину t_b , рассчитанной, как $t_b = \alpha_p v$, где v - скорость перемещения траверса машины ($1,3 \cdot 10^{-5}$ м/с). Там же приведены установленные экспериментально при ударе значения энергии разрушения Q_p и времени t_b для аналогич-

ных пластин, а также параметры α_1 и N_m , рассчитанные [11,12] по величинам $Q = Q_p$, $g_\Sigma = 1,10 \cdot 10^7$ Н/м.

Таблица 4.3 – Параметры раскалывания пластин песчаника в квазистатических условиях и при ударном воздействии ($v \sim 2,2$ м/с)

Условия раскалывания	Толщина пластины, мм	α_p (α_m), мм	N_p (N_m), кН	Работа A_p (энергия Q_p), Дж	$t_{\text{возд}}$, с
Квазистатическое	10	0,24	2,7	0,33	~ 18
	15	0,30	3,2	0,49	
Динамическое	10	0,67	7,4	4,6	~ 0,18 10^{-3}
	15	0,70	7,7	5,0	

Как показывает сравнение параметров таблицы, энергия Q_p , требующаяся для раскалывания пластин песчаника при ударе, более чем в 10 раз превышает работу разрушения A_p аналогичных пластин в квазистатических условиях. Такой результат сравнения находится в соответствии с литературными данными [29, 30] и объясняется тем обстоятельством, что при переходе к динамическому воздействию сопротивление породы разрушению возрастает.

В тоже время, полученные сравнительные результаты по прилагаемым разрушающим усилиям – при ударе они примерно в 2 раза больше, чем в статических условиях – соответствуют данным [28], но расходятся с данными [27, 31, 46], по которым они существенно не различаются. Как заключают авторы [19, 25, 29], установленное в [31] отсутствие существенных изменений величин усилий при статическом и динамическом нагружении с малыми скоростями вдавливания объясняется малыми абсолютными значениями этих изменений, перекрываемых колебаниями значений изменений усилий в пределах одной скорости испытания. В то же время, если принять, что усилие, требующееся для разрушения породы, одинаково для статических и динамических условий, становится непонятным, за

счет чего так существенно различается работа разрушения (в 10 раз) для этих условий. В случае же принятия существования разницы в величине этих усилий, а также обнаруженного в данной работе различия в глубинах внедрения индентора, необходимых для разрушения пластины – для динамических условий они примерно в 2 раза больше, чем в статических – указанное различие в величинах работы (энергии) разрушения становится объяснимым и рассчитываемым по величинам указанных параметров.

Таким образом, результаты исследования показывают, что с энергетической точки зрения разрушение породы при сравнительно медленном воздействии на нее породоразрушающего инструмента является более предпочтительным по сравнению с ударным воздействием. В то же время, преимуществом применения ударных систем является возможность получения усилий на выходе из системы в сотни и тысячи раз больших, чем приложены на ее входе [22], что и обеспечивает эффективное разрушение породы машинами ударного действия. В этой связи можно заключить, что при разрушении кусков породы сравнительно малого размера и невысокой крепости, когда не требуется приложения высоких усилий, целесообразно использовать устройства, работающие в квазистатических условиях, например, щековые дробилки. В то же время, для больших кусков крепких пород (негабаритов), для разрушения которых требуется приложения значительных усилий, предпочтительно использовать устройства ударного действия, например, гидромолоты.

4.5 Выводы по главе 4

При проведении экспериментов по ударному внедрению в пластины песчаника, меди и алюминия одно- и многомассного инструментов обнаружено, что применение многомассного инструмента повышает глубину внедрения в среду, возрастающую при переходе от 2-х к 3-х массовой конструкции (до 25 % для песчаника и алюминия и до 16 % для меди) и применении аккумулятора энергии (до

50 % для песчаника, 35 % для алюминия и 27 % для меди). При этом, полученное увеличение глубины внедрения ($\sim 0,30$ мм) существенно превышает среднее квадратичное отклонение в определении их величины ($\sigma_{\text{отл}} \pm 0,07$ мм).

2. Установлено, что переход от одно- к многомассному инструменту приводит к увеличению объема деформированного металла (в 1,27 раз для 2-х, 1,43 раз для 3-х массного и 1,73 раз для инструмента с аккумулятором энергии) и продолжительности ударного воздействия (от 0,15 до 0,32 мс).

3. Показано, что разница между глубинами внедрения модельного инструмента в породе, рассчитанными по параметрам жесткости системы «инструмент - среда» для квазистатических условий и установленными экспериментально, не превышает 7%, что подтверждает правомочность предложенной математической модели.

4. В предположении, что эффект от применения многомассного инструмента может быть учтен увеличением жесткости системы на стадии разгрузки, рассчитаны коэффициенты передачи энергии удара при разрушении и пластической деформации анализируемых материалов, которые оказались равными 0,53 для песчаника, 0,61 для алюминия, 0,58 для меди для одномассного инструмента и 0,68, 0,76 для многомассного, т.е. в 1,54; 1,29 и 1,36 раз больше в последнем случае.

5. Обнаружено, что частное от деления энергии раскалывания Q_p на площадь скола, принимаемое за удельную поверхностную энергию раскалывания $Q_{\text{уд}}$, оказывается весьма близким для всех анализируемых размеров образца породы, что позволило принять его за постоянную величину при раскалывании песчаника анализируемой крепости данным инструментом: ~ 55 кДж/м² для цельного инструмента; ~ 45 кДж/м² для составного инструмента с одной вставкой и ~ 40 кДж/м² для двух вставок, ~ 35 кДж/м² с аккумулятором энергии т.е. убывающими в 1,22, 1,38 и 1,57 раз соответственно.

ГЛАВА 5 ОБОСНОВАНИЕ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ УСТРОЙСТВА НЕГАБАРИТОВ УДАРОМ УВЕЛИЧЕННОЙ ЭНЕРГИИ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

5.1 Установление рациональных параметров конструктивных элементов многомассного устройства

5.1.1 Определение рационального соотношения между массами корпуса и вставки многомассного устройства

Как следует из опыта эксплуатации машин ударного разрушения [64], наибольшая эффективность разрушения негабаритов достигается при применении ударных систем, у которых массы ударника и ударного инструмента имеют близкие значения. Логично было предположить, что и в случае многомассного устройства, в которой при втором ударе вставка выполняет функции ударника, наносящего удар по днищу корпуса с передачей импульса на породу, эффективность удара так же будет максимальной в случае применения корпуса и вставки одинаковой массы. Данное предположение проверялось на ударном модельном инструменте, у которого за счет изменения толщины стенки изменялось соотношение между массой корпуса M_k и вставки $M_{вст}$ при сохранении массы всего инструмента постоянной (2 кг). Нанося по пластинам песчаника, меди и алюминиевого сплава удары ударником с различным соотношением масс M_k и $M_{вст}$, определялись зависимости глубины лунки и, рассчитанной по ее величине от соотношения $M_k/M_{вст}$. Результаты экспериментов представлены в таблице 5.1 и, в качестве примера, на рисунке 5.1.

Таблица 5.1 – Глубина лунок внедрения при ударном воздействии на пластины породы и металлических материалов составного модельного инструмента с различным соотношением $M_k/M_{вст}$ при энергии удара $Q = 4$ Дж.

Соотношение $M_k/M_{вст}$	Песчаник	Медь	Алюминий
	α_l , мм	α_l , мм	α_l , мм
0,3	$0,47 \pm 0,03$	$0,7 \pm 0,01$	$0,78 \pm 0,007$
0,7	$0,48 \pm 0,04$	$0,73 \pm 0,008$	$0,80 \pm 0,004$

Продолжение таблицы 5.1

1,0	$0,56 \pm 0,03$	$0,79 \pm 0,005$	$0,82 \pm 0,003$
1,2	$0,49 \pm 0,04$	$0,77 \pm 0,006$	$0,80 \pm 0,009$

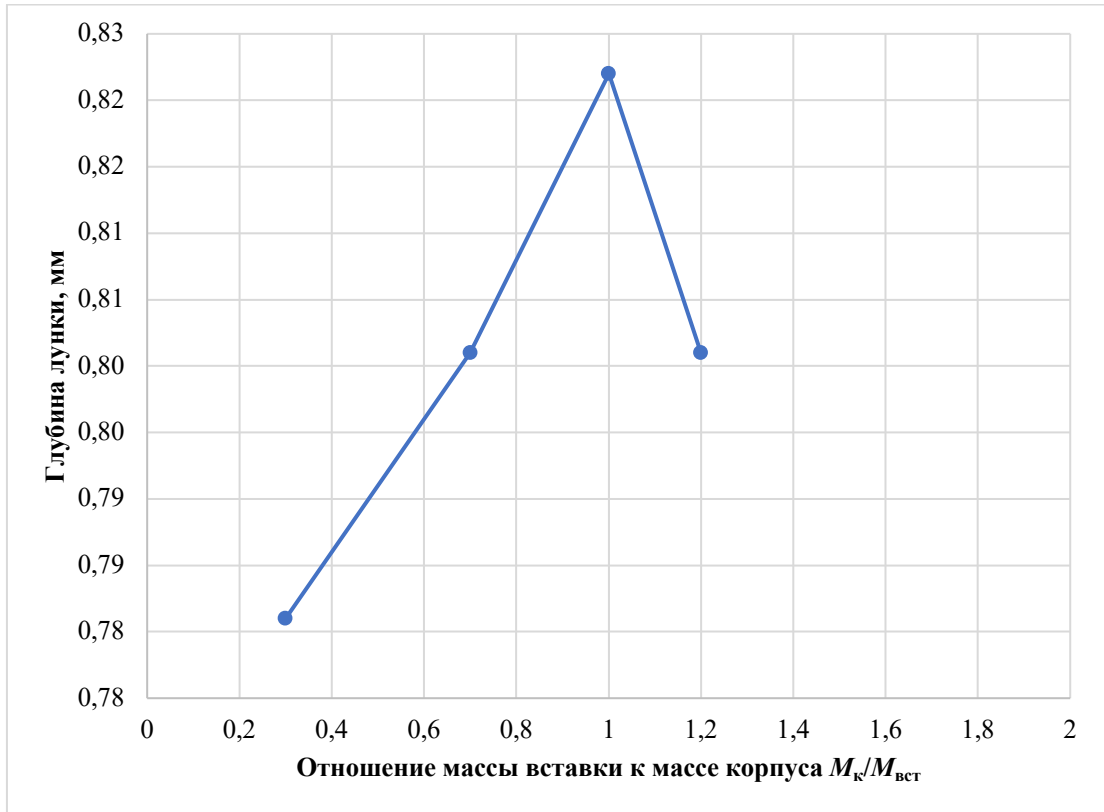


Рисунок 5.1 – Зависимость глубины лунок $\alpha_{л}$ от соотношения $M_k/M_{вст}$ модельного инструмента при его ударном воздействии на пластину алюминия

Как следует из полученных экспериментальных данных, вне зависимости от анализируемого материала – песчаник, медь, алюминиевый сплав – максимальная эффективность ударного воздействия, оцениваемая по глубине внедрения и доле энергии удара, затрачиваемой непосредственно на внедрение в материал, достигается при использовании составного ударного инструмента с соотношением масс вставки и корпуса близком к единице. Исходя из выполнения условий подобия между модельным инструментом и натурной клин-бабой (п.2.2.2), считали, что и в условиях ударного внедрения многомассного устройства в породу указанное соотношение $M_k/M_{вст} \approx 1$ между вставкой и его корпусом так же будет наиболее рациональным.

5.1.2 Определение рационального угла заострения вставки многомас- сного устройства составной конструкции

Рациональный угол заострения γ многомассного устройства определялся на составном модельном инструменте с установленным соотношением $M_K/M_{вст} \approx 1$, у которого вставка изготавливалась с углом заострения γ , изменяющимся от 50 до 135° , и заканчивалась для всех углов γ плоской площадкой притупления радиусом $r = 3$ мм. Как и в случае определения рационального отношения масс составных элементов инструмента, рациональный угол γ определялся при ударном воздействии составного модельного инструмента на пластины песчаника, меди и алюминиевого сплава.

Результаты экспериментов представлены в таблице 5.2 и, в качестве примера, на рисунке 5.2.

Таблица 5.2 –Глубина лунок внедрения при ударном воздействии на пластины породы и металлических материалов составного модельного инструмента с различным углом заострения γ вставки при энергии удара $Q = 4$ Дж.

Значение γ , градус	Песчаник	Медь	Алюминий
	α_l , мм	α_l , мм	α_l , мм
135	0,55	0,75	0,79
90	0,57	0,77	0,81
60	0,50	0,79	0,824
50	Изгиб острия инструмента		

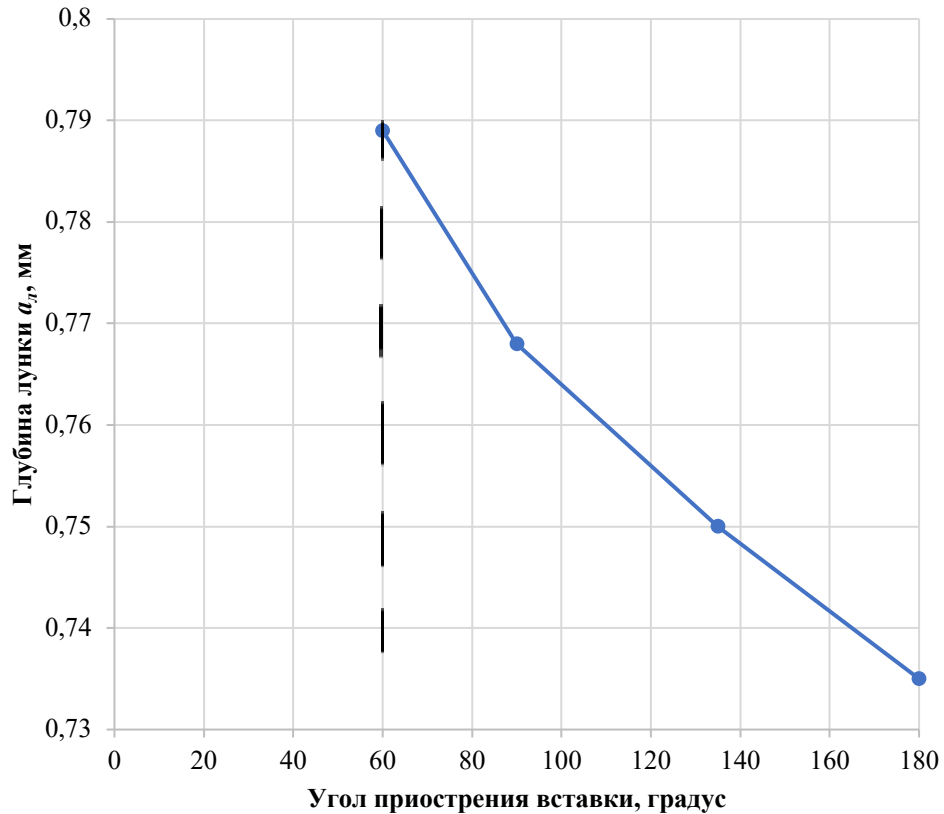


Рисунок 5.2 – Зависимость глубины лунок a_l от угла заострения γ вставки модельного инструмента при его ударном воздействии на пластину меди (пунктир – изгиб острия)

Как следует из результатов эксперимента (таблица 5.2, рисунок 5.2), эффективность удара возрастает с уменьшением угла заострения инструмента и достигает максимума при угле $\sim 60^\circ$. При больших углах заостренная часть инструмента претерпевает изгиб из-за потери устойчивости системы. В этой связи, за рациональный угол заострения вставки многомассного устройства принимался угол в 60° .

5.1.3 Основные конструкционные элементы предлагаемой конструкции многомассного устройства, выбор материалов и предложения по способу их изготовления

Исходя из конструкций существующей клин-бабы и модельного многомассного устройства, а также функционального назначения бабы и каждого его эле-

мента, заключали, что предлагаемая конструкция многомассного устройства должна состоять из следующих основных элементов:

- корпуса в виде полого цилиндра с донной частью с конусообразным заострением;
- свободно перемещающихся в корпусе цилиндрических одной или двух вставок с конусообразным заострением и проушинами, необходимыми для загрузки вставок в корпус;
- крышки с проушиной, необходимой для закрепления троса от подъемного механизма;
- аккумулятора энергии (для устройства с аккумулятором) и механизма для его зарядки и пуска в действие.

Поскольку, изготовление массивного (~ 1000 кг) корпуса такой конфигурации токарной обработкой из отливки представляет собой достаточно сложную задачу и требует использования специализированного оборудования, наиболее целесообразно изготавливать корпус из трубы нужного сортамента с приваркой к трубе донной части, получаемой литьем. Вставку и крышку, логично, изготавливать из ковальной заготовки и листового проката, соответственно, с их токарной обработкой.

Для изготовления элементов клин-бабы по такой технологии, с учетом назначения инструмента, их материал должен обладать следующими свойствами:

- обладать высокой пластичностью, позволяющей выпускать заготовки из него в виде трубы, проката и кованых заготовок;
- отличаться высокой вязкостью, в том числе и при пониженных температурах, что необходимо для стойкости материала к воздействию ударных нагрузок при эксплуатации клин-бабы в различных климатических условиях;
- обладать достаточными литейными свойствами;
- хорошо обрабатываться резанием;

- обладать высокой свариваемостью, для чего эквивалент углерода C_e материала не должен превышать 0,25;
- иметь минимальную цену.

Перечисленным комплексом свойств обладают низкоуглеродистые низколегированные стали, например сталь 09Г2С, выпускаемая в виде проката и сварных труб широкого сортамента, свариваемая без ограничений различными видами сварки, в том числе и ручной-электродуговой, и нашедшая широкое применение, как материал магистральных газопроводов, работающих при температурах окружающей среды до -70 °С, что и определило выбор этой стали в качестве материала для изготовления элементов составной клин-бабы.

Основные механические свойства стали представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Механические свойства стали 09Г2С [65]

Состояние поставки	Сечение	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	КСУ, Дж/см ² при температуре °С		
					+20	-40	-70
Листы и полосы	до 160 мм	265	430	21	59	34	29
Листы после закалки, отпуска	до 60 мм	315	450	21	-	49	29

В то же время, было отмечено, что при ударе вставки по донной части корпуса бабы составной конструкции в месте контакта способны развиваться значительные контактные напряжения, под действием которых деформация материала в месте контакта приобретет пластический характер, в результате чего поверхность торца начнет увеличиваться, а в некоторых случаях от центра давления начнут распространяться осевые трещины, приводящие к поломке торцевой части ударного элемента [56]. Для исключения подобной ситуации материал корпуса и вставки должен иметь предел текучести, превышающий возможные напряжения σ_k , возникающие при ударе в месте их контакта, расчет которых приведен ниже

Для случая удара вставки с плоской площадкой притупления радиусом $R_{вст}$ по плоскому днищу корпуса величина контактного напряжения равна (5.1):

$$\sigma_k = N / \pi R^2, \quad (5.1)$$

где N – сила удара.

Исходя из условия выполнения геометрического подобия между вставками клин-бабы и модельного составного инструмента, с учетом равенства углов заострения вставок, установление радиуса $R_{вст}$ площадки притупления вставки составной клин-бабы производилось по формуле (5.2):

$$R_{вст} = r_{вст} \frac{R}{r}, \quad (5.2)$$

где $r_{вст}$ – радиус площадки притупления вставки модельного инструмента (1,8 мм); $R_{ц}$, $r_{ц}$ – радиусы цилиндрической части вставок клин-бабы (360 мм) и модельного инструмента (14,5 мм), с получением величины $R_{вст} = 45$ мм и высоты конусной части вставки 200 мм.

С учетом предлагаемой математической модели разрушения породы ударным инструментом (п. 3) достигаемое при ударе максимальное усилие N_m определяется энергией удара A_0 и контактной жесткостью системы g "клин-баба - поверхность негабарита" в соответствие с зависимостью (5.1) [47], рассчитывается (5.3):

$$N_m = (2gA_0)^{0,5} \quad (5.3)$$

Величина g системы, как функция от радиуса площадки контакта, рассчитывалась по формуле (5.4) из [60] (5.4):

$$g_0 = 4/3 E R / (1 - \mu^2), \quad (5.4)$$

в которой произведение постоянных $4E/3(1-\mu^2)$ принималось равным, установленному для анализируемого песчаника в модельных испытаниях: для $g_{ст} = 1,1 \cdot 10^7$ Н/м², радиуса площадки притупления корпуса модельного инструмента $r_k = 3,0$ мм $4E/3(1-\mu^2) = 0,37 \cdot 10^{10}$ Н/м². При радиусе площадки притупления корпуса клин-бабы $R_k = 90$ мм значение $g = g_0$ составило $33,3 \cdot 10^7$ Н/м. Отсюда, значение N_m для энергии бабы $A_0 = Q = 176$ кДж оказалось равным $10,8 \cdot 10^6$ Н.

После подстановки значений $R_{вст} = 45$ мм, $N = N_m = 10,8 \cdot 10^6$ Н в (5.1) получаемое напряжение σ_k на площадке контакта вставки и корпуса бабы оказалось близким к величине ~ 1700 МПа, существенно превышающей предел текучести предлагаемого материала корпуса и вставки – стали (265 - 315 МПа).

С другой стороны, при всех своих достоинствах сталь 09Г2С обладает еще одним недостатком, а именно, – не отличается высокой стойкостью к абразивному изнашиванию. Этот недостаток может проявиться при работе клин-бабы в виде интенсивного изнашивания инструмента с потерей им своих эксплуатационных свойств.

В этой связи, заостренные части корпуса и вставки бабы, а также поверхностный фрагмент донной части ее корпуса предлагается изготавливать в виде отдельных элементов из другого материала, стойкого к ударным нагрузкам и абразивному изнашиванию.

Таким материалом является аустенитная сталь 110Г13Л (сталь Гадфильда), отличающаяся чрезвычайно выраженной способностью к упрочнению (наклепу) при холодной деформации, выражаемой в повышении твердости до 800 НВ [68]. Эта сталь способна выдерживать сжимающие напряжения (до 6000 МПа [26]) не разрушаясь, существенно большие, чем возможные контактные напряжения в разрабатываемой клин-бабе, что обеспечит ее ударным элементам высокую работоспособность.

Указанная сталь обладает и высокой стойкостью к абразивному изнашиванию, необходимой для сохранения заостренной частью корпуса клин-бабы своих геометрических размеров.

На рисунке 5.3 представлены данные о результатах ударно-абразивного изнашивания различных марок сталей.

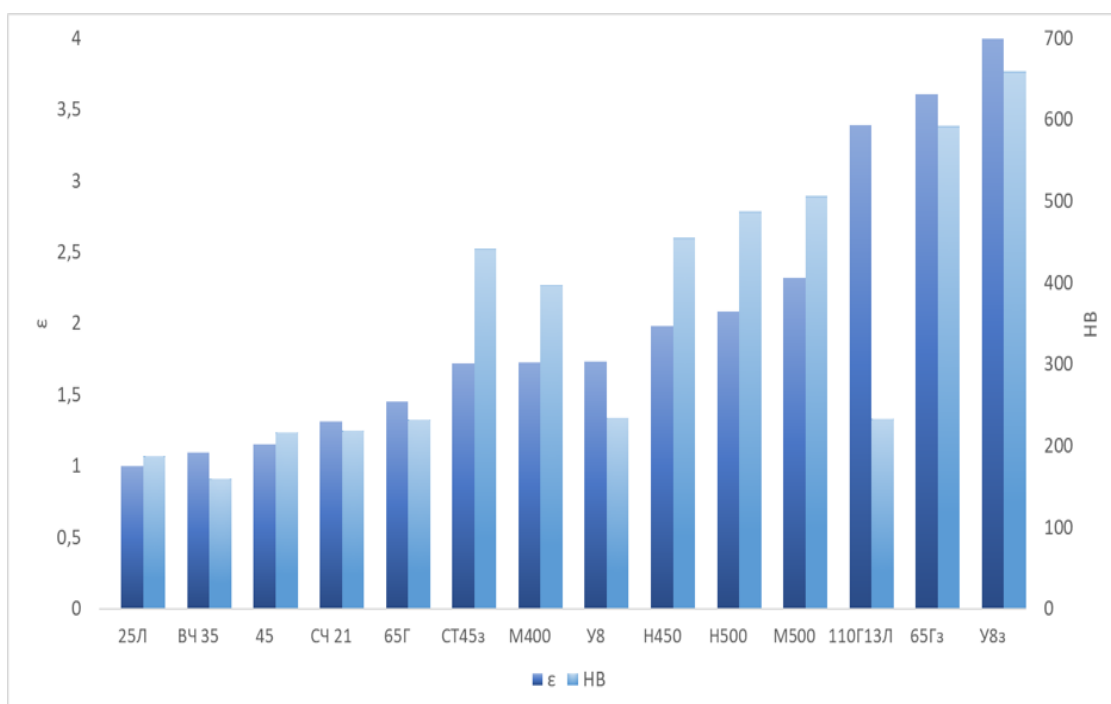


Рисунок 5.3 – Сравнительная износостойкость (темные фигуры) и твердость (светлые фигуры) анализируемых материалов

Как видно из диаграммы рисунка, сталь 110Г13Л демонстрирует одну из самых высоких износостойкостей из испытанных материалов, существенно (в 1,5 - 2 раза) превышая по этому параметру зарубежные стали Hardox (Н400, Н500) фирмы SSAB Oxelosund AB и Miiluks (М450, М500) фирмы Miilux Oy, позиционируемые разработчиками, как высоко износостойкие. (Стали 65Г и У8 после закалки и низкого отпуска, имеющие еще более высокие значения износостойкости, не могли рассматриваться в качестве материала ударных элементов клин-бабы, как не отличающиеся высокой стойкостью к ударным воздействиям).

Изготовление заостренной части клин-бабы из стали Гадфильда с применением высокотемпературной термомеханической обработки, еще более (в 1,3 раза) повысит стойкость этого материала к абразивному воздействию породы [10,11,58,75,76].

5.1.4 Установление размеров основных элементов многомассного устройства ударного действия

Разработаны два технических решения устройств гравитационного действия, в которых реализована идея использования положительного эффекта многомассной конструкции. Данные устройства могут быть применены в качестве ударного органа для дробления негабаритов в карьерах, а также для разрушения металлоконструкций при помощи копра. Благодаря своей конструкции устройства позволяют производить процесс разрушения с меньшей энергоемкостью по сравнению со штатными устройствами данного типа.

Первое техническое решение представляет собой устройство, у которого корпус выполнен из трубной заготовки, в качестве последней была выбрана прямошовная сварная труба из стали 09Г2С, выпускаемая по ГОСТ 10706-76, внешним диаметром $D_k = 820$ мм, как диаметром, наиболее близким к диаметру существующей бабы. В качестве угла заострения β конусной части корпуса и радиуса полусферического притупления его острия R_k принимались значения этих геометрических параметров бабы, выступающей объектом моделирования: $\beta = 90^\circ$, $R_k = 90$ мм. В результате высота острия корпуса бабы составной конструкции составляла 300 мм.

Толщина стенки $h_{ст}$ корпуса бабы, подвергающаяся при ударе усилиям сжатия – растяжения, устанавливалась, исходя из необходимой площади сечения $S_{ст}$ стенок, при которой возникающее в стенке в результате усилия N_m напряжение $\sigma_{ст}$ не превышает допустимого уровня $[\sigma_{доп}]$ (4.5) в выражении (5.5):

$$\sigma_{ст} = \frac{N_m}{S_{ст}} \leq [\sigma_{доп}], \quad (5.5)$$

где $[\sigma_{доп}] = \sigma_{0,2} / k$.

При использовании в качестве материала корпуса стали 09Г2С с условным пределом текучести $\sigma_{0,2} = 265$ МПа (таблица 4.1) и коэффициенте запаса $k = 1,6$ величина может быть оценена в 165 МПа. Откуда, для $N_m = 10,8 \cdot 10^6$ Н $S_{ст} = 0,065$ м². При внешнем радиусе корпуса $R_k = 410$ мм величина $h_{ст}$ при такой необходи-

мой площади сечения составляет 30 мм, что и обуславливает выбор необходимой трубы: 820x30, выпускаемой по ГОСТ 10704-91. Откуда диаметр вставки $D_{вст} = D_k - 2h_{ст} = 820 - 60 \text{ мм} = 760 \text{ мм}$.

Угол γ заострения конусной части вставки принимался равным 60° , как наиболее рациональный (п. 4.1.2). Расчетные значения радиуса площадки притупления острия вставки $R_{вст}$ и высоты ее конусной части составляли 45 мм и 200 мм соответственно (п 4.1.3).

При установлении необходимого зазора $\delta_{ст}$ между стенкой корпуса и вставкой исходили из условия, что этот зазор должен быть не менее чем в 2 раза больше пуассонова расширения $\Delta D_{вст}$ вставки при ударе [56], (5.6):

$$\delta_{ст} \geq 2 \Delta D_{вст} \geq 2 \mu \sigma_{сж} D_{вст} / E \geq 0,1 \text{ мм}, \quad (5.6)$$

где μ – коэффициент Пуассона (0,3 для сталей),

$\sigma_{сж} = 4 N / \pi D_{вст}^2 = 26,5 \text{ МПа}$ – сжимающее напряжение в вставке под действием силы $N = 10,8 \cdot 10^6 \text{ Н}$,

E – модуль Юнга стали ($\sim 200 \text{ ГПа}$).

При установлении необходимого зазора $\delta_{кр}$ между вставкой и крышкой корпуса исходили из условия, что этот зазор должен быть достаточным, для предотвращения удара вставки о крышку при отскоке вставки от днища корпуса по завершению удара (5.7):

$$\delta_{кр} \geq \Delta H_{\Sigma} \geq (N \Sigma H_i / S_i) / E \geq 1,1 \text{ мм}, \quad (5.7)$$

где H_i , S_i – высота и площадь сечения каждого элемента вставки (острия и цилиндрической части), усилие сжатия (отскока) $N = 10,8 \cdot 10^6 \text{ Н}$, E – модуль Юнга стали ($\sim 200 \text{ ГПа}$).

Толщина днища корпуса ($\sim 100 \text{ мм}$) выбирается, как достаточная для крепления в ней запрессовкой стержня острия. Толщина крышки ($\sim 100 \text{ мм}$), закрепляемая к корпусу болтами, должна обеспечивать отсутствие пластической деформации в крышке при подъеме клин-бабы тросом, закрепленным за проушину в крышке.

В соответствии с результатами решения совместного уравнения по определению высоты корпуса H_k и вставки $H_{вст}$, при которых достигается равенство масс этих элементов, значения H_k и $H_{вст}$ оказались равными 1700 мм и 1500 мм, соответственно, при массе каждого элемента $M_k = M_{вст} = 1$ кг.

С учетом сказанного в пункте 4.2, конструкция устройства имеет вид, представленный на рисунке 5.4. Конструкция данного устройства защищена патентом [57].

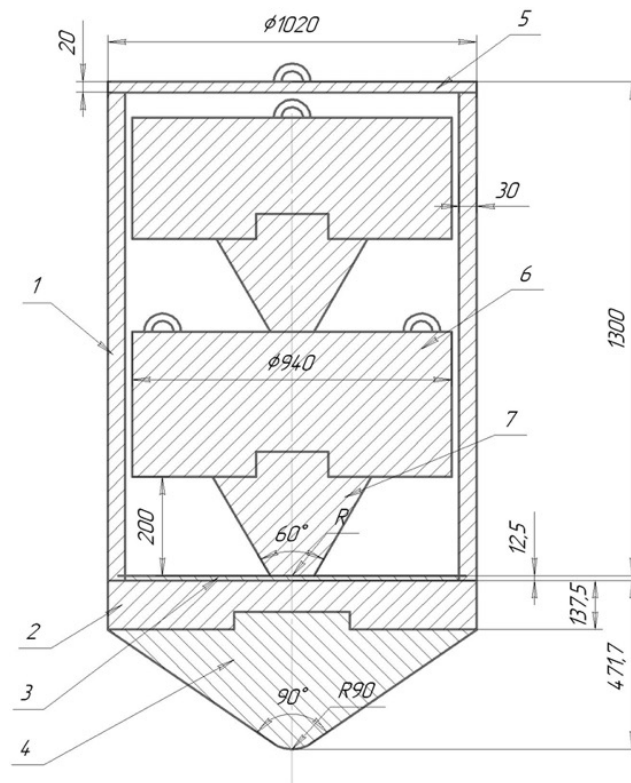


Рисунок 5.4 – Схемное и конструктивное решение предлагаемого трехмассного устройства:

корпус I в виде полого цилиндра с донной частью 2 , пластиной 3 и конусообразным заострением 4 ; свободно перемещающиеся в корпусе цилиндрические вставки 6 с конусообразным заострением 7 и проушинами; крышка 5 с проушиной.

Второе разработанное техническое решение, также защищенное патентом [56], тоже представляет собой устройство составной конструкции, но с аккумулятором энергии, которое за счет дополнительной энергии, запасаемой при подъеме ударника внутри устройства, и эффекта сдвоенного удара позволяет более эффективно производить разрушение негабарита.

При приведении устройства (рисунок 5, *a*) в рабочее положение ударник 3 поднимается внутри устройства тросом подъемного механизма бутобоя до упора в верхнюю часть корпуса 1, запасая потенциальную энергию, с поднятием этой части до положения, при котором зазор между корпусом и ударной частью 2 окажется достаточным для задвижения захватов 4 по направляющим 5 под воздействием обтягивающих тросов 6.

При сбрасывании устройства на негабарит первый удар наносят ударная часть и корпус (рисунок 5.5, *б*) после чего ударник раздвигает боковыми сторонами своего клина захваты и, падая, наносит второй удар своей торцевой поверхностью по донной части корпуса, реализуя переход своей потенциальной энергии в кинетическую.

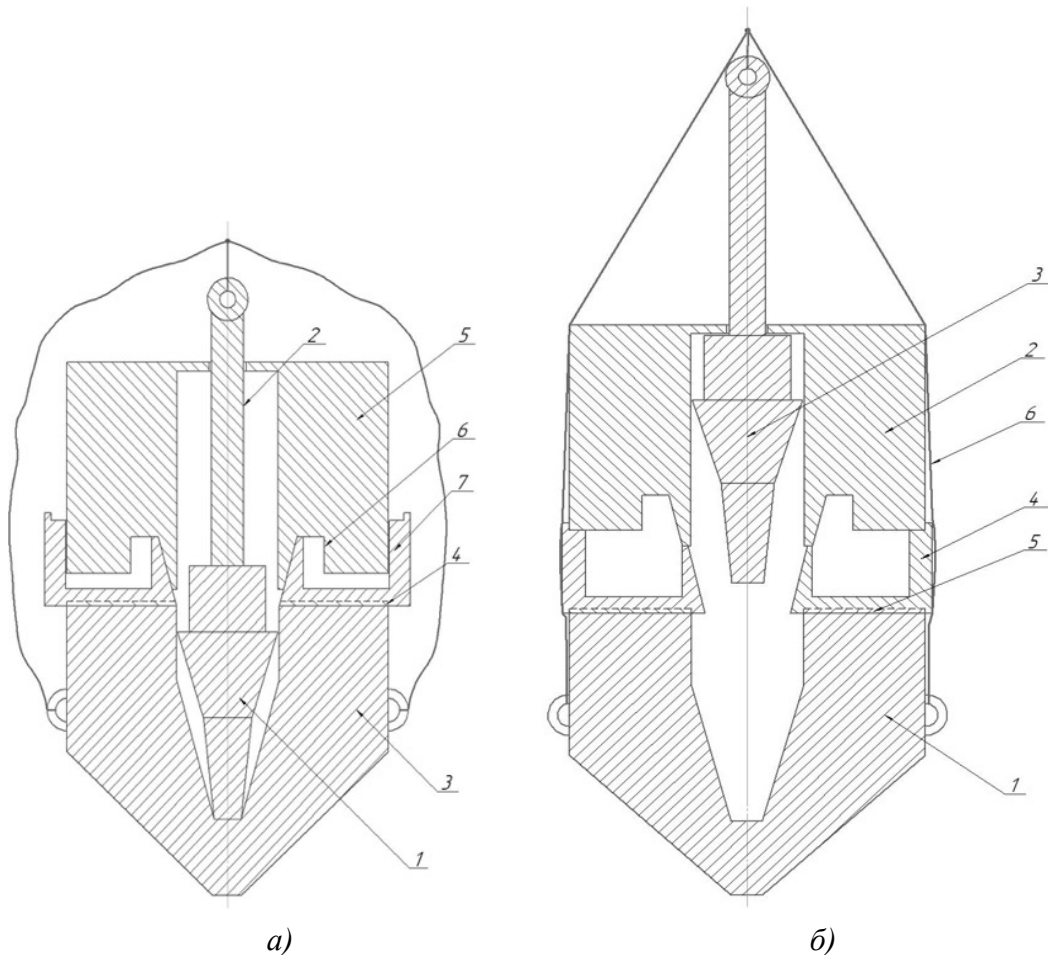


Рисунок 5.5 – Устройство для дрбления негабаритов в исходном (*a*) и взведенном (*б*) состоянии.

Таким образом, наряду с дополнительной энергией, развиваемой при падении ударника внутри устройства, имеет место два последовательных удара, спо-

собствующих увеличению продолжительности ударного воздействия на породу, что приводит к повышенному ее трещинообразованию и разрушению негабарита больших размеров.

5.2 Сравнительная оценка эффективности разрушения негабаритов с применением существующей клин-бабы и предлагаемого многомассного устройства

Оценивался максимальный размер негабарита песчаника, который можно расколоть на две части одним ударом существующей клин-бабы и предлагаемого устройства двух технических решений (рисунки 5.4 и 5.5) при падении с одной и той же высоты (при кинетической энергии $Q \sim 176$ кДж, имеющей место при падении типичной клин-бабы).

Принятые допущения:

- конфигурация негабарита близка к кубической со стороной куба h ;
- негабарит находится на жестком основании, и удар наносится в среднюю точку его горизонтальной поверхности;
- прочностные свойства материала негабарита совпадают со свойствами песчаника, использованного в экспериментах в лабораторных условиях;
- площадь поверхности скола $F_{ск}$ при ударе клин-бабой и устройством по негабариту близка к площади поперечного сечения негабарита, т.е. $F_{ск} \approx h^2$.

Исходя из результатов экспериментов, свидетельствующих о близости удельной поверхностной энергии раскалывания $Q_{уд}$ для фрагментов песчаника различной площади сечения, считали, что установленные в экспериментах значения $Q_{уд} \sim 60$ кДж/м² для цельного инструмента, 44 кДж/м² для многомассного (\sim в 1,4 раза меньше) и 36 кДж/м² для многомассного с пружиной (\sim в 1,7 раз меньше), справедливы и для разрушения негабарита. Тогда максимальные размеры негабарита, который способны расколоть за один удар клин-баба и устройство при $Q = 176$ кДж, составляют: $h = (Q/Q_{уд})^{0,5} = 1,71$ м для клин-бабы, и 2,00 м для многомассного устройства и 2,21 м для устройства с

аккумулятором энергии, т.е. в 1,17 и 1,29 раза больше. Такое увеличение размеров негабарита соответствует увеличению их объема в 1,6 и 2,14 раза.

5.3 Выводы по главе 5

1. На основании результатов проведенных экспериментальных работ установлено, что наибольшая глубина внедрения многомассного инструмента в песчаник и металлические материалы достигается при соотношении между массами корпуса и вставок $\sim 1:1$ и угле приострения вставок близком к 60° , что позволило принять эти значения параметров за рациональные в конструкции натурального многомассного устройства.

2. Исходя из конструкции модельного многомассного инструмента, а также функционального назначения устройства и каждого его элемента, заключали, что предлагаемая конструкция многомассного устройства должна состоять из корпуса в виде полого цилиндра с конусообразной донной частью, свободно перемещающейся в корпусе цилиндрической вставки (вставок) с конусообразным приострением, аккумулятора энергии (для устройства с аккумулятором) и механизма для его зарядки и пуска в действие.

3. Предложены два схемных и конструктивных решений устройства дробления негабаритов ударом увеличенной энергии и продолжительного действия, защищенных авторскими свидетельствами

4. Определены размеры основных элементов многомассного устройства, выбраны необходимые заготовки и материалы для их изготовления, показано, что для предотвращения пластической деформации и абразивного изнашивания металла, приостренные части ударника и корпуса, а также поверхностный фрагмент донной части корпуса целесообразно изготавливать из стали 110Г13Л, способной, не разрушаясь, выдерживать сжимающие напряжения до 6000 МПа при абразивной стойкости, как обнаружено автором, превышающей стойкость зарубежных сталей Hardox и Miiluks.

5. Исходя и из установленных значений удельной поверхностной энергии разрушения песчаника модельным инструментом, считали, что применение разработанного многомассного устройства позволит повысить до 1,7 раз площадь сечения раскалываемого негабарита по сравнению с существующим устройством (клин-бабой) близких массогабаритных характеристик.

6. Предложенное многомассное устройство гравитационного действия для разрушения негабаритов по патентам [57], [58] приняты к использованию на предприятии ООО "Металломеханический завод" с выдачей соответствующего акта внедрения.

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 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.

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 $\sim 60^\circ$ 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрюшенков, Д.Н. Обоснование и выбор основных параметров карьерной погрузочно-транспортной машины: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Андрюшенков Дмитрий Николаевич. – Екатеринбург, 2015. – 127 с.
2. Алабужев, П.М. Введение в теорию удара. Горный журнал / П.М. Алабужев, Б.Н. Стахановский, И.Я. Шпигельбурд. – Новосибирск: Изд-во НЭТИ, 1970. –186 с.
3. Александров, Е.В. Прикладная теория и расчеты ударных систем / Е.В. Александров, В.Б. Соколинский. – М.: Наука, 1969. – 195 с.
4. Андриевский, А. П. Методика определения параметров взрывания шпуровых и скважинных зарядов, позволяющих исключить перебур и минимизировать выход негабарита/ А.П. Андриевский // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2. – С. 93-102.
5. Аль-Саккаф, Х.С.Т. Рациональные параметры навесного оборудования для ударного разрушения негабаритов горных пород: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Аль-Саккаф Халед Саед Таха. – Иркутск, 2015. – 133 с.
6. Бабенков, И.С. Исследование взаимодействия бурового инструмента и породы методом фотоупругости / И.С. Бабенков, К.И. Иванов, Г.Л. Хесин. – М.: Недра. – 1970. – 128 с.
7. Барон, Л. И. Поштучный обмер негабарита в карьерах/ Л. И. Барон, Н. Ф. Адрианов, Г. С. Черепанов // ИГД им. А. А. Скочинского. – М., 1962. – 283 с.
8. Барон, Л.И. Разрушаемость горных пород свободным ударом / Л.И. Барон, И.Е. Хмельковский. – М.: Недра, 1971. – 201 с.
9. Бинь, Л.Т. Повышение износостойкости рабочего инструмента гидромолотов типа JCB средней серии при разрушении негабаритов в условиях карьеров района Бинь Динь (Социалистическая Республика Вьетнам): дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Бинь Ле Тхань. – Санкт-Петербург, 2018. – 150 с.

10. Болобов, В.И. О распространении трещины по горной породе при ударе/ В.И. Болобов, Л.Т. Бинь, В.А. Плащинский // Обогащение руд. – 2019. – № 6. – С. 3-5.
11. Болобов, В.И. О соотношении параметров разрушения породы в статических и динамических условиях / В.И. Болобов, В.А. Плащинский, С.В. Борисов, Л.Т. Бинь // Обогащение руд. – 2021. – № 5. – С. 3-9.
12. 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.
13. 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.
14. Болобов, В. И. Влияние продолжительности удара на эффективность разрушения горных пород и пластического деформирования металлов / В. И. Болобов, **В. А. Плащинский**// Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 3. – С. 78–96.
15. Борисов, А.А. Разрушение углей и горных пород ударной нагрузкой. В кн.: Расчеты, конструирование и испытания горных машин / А.А. Борисов. – М.: Углетехиздат, – 1955. – С. 5-49.
16. Боярских, Г. А. Аналитическая оценка энергоемкости разрушения кусков горных пород малоцикловыми ударными нагрузками/ Г.А. Боярских // Материалы международной научно-технической конференции «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья», Екатеринбург. – 2008. – С. 289-293.
17. Боярских, Г. А. Исследование параметров формы инструмента и энергии ударного разрушения негабаритного куска породы / Г. А. Боярских, Н. П. Мамонтов, А. П. Федосеев // Материалы уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург. – 2008. – С. 166-168.

18. Бусарев, А. С. Проблема выхода негабарита и пути его снижения на примере Исетского щебёночного завода/ А. С. Бусарев, Р. В. Кокунин // Материалы международной научно-практической конференции молодых учёных и студентов, Екатеринбург. – 2009. – С. 96-98.
19. Бульбашев, А. А. Обоснование технологии круглогодичного производства взрывных работ при селективной добыче карбонатных пород на примере Афанасьевского месторождения: автореф. дис. канд. техн. наук. 25.00.20 / Бульбашев Андрей Александрович. – Санкт-Петербург, 2012. – 23 с.
20. Викторов, С.Д. Предразрушение горных пород, как стадия процесса разрушения при квазистатическом и динамическом нагружении / С.Д. Викторов, А.Н. Кочанов, В.Н. Одинцев // Записки Горного Института. – 2007. – Т.171. – с. 153.
21. Виноградов, В.Н. изнашивание при ударе / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин, А.Ю. Албагачиев. – М.: Машиностроение. – 1982. – 192 с.
22. Григорьев, Б.С. Математическое моделирование дробления грунта и многофазного течения бурового раствора при бурении скважин / Б.С. Григорьев, А.А. Елисеев, Т.А. Погарская, Е.Е. Торопов // Записки Горного института. – 2019. – Т.235. – С. 16-23.
23. Геронтьев, В.И. Разрушение углей и горных пород струей воды (Работы лабораторий Ленинградского горного института)/ В.И. Геронтьев, Л.П. Северин // Записки Горного Института. – 1959. – № 1 (41). – С. 17.
24. Гофман, М.С. О дроблении тел свободным ударом / М.С. Гофман, К.П. Шабалин // Горный журнал. – 1964. – № 3. – С. 64-67.
25. Дворников, Л.Т. Рациональное проектирование ударных систем технологического назначения / Л.Т. Дворников, И.А. Жуков // Вестник СибГИУ. – 2012. – № 2. – С.15-20.
26. Давыдов, Н.Г. Высокомарганцевая сталь/ Н.Г. Давыдов. – М: Металлургия. – 1979. – 176 с.

27. Ефремов, Э.И. Разрушение горных пород при статическом и динамическом нагружении / Э.И. Ефремов, А.И. Федулов, В.Н. Лабутин. – Киев.: Наукова думка. – 1990. – 141 с.
28. Жуков, И.А. Теоретические основы синтезирования форм бойков ударных систем технологического назначения/ И.А. Жуков, Е. В. Сараханова // Известия ТПУ. – 2009. – № 2. – С.173-177.
29. Жуков, И.А. Механика разрушения горных пород ударом при одновременном внедрении нескольких инденторов / И.А. Жуков // Вестник КузГТУ. – 2018. – № 1 (125). – С.93-99.
30. Загорский, С.Л. Разрушение горных пород ударом / С.Л. Загорский. – Сб.: Разрушение углей и пород. – М., Углетехиздат, 1958. – 269 с.
31. Задков, Д.А. Особенности формирования элементарных сколов в процессе резания углей и изотропных материалов эталонным резцом горных машин / Д.А. Задков, В.В. Габов, К.Н. Линь // Записки Горного Института. – 2019. – № 236. – С. 153-160.
32. Зедгенизов, В.Г. Результаты исследования рабочего процесса ударника для разрушения негабаритов горных пород на математической модели/ В.Г. Зедгенизов, Х. С. Т. Альсаккаф // Вестник ИрГТУ. – 2013. – №7 (78). – С. 1-5.
33. Зинин, В.Ф. Исследование энергоемкости разрушения горных пород Березовского рудника динамической и статической нагрузками/ В.Ф. Зинин. – Сб.: «Сопrotивляемость горных пород разрушению при добывании». –М: Изд-во. АН СССР, 1962. – 232 с.
34. Керимов, З.Э. Гидравлические машины ударного действия и их практическое применение/ З.Э. Керимов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2019. – №10. – С.481-489.
35. Клишин, И.В. Безвзрывная технология переработки скальной вскрыши, негабаритных кусков и зачистки взрывных блоков при разработке каменных карьеров в Алтае-Саянском регионе / И.В. Клишин // ГИАБ. – 2012. – № 4. – С. 313-316.

36. Коршунов, В.А. Определение показателей паспорта прочности горных пород методом разрушения образцов сферическими инденторами/ В.А. Коршунов, Ю.М. Карташов, В.А. Козлов // Записки Горного института. – 2016. – Т.185. – С. 41-95.
37. Крюков, Г.М. Главные критерии для оценки взрывного дробления горных пород на карьерах / Г. М. Крюков, М. И. Докутович, С. Н. Жаворонко // Взрывное дело: Сб. научных трудов / Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня. – 2007. – №7. – С. 180-195.
38. Крюков, Г.М. Модель взрывного рыхления горных пород на карьерах. Выход негабарита. Средний размер кусков породы в развале / Г.М. Крюков // Отдельные статьи Горного информационно-аналитического бюллетеня. – 2005. – № 2. – С. 1-30.
39. Крюков, Г. М. Степень дробления и выход негабарита при взрывном рыхлении горных пород на карьерах/ Г. М. Крюков, М. И. Докутович, С. Н. Жаворонко// ГИАБ. – 2011. – № 5. – С. 12-16.
40. Кубачек, В.Р. Параметры разрушения горных пород ударом/ В.Р. Кубачек // Строит. и дор. маш. - 1985. - № 6. - С. 17-18.
41. Кутузов, Б.Н. Разрушение горных пород взрывом: учебник для вузов / Б. Н. Кутузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: МГИ, 1992. – 516 с.
42. Лавриненко, В. Ю. Экспериментальные исследования процесса прошивки заготовки бабой ковочного молота с наполнителем / В. Ю. Лавриненко, Е. Н. Складчиков, Ф. И. Стоилковски // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 5. – С. 203-209.
43. Лавриненко, В. Ю. Определение сил деформирования и работы деформации при осадке на молотах/ В.Ю. Лавриненко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 1. – С. 146-149.
44. Лавриненко, В. Ю. Расчет процессов осадки на молотах при деформировании бабой молота с наполнителем / В.Ю. Лавриненко, Е.И. Семенов, А.Е. Феофанова // Известия высших учебных заведений. – 2014. – № 1. – С. 10-17.

45. Лавриненко, В. Ю. Экспериментальное исследование удара при осадке на молотах в условиях горячего деформирования / В.Ю. Лавриненко, Е.И. Семенов, А.Е. Феофанова //Известия МГТУ "САМИ". – 2013. – № 2. (16), т.2 – С. 191-194.
46. Лагунов, В.А. Скорость развития трещин в образцах горных пород / В.А. Лагунов, Ш.А. Мамбетов // ПМТФ. – 1965. – № 6. – С. 96-99.
47. Авдеев, Ф.А. Нормативный справочник по буровзрывным работам / Ф. А. Авдеев, В.Л. Барон, Н.В. Гуров, В.Х. Кантор. – 5-е изд. – М.: Недра, 1986. – 511 с.
48. Оловянный, А.Г. Математическое моделирование процессов деформирования и разрушения в трещиноватых массивах горных пород /А.Г. Оловянный // Записки Горного института. – 2016. – Т.185. – 95-98.
49. ОСТ 24.072.11-81 Забои одноковшовых экскаваторов. Показатели качества.
50. Остроушко, И. А. Разрушение горных пород при бурении/ И.А. Остроушко. – М.: Госгеолиздат, 1952. –254 с.
51. Павлова, Н.Н. Разрушение горных пород при динамическом нагружении/ Н. Н. Павлова, Л. А. Шрейнер. – Москва: Недра, 1964. – 160 с.
52. Панкратенко, А. Н. Определение удельной поверхностной энергии разрушения пород/ А.Н. Панкратенко // ГИАБ. – 2002. – №9. – С. 11-14.
53. Патент № 94182 Российская Федерация, МПК В21J 13/06 (2006.01). Устройство бабы молота с контролируемым временем удара при деформировании заготовки: № 2009149519/22: заявл. 31.12.2009: опубл. 20.05.2010/ Феофанова А.Е., Лавриненко В.Ю., Семенов Е.И.; заявитель Московский государственный технический университет "МАМИ". – 11 с. : ил.
54. Патент № 2368782 Российская Федерация, МПК E21C 37/00 (2006.01). Устройство ударного действия: № 2008107248/03: заявл. 26.02.2008: опубл. 27.09.2009 / Ботвинкин А.К., Моисеев Е.Б., Хворостин В.Н.; заявитель ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ" – 7 с. : ил.

55. Патент № 2438825 Российская Федерация, МПК В21J 13/06 (2006.01). Баба молота: № 2010126570/02: заявл. 30.06.2010: опубл. 10.01.2012/ Феофанова А.Е., Демин В.А., Евсюков С.А., Лавриненко В.Ю., Семенов Е.И.; заявитель Московский государственный технический университет "МАМИ". – 6 с. : ил.
56. 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.
57. Патент № 208333 Российская Федерация, МПК E21C 37/00 (2006.01) B25D 17/02 (2006.01), В21J 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.
58. 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 СПГГУ.
59. Присташ, В.В. Энергоемкость разрушения горных пород при различных видах механических воздействий /В.В Присташ, С.Е. Чирков// ГИАБ. – 2000.– № 10. – С.85-87.
60. Прокопенко, С. А. Результаты промышленных испытаний шахтных резцов многоразового применения/ С. А. Прокопенко, В. С. Лудзиш, И.А. Курзина, А.В. Сушко // Горный журнал. – 2015. – № 5. – С. 67-70.
61. Ржевский, В.В. Использование сил гравитации для дробления негабарита на карьерах / В.В. Ржевский, Ю.И. Анистратов // Колыма. – 1962. – № 11. – С. 14-15.
62. Симонов, П.С. Особенности определения размера среднего куска и выхода негабарита при взрывных работах на карьерах/ П.С. Симонов // ГИАБ. – 2017. – № 4. – С. 320-326.

63. Синева, С.В. Механизмы, методы и способы разрушения горных пород в шарошечном бурении / С.В. Синева // ГИАБ. – 2016. – № 1. – С. 149-159.
64. Соколинский, В.Б. Машины ударного разрушения / В.Б. Соколинский. – М.: Машиностроение, 1982 – 151 с.
65. Сорокин, В.Г. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин и др; под общ. ред. В. Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
66. Тарасов, С. П. Разработка и обоснование параметров многофункционального комплекса для разрушения негабаритов // ГИАБ. – 2013. – № 6. – С. 400-407.
67. Федосеев, А. П. Выбор рациональных параметров ударного инструмента для дробления негабаритов: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Федосеев Алексей Петрович. – Екатеринбург, 2015. – 111 с.
68. Чупров, И. В. Исследование взаимосвязи параметров электромагнитных молотов с физико-механическими свойствами горных пород при дроблении негабаритов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Чупров Игорь Валерьевич. – Екатеринбург, 2006. – 20 с.
69. Цыганков, Д. А. Новая технология дробления негабаритов крепких горных пород на карьере/ Д. А. Цыганков // ГИАБ. – 2006. – № 1. – С.357-361.
70. Шадрина, А.В. Экспериментальное исследование влияния параметров ударной системы на разрушение гранита / А.В. Шадрина, Л.А. Саруев // ГИАБ. – 2013. – № 4 (1). – С. 276-280.
71. Шадрина, А.В. Оценка влияния формы и энергетических параметров силового импульса на показатели разрушения горной породы/ А.В. Шадрина // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – С. 407.
72. Швеца, Е. Н. Оперативное определение кусковатости дробленных взрывом пород/ Е. Н. Швеца // Разработка рудных месторождений: науч.-техн. сб.; Криворожский техн. ун-т. – 2010. – № 93. – С. 53-57.
73. Шелковников, И.Г. Использование энергии удара в процессах бурения / И.Г. Шелковников. – М.: Недра., 1977. – 160 с.

74. Шер, Е. Н. Моделирование развития трещины в горной породе, возникающей при ударе клиновидного инструмента/ Е. Н. Шер, В.П. Ефимов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2015. – № 3. – С.281-286.
75. Шрейнер, Л.А. Физические основы механики горных пород: Механические свойства и процессы разрушения при бурении / Л. А. Шрейнер. – Москва; Ленинград: Гостоптехиздат, 1950 – 212 с.
76. Шрейнер, Л. А. Зоны пластической деформации и механизм разрушения пластичных горных пород при вдавливании/ Л. А. Шрейнер, О. П. Петрова // В кн. «Вопросы деформации и разрушения горных пород при бурении». – М.: Недра., 1961. – 111 с.
77. Эйгелес, Р.М. Исследование закономерностей процесса бурения шарочными долотами: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Эйгелес Рудольф Моисеевич. – Москва, 1957. – 20 с.
78. Эйгелес, Р.М. О некоторых закономерностях динамического внедрения зубьев долот в породу/ Р.М. Эйгелес// Нефтяное хозяйство. – 1956. – № 8. – С.13-20.
79. Эйгелес, Р.М. Рациональная конструкция рабочей поверхности шарошечного долота и режим его работы/ Р.М. Эйгелес // Нефтепромысловое дело. – 1956. – № 6. – С.102-112.
80. Юнгмейстер, Д.А. Модернизация гидравлических бурильных головок/ Д.А. Юнгмейстер, А. С. Сакерин, Р. И. Королев, В.А. Карлов // Горное оборудование и электромеханика. – 2017. – № 4. – С. 8-13.
81. Bickle, W.H. Fundamental aspects of crushing and grinding. Crushing and grinding/ W.H. Bickle // A bibliography. – London, 1958. – 230 p.
82. 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.
83. Bolobov, V. I. Comparative Wear Resistance of Existing and Prospective Materials of Fast-Wearing Elements of Mining Equipment/ V. I. Bolobov, S. A.

Chupin, E. V. Akhmerov, V.A. Plaschinskiy// Materials Science Forum. - 2021. Issue 1040. pp. 117–123.

84. Fairhurst, C. Wave mechanics of percussion drilling, p.2 J// C. Fairhurst // Mine and quarry engineering. – 1961. – vol. 27, № 4. – pp. 17–24.

85. Pennington, J.V. Rock failure in percussion / J.V. Pennington // Petroleum Engineering. – 1954. – vol. 26, № 5. – pp. 12–20.

86. Reichmuth, D.R. Correlation of force-displacement data with physical properties of rock for percussive drilling systems/ D.R. Reichmuth// Proceedings of fifth symposium. School of Mines and Metallurgy. – 1963. – pp. 14–24.

87. Yungmeister, D. A. Improving the shield machine cutter head for tunneling under the conditions of the Metrostroy Saint Petersburg mines/ D. A. Yungmeister, S.A. Lavrenko, A.I. Yacheikin, R.Y. Urazbakhtin // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2020. – № 11., vol. 15. – pp 1282-1288.

88. Wang, L. Experimental Investigation on Static and Dynamic Bulk Moduli of Dry and Fluid-Saturated Porous Sandstones / L. Wang, E. Rybacki, A. Bonnelye et al // Rock Mech. – 2021. –№ 54. – pp. 129-148.

89. Renshu, Y. Comparative Study on Dynamic Mechanical Properties and Energy Dissipation of Rocks under Impact Loads / Y. Renshu, L. Weiyu, Y. Zhongwen - // Shock and Vibration. – 2020. – vol.2020 – pp. 1-15.

90. Hongxiang, J. Experimental and Numerical Investigation of Hard Rock Breakage by Indenter Impact/ J. Hongxiang, C. Zhiyuan, W. Ouguo, M. Deguang // Shock and Vibration. – 2020. – vol. 2020. – pp.1-12.

91. Yongming, X. Experimental Study on the Mechanical Properties and Damage Evolution of Hollow Cylindrical Granite Specimens Subjected to Cyclic Coupled Static-Dynamic Loads/ X. Yongming, D. Bing, C. Ying, Z. Lei, H. Guicheng, Z. Zhijun // Geofluids. – 2020. – vol. 2020. – pp.1-14.

92. Jiuqun, Z. Investigating the Influences of Indentation Hardness and Brittleness of Rock-Like Material on Its Mechanical Crushing Behaviors/ Z. Jiuqun, H. Jihuan, Y. Weihao// Mathematical Problems in Engineering. – 2020. – vol. 2020. – pp. 1-16.

93. Khoreshok, A. Relationship between the power of the two-bit cutting body rotation drive of the roadheader and hardness of broken rock// A. Khoreshok, L. Mametiev, A. Tsekhin, A. Borisov// E3S Web of Conferences. – 2018. – № 41. – pp 1-8.
94. Prokopenko, S.A. Recovery of worn-out picks in rock breaking/ S.A. Prokopenko, A.V. Vorobiev// Eurasian Mining. – 2018. – № 1. – pp. 27-30.
95. Sementsov, V.V. Design and industrial testing of innovative nonexpensible picks for cutter-loaders / V.V. Sementsov, S.A. Prokopenko, V.S. Ludzish, V.V. Abramov // Eurasian Mining. – 2019. – № 2. – pp 59-63.
96. Prokopenko, S. New design of cutters for coal mining machines/ S. Prokopenko, A. Sushko, I. Kurzina// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 91. – pp.1-8.
97. Zhukov, I. A. Improvement of Down-the-Hole Air Hammer Efficiency by Optimizing Shapes of Colliding Parts / I.A. Zhukov, B.N. Smolyanitsky, V.V. Timonin// Journal of Mining Science. – 2018. – № 2. – vol. 54. – pp. 212 - 217.
98. Shishlyannikov, D. I. Investigation of the destruction process of potash ore with a single cutter using promising cross cutting pattern / D.I. Shishlyannikov, I.E. Zvonarev// Applied Sciences. – 2021. – № 1. – vol. 11. – pp. 464-474.
99. Linh, N. K. Evaluating the Efficiency of Coal Loading Process by Simulating the Process of Loading onto the Face Conveyor with a Shearer with an Additional Share / N. K. Linh, V.V. Gabov, Y.V. Lykov, R.Y. Urazbakhtin // International Journal of Engineering. – 2021. – № 7., vol 34. – pp .1804-1809.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт внедрения результатов диссертационной работы



ПРИТВЕРЖДАЮ

Директор по образовательной
деятельности ФГБОУ ВО «Санкт-
Петербургский горный университет»
к.т.н., доц. Д.Г. Петраков

03 2022 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс

Результаты диссертационной работы Плащинского В.А. «Обоснование и выбор схемных и конструктивных решений устройства дробления негабаритов с увеличенной энергией удара» внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет».

В частности, разработанная автором методика исследований по разрушению горной породы ударным инструментом используется на практических и лабораторных занятиях при обучении студентов направления 21.05.04 – «Горное дело» по профилю «Горные машины».

В ходе практических занятий студенты осваивают методы разрушения горных пород статическими и динамическими нагрузками, а также методику расчета параметров разрушения и построения нагрузочных характеристик процесса.

В рамках лабораторных занятий студенты проводят эксперименты по разрушению горной породы на лабораторном стенде с определением зависимости глубины внедрения индентора в породу от величины прикладываемой нагрузки, особенностей конструкции инструмента и его геометрических параметров.

Научный руководитель
д.т.н., проф.

В.И. Болобов

Заведующий кафедрой машиностроения
д.т.н., проф.

В.В. Максаров

ПРИЛОЖЕНИЕ Б**Акт внедрения результатов диссертационной работы****Общество с ограниченной ответственностью
«МЕТАЛЛО-МЕХАНИЧЕСКИЙ ЗАВОД»**

юридический адрес: 125475, г. Москва, ул. Зеленоградская, стр. 35, корп. 1,
почтовый адрес: 653036, г. Прокопьевск Кемеровской области, ул. Правды, 25, тел./факс (3846) 61-52-71,
ИНН 7743619259, КПП 774301001, ОКПО 98238756, ОКВЭД 29.52., www.krepy.ru, e-mail: mmz@krepy.ru

Акт

о внедрении результатов диссертационной работы

Плащинского Вячеслава Алексеевича на тему: «Обоснование и выбор схемных и конструктивных решений устройства дробления негабаритов с увеличенной энергией удара»

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы «Обоснование и выбор схемных и конструктивных решений устройства дробления негабаритов с увеличенной энергией удара» Плащинского Вячеслава Алексеевича на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.06 – Горные машины, выполненные в Санкт-Петербургском горном университете, за период с 2018 г. по 2022 г. приняты к внедрению.

Форма внедрения результатов диссертационной работы:

- 1) рекомендации по области применения разработанного ударного устройства для дробления негабаритов гравитационного действия;
- 2) методика расчета основных параметров разработанного ударного устройства;
- 3) конструктивные схемы ударного устройства, согласно патентам РФ (№2751895, №208333).

Указанные выше материалы будут использоваться при проектировании исполнительных органов машин ударного разрушения горных пород, таких как бутобои. Использование разработанной конструкции позволит снизить энергозатраты при разрушении негабаритов горных пород.

Заместитель главного
инженера



Н.Д. Крестовоздвиженский

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Свидетельство о государственной регистрации патента на изобретение

«Устройство для дробления негабаритов»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ
НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2751895

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ДРОБЛЕНИЯ НЕГАБАРИТОВ

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Иванов Сергей Леонидович (RU), Болобов Виктор Иванович (RU), Плащинский Вячеслав Алексеевич (RU)*

Заявка № 2020138388
Приоритет изобретения **24 ноября 2020 г.**
Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **19 июля 2021 г.**
Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **24 ноября 2040 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Свидетельство о государственной регистрации патента на полезную модель

«Ударник для разрушения и пластической деформации материалов»



ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Свидетельство о государственной регистрации патента на изобретение

«Способ изготовления молотка дробилки»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ
НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2731994

СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОЛОТКА ДРОБИЛКИ

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Болобов Виктор Иванович (RU), Плащинский Вячеслав Алексеевич (RU), Ракитин Илья Витальевич (RU)*

Заявка № 2020110425
Приоритет изобретения 11 марта 2020 г.
Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 09 сентября 2020 г.
Срок действия исключительного права на изобретение истекает 11 марта 2040 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

 Г.Н. Изrael