

ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 622.231

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ “БОЕК – ИНСТРУМЕНТ” С ГОРНЫМ МАССИВОМ НА СТЕНДЕ

Л. В. Городилов, В. П. Ефимов, В. Г. Кудрявцев

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: gor@isd.nsc.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Разработан стенд с маятниковым копром для моделирования динамики системы “боек – инструмент – горный массив”. Для имитации массива использовали газожидкостный демпфер с регулировками, металлическую плиту, мраморный блок. Сравниваются результаты измерений ударных импульсов в бойке и инструменте и коэффициенты восстановления скорости бойка, полученные при взаимодействии бойка и инструмента с демпфирующим устройством и с блоком горной породы.

Боек, инструмент, демпфирующее устройство, маятниковый копер, ударный импульс, горный массив

ВВЕДЕНИЕ

Исследование гидроударных систем объемного типа показало [1, 2], что существенное влияние на характеристики их циклов оказывает коэффициент восстановления скорости бойка R , который в интегральной форме отражает процесс взаимодействия системы “боек – инструмент – горный массив”. Поэтому при стендовых испытаниях и исследовании характеристик важно как можно точнее воспроизвести условия работы системы в естественных условиях, в частности обеспечить возможность регулирования величины R . Как правило, стенды для испытаний и исследований ударных устройств [3, 4] не рассчитаны на мобильное управление этим параметром. Одним из вариантов является применение газожидкостного демпфера с регулируемыми характеристиками [5]. В [6] предпринята попытка исследования его свойств с помощью физической модели гидроударного устройства, однако основные выводы получены по результатам регистрации перемещения бойка датчиком EDS-100 фирмы MicroEpsilon, который по частотным характеристикам не предназначен для изучения ударных процессов. Кроме того, в условиях циклической работы устройства из-за наличия давления в рабочих камерах, вибраций стенда и измерительного оборудования трудно выделить сигнал, относящийся к единичному удару. С целью имитации единичного удара нами разработан маятниковый копер. Для

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 11-08-00982) и ОНЗ РАН -3.3.

измерения скорости бойка до и после удара сконструирован специальный оптический датчик. Одновременная регистрация изменения скорости бойка и ударных импульсов ускорения в бойке и инструменте позволила провести исследования характеристик демпфирующего устройства, а также сравнить результаты с полученными при взаимодействии системы “боек – инструмент” с жестко закрепленной металлической плитой, мраморным блоком и без преграды.

МАЯТНИКОВЫЙ КОПЕР И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Стенд для исследований включал маятниковый копер с бойком 5, инструмент 6 и демпфирующее устройство 8 с поршнем 7 (рис. 1). В опытах с горной породой (рис. 2) демпфирующее устройство заменяли блоком из мрамора 2 габаритами 0.95×0.95×1.5 м, массой ~4000 кг, с жесткой преградой — металлической плитой габаритами 0.1×0.2×0.8 м, массой ~100 кг. Копер позволял моделировать единичные удары бойка по инструменту.

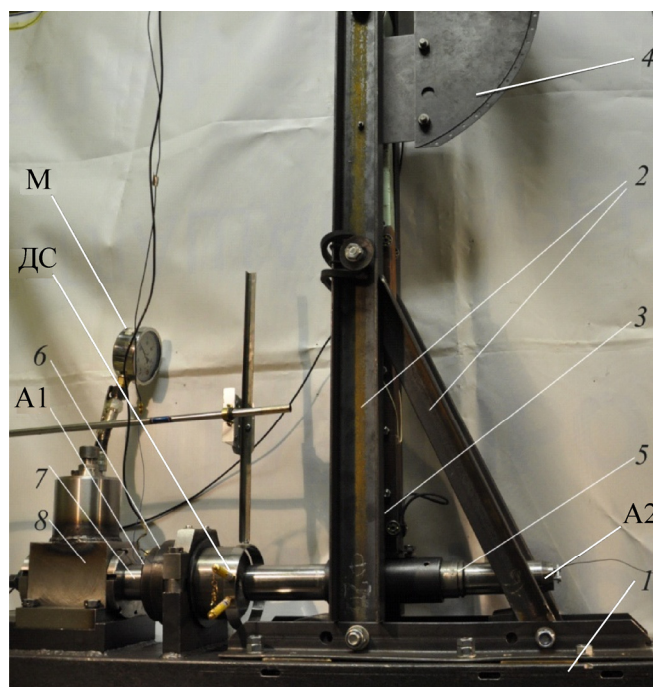


Рис. 1. Экспериментальный стенд: 1 — швеллер-основание; 2 — каркас копера; 3 — подвес; 4 — измерительный сектор; 5 —боек; 6 — инструмент; 7 — поршень; 8 — демпфирующее устройство; ДС — датчик скорости; М — манометр; А1 и А2 — акселерометры

При работе с демпфирующим устройством и металлической плитой все составные части стенда крепились на швеллере-основании 1 (рис. 1). На нем устанавливался каркас 2, к стойкам которого на оси подвешивали маятник — металлический подвес 3 с бойком 5. Подвес и боек соединяли оригинальным разъемом, разъединяющимся в момент удара. Высота подъема бойка контролировалась по углу отведения подвеса при помощи специального измерительного сектора 4 с метками. Скорость бойка зависела от угла отклонения маятника и достигала в опытах 5 м/с.

Инструмент 6 (рис. 1, 3) представлял собой ступенчатый цилиндр, вставляемый в обойму 9, которая зажималась скобой-основанием. Между обоймой и ступенькой цилиндра располагалось резиновое кольцо 10 таким образом, чтобы инструмент прижимался к поверхности поршня 7 демпфирующего устройства и мог совершать возвратно-поступательное движение только в ее сторону.



Рис. 2. Маятниковый стенд и мраморный блок: 1 — укороченный швеллер-основание; 2 — мраморный блок; 3 — клиновидный инструмент; 4 — лапы; 5 — болты

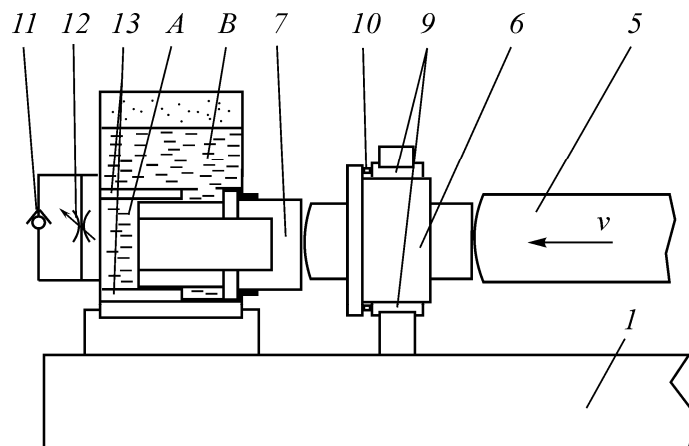


Рис. 3. Схема эксперимента с демпфирующим устройством: 1 — швеллер-основание; 5 — боек; 6 — инструмент; 7 — поршень; 9 — обойма; 10 — резиновое кольцо; 11 — обратный клапан; 12 — дроссель; 13 — цилиндр

Демпфирующее устройство 8 (рис. 1, 3) состояло из корпуса с двумя камерами (жидкостной *A* и газожидкостной *B*), разделенными обратным клапаном 11 и регулируемым дросселем 12, цилиндра 13, в который входил левый конец поршня 7. Регулируемые параметры: давление газа в камере *B* и проходное сечение дросселя. В качестве жидкости использовали масло И-20А, в верхнюю часть камеры *B* был закачан азот под давлением ~ 3 МПа. Поршень демпфирующего устройства 7 имел массу 1.9 кг, длину 0.16 м и площадь со стороны камеры *A* ~ 24 см².

Устройство работает следующим образом. После удара бойка 5 по инструменту 6 последний начинает двигаться и смещает поршень 7, левый конец которого, входящий в замкнутый объем камеры *A*, сообщается с газожидкостной камерой *B* через дроссель 12. Давление в камере *A* повышается, происходит торможение и остановка поршня 7, затем он возвращается (об-

ратный ход) в исходное положение сначала под действием давления в камере A , а затем, после открытия клапана 11 , под действием давления в камере B . В устройстве предусмотрен специальный винт, при помощи которого регулировали сечение дросселя 12 и соответственно давление в камере A при прямом ходе и части обратного хода поршня 7 , пока не откроется клапан 11 . При полностью закрытом дросселе 12 давление в камере A определяется смещением поршня, упругостью стенок цилиндра камеры A и сжимаемостью жидкости, при открытом — давлением газа в верхней части камеры B .

Для использования маятникового копра с целью исследования взаимодействия системы “боек – инструмент” с горной породой проведена его доработка: спроектирован и изготовлен укороченный швеллер-основание 1 (рис. 2), снабженный для устойчивости лапами 4 с резьбовыми отверстиями для болтов 5 . В обойму перед бойком вставляли инструмент 3 с клиновидной или сферической ударной частью, который во время опытов упирали в поверхность мраморного блока.

В экспериментах использовали боек массой 11.25 кг и длиной 0.58 м, его ударная часть имела сферическую форму. Инструменты имели одинаковую длину, равную 0.16 м, но разную массу: 5 ; 9.6 и 15 кг. В случае взаимодействия с демпфирующим устройством и металлической плитой применялись инструменты со сферической ударной частью (рис. 3), при взаимодействии с мраморным блоком — со сферической и клиновидной (рис. 2) ударными частями. Угол раствора клина составлял 60° .

При помощи оптического датчика ДС, представляющего собой две пары лазеров и фотодиодов (рис. 1), расположенных на расстоянии $L = 5$ мм и регистрировавших моменты T_1 и T_2 прохождения лучей передним торцом бойка, определяли скорости бойка v_{P-} до и v_{P+} после удара. Сигнал, регистрируемый при прохождении торцом бойка лучей лазера, представлял собой двойную прямую и обратную ступеньки. Погрешность определения скорости состояла из погрешности измерения расстояния между лучами лазеров L и погрешностью измерения по осциллограммам времени прохождения этого расстояния бойком $T = T_2 - T_1$ и в проведенных экспериментах не превышала 12% .

Для измерения ускорений a_{Ins} и бойка a_P использовались вибропреобразователи АР33 фирмы ГлобалТекст, которые крепились на торцевые поверхности соответствующих элементов, и усилители заряда фирмы Bruel&Kjaer 2651. Общая погрешность измерений включала систематическую (обратное отношение сигнал – шум) и случайную погрешности, которые в сумме не превышали 5.5% .

Скорости бойка v_P и инструмента v_{Ins} определялись интегрированием сигналов с соответствующих вибропреобразователей. Корректная индивидуальная обработка интегрирования сигналов вибропреобразователя на бойке позволяла получить суммарное изменение скорости бойка при его взаимодействии с преградой, отклонение которого от соответствующей величины, зарегистрированной оптическим датчиком ДС, как правило, не превышало 15% .

Сигналы от датчиков регистрировались через аналого-цифровой преобразователь L-Card E-440 на персональном компьютере и обрабатывались при помощи программы PowerGraph 3.3.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Проведено несколько серий экспериментов с ограничителями (демпфирующим устройством, металлической плитой и мраморным блоком), а также серия ударов без ограничителя. В каждой серии использовали разные инструменты и варьировали предударную скорость бойка. В случае ударов по демпфирующему устройству варьировали также затяжку регулировочного

винта. Следует заметить, что разброс значений измеряемых параметров от удара к удару при неизменных условиях испытаний не превышал 6%, что говорит о стабильной работе оригинального разъема боек – подвес и удовлетворительной повторяемости результатов, получаемых с помощью стенда и отработанных методик.

В случае взаимодействия системы “боек – инструмент” с демпфирующим устройством, свойства которого изменялись затяжкой дроссельного винта, и мраморным блоком при ударе по нему инструментом со сферической и клиновидной ударными частями в осциллограммах скорости бойка и инструмента можно выделить следующие фазы (рис. 4, 5): 1-я — фаза переднего фронта осциллограммы скорости длительностью t_{ϕ} , 2-я — фаза положительного ударного импульса в инструменте длительностью t_{+} , 3-я — фаза, окончание которой происходит в момент повторного взаимодействия бойка и инструмента, длительностью t_2 .

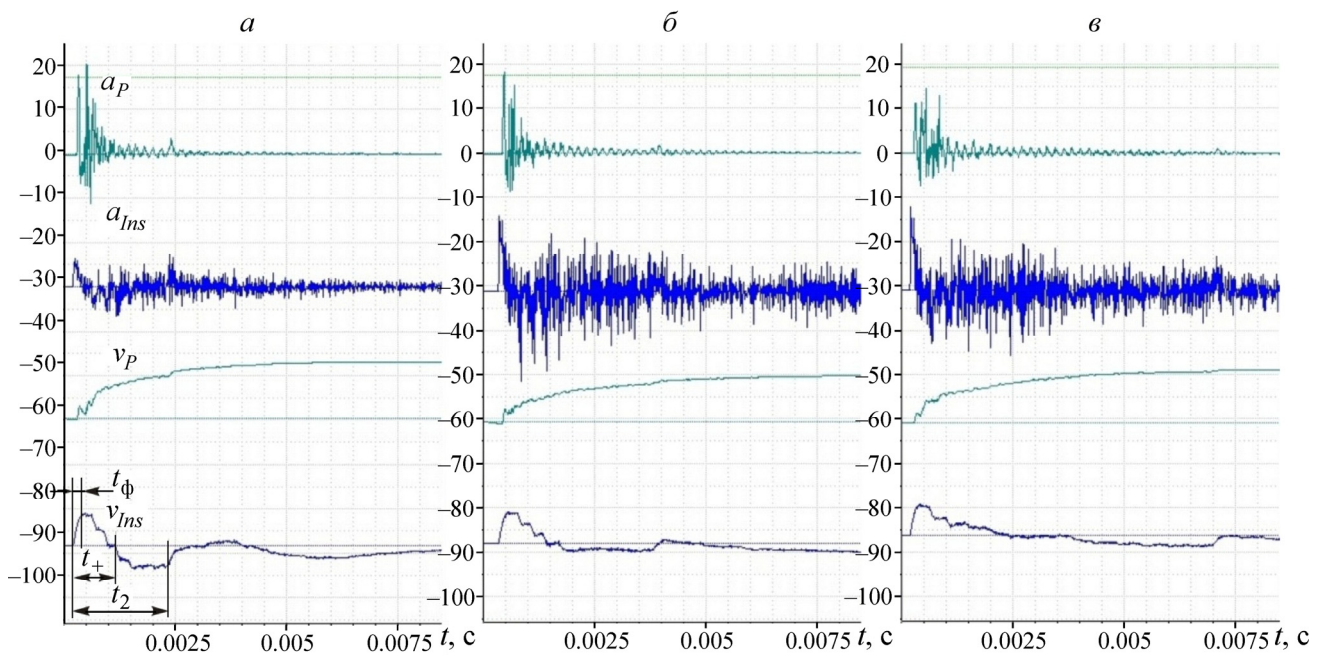


Рис. 4. Осциллограммы ускорений инструмента a_{Ins} и бойка a_p и полученных интегрированием скоростей инструмента v_p и бойка v_{Ins} при взаимодействии системы “боек – инструмент” с демпфирующим устройством при затяжке регулировочного винта буфера 0 (а), 0.5 (б) и 2 (в) оборота. Масса инструмента 9.6 кг; t_{ϕ} — длительность фронта; t_{+} — длительность положительной фазы; t_2 — период времени до повторного взаимодействия бойка и инструмента

Время 1-й фазы t_{ϕ} , в течение которой происходит разгон инструмента при взаимодействии с бойком, соответствует положительному куполу на осциллограмме ускорения инструмента. Оно хорошо коррелирует со временем соударения по контактной теории Герца и зависит только от характеристик соударяющихся бойка и инструмента. Времена t_{+} и t_2 определяются в основном характеристиками демпфирующего устройства. Как следует из представленных записей, наиболее информативными являются осциллограммы с датчика ускорения, прикрепленного к инструменту.

Анализируя полученные осциллограммы, можно отметить, что при наличии нежесткой преграды динамика процесса при данном соотношении масс и геометрических размеров бойка и инструмента состоит из их первичного взаимодействия (1-я фаза), длительность которого определяется величиной t_{ϕ} , свободного движения бойка и движения инструмента под действием

реакции со стороны демпфирующего устройства или мраморного блока (2-я фаза), которое после прохождения инструментом положительной фазы t_+ приводит к его возвратному движению и повторному взаимодействию с бойком через время t_2 (по окончании 3-й фазы).

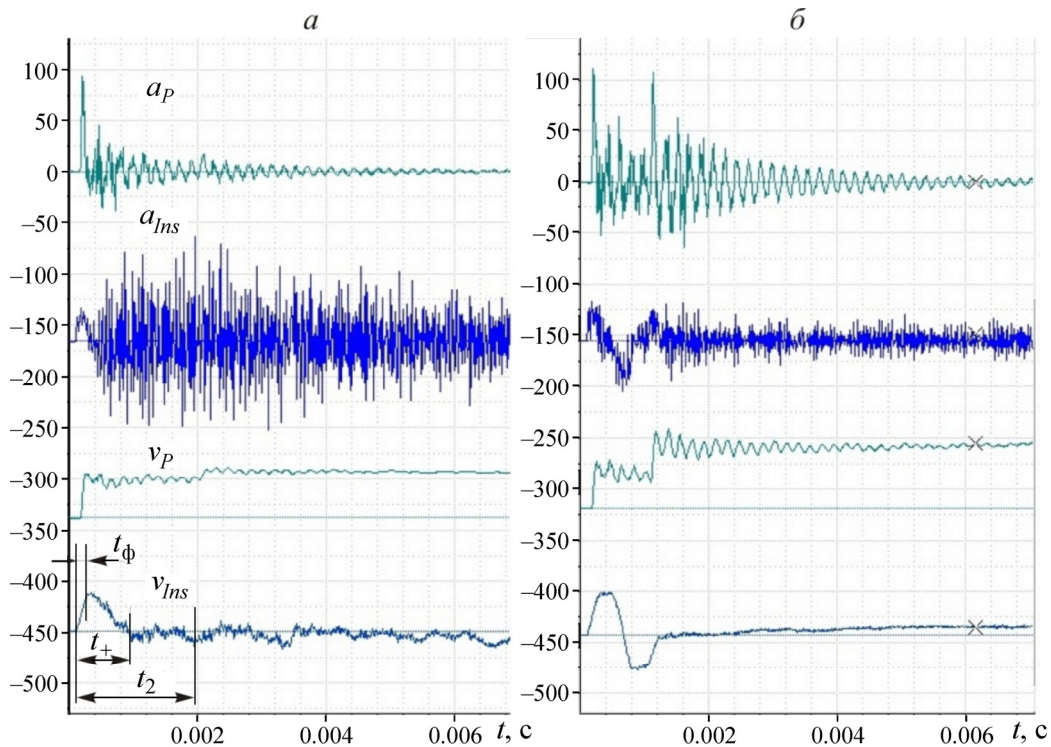


Рис. 5. Осциллограммы a_{Ins} , a_P , v_{Ins} , v_P , полученные при взаимодействии системы “боек–инструмент” с мраморным блоком. Масса инструмента 9.6 кг: a — инструмент с клиновидной ударной частью; b — инструмент со сферической ударной частью. Обозн. см. на рис. 4

При этом картины процессов при ударе инструментов с клиновидной ударной частью по мраморному блоку (рис. 5а) и инструмента со сферической ударной частью по поршню демпфирующего устройства при затяжке регулировочного винта $n = 0.5$ об. (рис. 4б), а также инструментов со сферической ударной частью по мраморному блоку (рис. 5б) и по поршню демпфирующего устройства при затяжке $n = 0$ об. (рис. 4а) попарно качественно схожи. Некоторые результаты опытов приведены в таблице и показывают удовлетворительное количественное соответствие указанных пар. В последней строке таблицы представлены результаты опыта с клиновидным инструментом массой 5 кг и преградой — мраморным блоком. Из сравнения 5-й и 8-й строк таблицы, условия опытов для которых различаются только массой инструмента, видно, что время t_2 ударного импульса при взаимодействии с преградой в виде мраморного блока повышается с увеличением массы инструмента. Коэффициент восстановления скорости бойка немного уменьшается, остальные параметры остаются примерно одинаковыми. Таким образом, задавая соответствующим образом параметры демпфирующего устройства, можно достаточно хорошо смоделировать динамику процесса взаимодействия системы “боек–инструмент” с горным массивом в лабораторных условиях.

Приведенные на рис. 6 осциллограммы для случаев жесткой преграды и ее отсутствия являются предельными случаями. Они помогают лучше разобраться в предыдущих осциллограммах, подчеркивая качественные и количественные различия между ними. Единственным параметром,

значение которого мало различается для всех проведенных экспериментов, является длительность соударения (1-я фаза), которая на рис. 4–6 обозначена временем переднего фронта ударного импульса скорости t_ϕ (таблица). Она определяется в основном свойствами взаимодействующих между собой бойка и инструмента, и в этом параметре нет информации о взаимодействии инструмента с массивом или демпфирующим устройством. Параметр t_+ — длительность положительной фазы на осциллограмме скорости — это время достижения инструментом точки возврата; вполне естественно, что при ударе о жесткую преграду он имеет наименьшее значение. Параметр t_2 на осциллограммах рис. 4, 5 определяет начало заключительной фазы взаимодействия инструмента с демпфирующим устройством или массивом, на осциллограммах взаимодействия инструмента с металлической плитой (рис. 6) этот момент не обнаружен.

Скорость бойка до и после удара и характерное время ударного импульса в инструменте

Номер опыта	Рисунок	Преграда	v_{p-} , м/с	v_{p+} , м/с	t_ϕ , мс	t_+ , мс	t_2 , мс
07dec11_37	4a	Демпфер, затяжка 0	4.07	1.1	0.175	0.95	2.18
07dec11_39	4б	Демпфер, затяжка 0.5	3.85	0.47	0.15	1.35	3.5
07dec11_45	4в	Демпфер, затяжка 2.0	4	0.88	0.12	3.5	6.75
01nov12_10	5a	Мраморный блок, инструмент с клиновидной ударной частью	4.58	0.55	0.17	0.97	1.96
01nov12_13	5б	Мраморный блок, инструмент со сферической ударной частью	4.4	2.68	0.16	0.58	0.93
22jun12_4	6a	Металлическая плита	2.29	1.34	0.13	0.25	—
22jun12_7	6б	Без преграды	1.72	—	0.18	—	—
01nov12_5	—	Мраморный блок, инструмент с клиновидной ударной частью	4.58	0.62	0.17	0.84	1.08

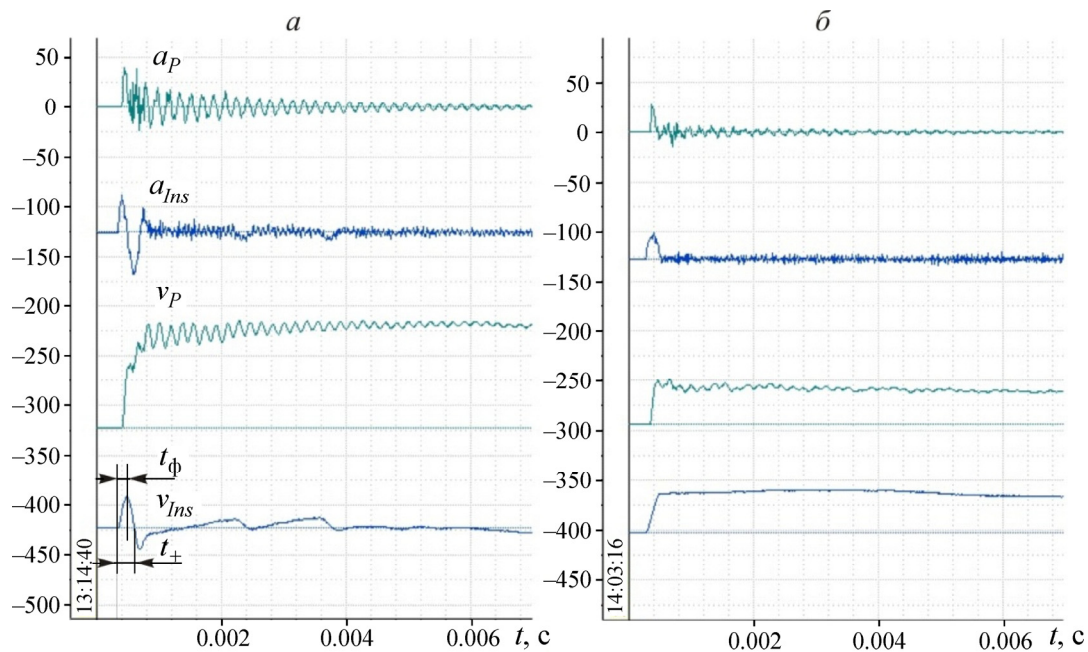


Рис. 6. Осциллограммы a_{ins} , a_p , v_{ins} , v_p , полученные при взаимодействии системы “боек – инструмент” с металлической плитой (а) и при отсутствии ограничителя (б). Масса инструмента 9.6 кг. Обозн. см. на рис. 4

На рис. 7 представлены полученные в опытах с демпфирующим устройством зависимости коэффициента восстановления скорости бойка $R = v_{P+}/v_{P-}$ от размера дросселирующего отверстия, характеризующего гидравлическое сопротивление между параметрами A и B устройства (см. рис. 3) и в опытах определяемого величиной зазора h между регулировочным винтом и его седлом.

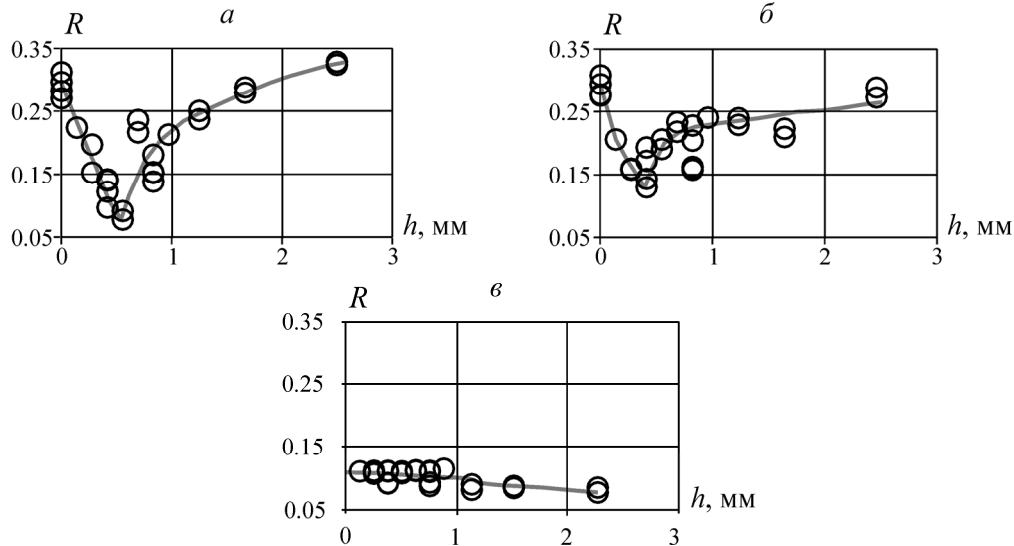


Рис. 7. Зависимости коэффициента восстановления скорости бойка R от оборотов n регулировочного винта, характеризующего сопротивления дросселя: a — инструмент массой 5 кг; b — инструмент массой 9.6 кг; v — инструмент массой 15 кг

Можно видеть, что при использовании инструмента массой меньшей, чем масса бойка, можно в достаточно широких пределах варьировать коэффициент R : его изменение при массе инструмента 5 кг составляет 0.08–0.33, а при массе 9.6 кг — 0.13–0.30. При массе инструмента 15 кг этот показатель изменяется слабо. Особенностью работы демпфирующего устройства является то, что при $h \approx 0.4$ мм R – h -зависимости проходят через минимумы. Такое поведение устройства, по-видимому, связано с диссипацией кинетической энергии при прохождении жидкости через дросселирующее отверстие, которая отсутствует, когда оно полностью закрыто или полностью открыто. В первом случае реакция демпфирующего устройства на удар определяется в основном поведением жидкости в камере A , а во втором — газа и жидкости в камере B . Это подтверждают и диаграммы скорости инструмента, полученные при разных затяжках регулировочного винта (рис. 4а–в).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан стенд с использованием маятникового копра, позволяющий моделировать и исследовать динамику ударного взаимодействия системы “боек–инструмент–горный массив” с изменением скорости бойка, масс бойка и инструмента.

2. Осциллограммы ударных импульсов в бойке и инструменте, полученные в опытах, показывают возможность при изучении динамики ударных систем, создаваемых для разрушения горных пород, моделировать горный массив газожидкостным демпфирующим устройством с соответствующим образом подобранными параметрами.

3. Проведенные эксперименты подтвердили возможность моделировать коэффициент восстановления скорости бойка в диапазоне $R = 0.05–0.3$ при помощи газожидкостного демпфирующего устройства.

Авторы благодарят ведущего инженера Г. Г. Васильева за помощь при создании стенда и проведении экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Городилов Л. В.** Разработка основ теории гидроударных систем объемного типа для исполнительных органов горных и строительных машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Новосибирск, 2010.
2. **Городилов Л. В.** Исследование динамики объемных гидроударных систем двухстороннего действия. Ч. II. Влияние на характеристики конструктивных особенностей устройств и условий их взаимодействия с горным массивом // ФТПРПИ. — 2013. — № 3.
3. **Алимов О. Д., Басов С. А.** Гидравлические виброударные системы. — М.: Наука, 1990.
4. **Червов В. В., Смоленцев А. С.** Стенд для исследований и испытаний пневмомолота // ФТПРПИ. — 2007. — № 6.
5. **Патент 2438108 РФ.** Стенд для испытаний устройств ударного действия / П. Я. Фадеев, В. Я. Фадеев, Л. В. Городилов // Опубл. в БИ. — 2011. — № 36.
6. **Городилов Л. В., Кудрявцев В. Г.** Моделирование процесса взаимодействия “боек–инструмент–горный массив” / Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды: тр. конф. с участием иностр. ученых. Т. 3. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2010.

Поступила в редакцию 20/II 2013