

Регистрация истории замедления в мишени геометрически подобных ударников

© М.Ю. Сотский, В.А. Велданов

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Представлены результаты исследований по адаптации измерительной технологии пьезометрии к высокоскоростным процессам терминальной баллистики. Получены регистрации истории замедления ударника для случая проникания ударника в мишень с эрозией материала при скоростях свыше 1000 м/с. Изложены особенности частного варианта разработанной авторами статьи технологии акселерометрии терминальной баллистики и конструктивные данные применяемого специального пьезоакселерометра АСМ-4. Показана с применением теории подобия и моделирования возможность взаимного пересчета одноименных текущих параметров рассматриваемых процессов в условиях геометрического подобия. Эта возможность пересчета обоснована результатами сравнения данных лабораторного и натурного (реализованного со значением коэффициента геометрического подобия 4,33) испытаний.

Ключевые слова: ударник, терминальная баллистика, пьезометрия, история замедления, геометрическое подобие, пересчет параметров.

Введение. Данные о параметрах высокоскоростных ударных процессов можно получить из испытаний, проведенных с применением снабженных измерительным узлом ударников [1—10] и мишеней различающихся геометрических размеров [5]. Наиболее достоверные данные устанавливаются в ходе испытаний с применением технологий акселерометрии в условиях прямого взаимодействия ударника с мишенью. Известны примеры исследований с применением таких технологий в приближенных к реальным условиям функционирования ударников [1—7]. Диапазон значений начальных условий таких испытаний и величин, которые получают с использованием автономных регистрирующих систем, монтируемых в ударнике, ограничены возможностями комплектующих по динамической стойкости и минимальным габаритам. Достигнутые к настоящему времени значения по скоростям удара по бетонной мишени составляют 460 м/с [1] и 820 м/с [3], а также уровня максимальных замедлений ударника (в обозначениях авторов [2]) — 142,000g. При пробитии стальных мишеней измерения реализованы при скоростях до 617 м/с с пиковыми значениями замедлений [6] — 145,000g (или $-142,2 \times 10^4$ м/с²). Имеются примеры отечественных разработок: создан, отработан и внедрен в практику проведения испытаний ударостойкий малогабаритный автономный регистратор ускорений БИК [7]. Диапазон измеряемых ускорений $\pm 10 \times 10^4$ м/с². Регистратор БИК внесен в Государственный реестр средств измерений РФ.

В работах [8—10] сформулирована и представлена совокупность элементов, необходимых и достаточных для определения технологий с применением пьезометрии при регистрации параметров процессов проникания ударников в мишени в диапазоне скоростей удара свыше 100 м/с как технологии акселерометрии терминальной (конечной) баллистики (ТБА-технология). Разработаны для ТБА-технологий системы непрерывной электрической связи (НЭС-системы) различающихся видов и выделены особенности их применения с учетом начальных условий проведения испытаний. Данные об истории замедлений ударников в мишенях могут быть использованы для определения динамических механических свойств упругопластических сред (материалов мишеней и ударников, в том числе металлов, бетона, грунтов, сотовых конструкционных материалов) и для оценки достоверности моделей, закладываемых в программы экспериментально-теоретического расчета и численного моделирования процессов терминальной баллистики [11—14].

Методика проведения эксперимента. В данном исследовании экспериментально и теоретически проанализирован процесс проникания в мишень удлиненных ударников, подвергающихся эрозии. Реализованы в опытах регистрации истории замедления в мишени в процессах соударения с металлической мишенью металлических измерительных ударников — стержней при скоростях до 1,5 км/с. Измерительные ударники снабжены малогабаритными пьезокерамическими акселерометрами, а непрерывная электрическая связь с акселерометром до окончания процесса проникания осуществлена в условиях метания мишени на ударник. Проведение испытаний по схеме обратного баллистического метания позволяет расширить скоростной диапазон проведения регистраций и обеспечить получение данных от датчиков, закрепляемых на ударниках [15]. Такие исследования, кроме того, предоставляют возможность комплексного применения различных типов контрольно-измерительных средств, использование которых затруднено или даже невозможно в полномасштабных испытаниях по схеме прямого взаимодействия ударников с мишенями. Применен частный вариант НЭС-системы [8—10]: проводная связь с акселерометром при обратном взаимодействии с мишенью и пьезоакселерометр серии АСМ-4 (по патенту RU № 1741082). Пьезоакселерометр оригинального исполнения с плоским элементом из пьезокерамики ЦТС-19 монтируется по специальной технологии (патент RU № 1799744). Линейность преобразования для указанных пьезоакселерометров в диапазоне действующих на чувствительный элемент нагрузок и замедлений до -10^7 м/с^2 установлена экспериментально.

Ранее было показано [16], что рекомендуемое соотношение масс метаемой модели мишени M и ударника m при их обратном

взаимодействии должно превышать значение 40. При этом условии значение регистрируемого в испытаниях ускорения dV/dt по амплитуде и по времени процесса будет совпадать по модулю со значением замедления $-dV/dt$ такого же ударника в полубесконечной мишени (мишень неограниченной массы) при прямом взаимодействии с погрешностью, не превышающей 3%. Таким образом, зарегистрировав в опыте историю ускорения ударника в условиях обращенного соударения с мишенью и зная соотношение масс ударника и мишени γ_R , можно пересчитать результат опыта с использованием рекомендуемых [16] выражений, чтобы определить историю замедления ударника в случае прямого взаимодействия этого же ударника с полубесконечной мишенью с начальной скоростью удара V_0 .

Результаты эксперимента. Натурный и модельный (лабораторный) процессы были исследованы средствами ТБА-технологии и теории подобия. На рис. 1 показаны подготовленные для лабораторных измерений геометрически подобные ударники из алюминиевого сплава, меди и стали, выполненные с коэффициентами геометрического подобия $k_{gs} = 2$ и $k_{gs} = 3$.

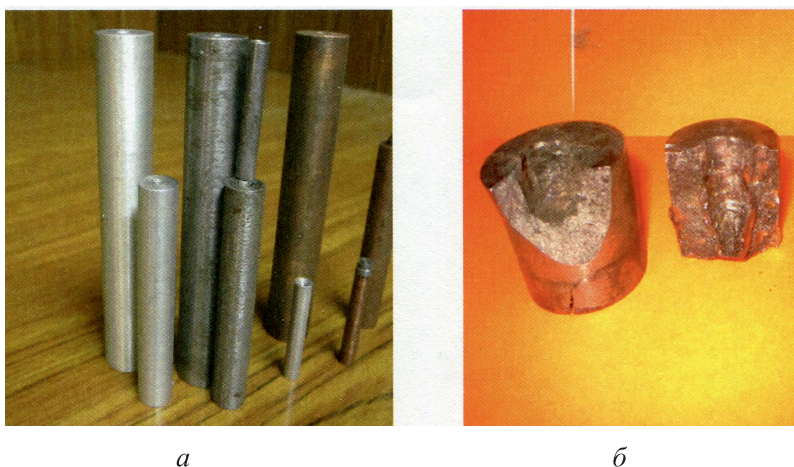


Рис. 1. Серия геометрически подобных ударников из различных материалов (а) и варианты каверн в метаемых мишенях после их остановки в уловителе (б)

В нашем случае геометрическое подобие определяется удлинением ударника — отношением длины ударника l к его диаметру d . Значение коэффициента k_{gs} задается отношением длин или диаметров большого и малого ударников. Каверны в уловленных мишенях характерны для процесса проникания в них удлинённых ударников

с эрозией материала. На торцевой поверхности медного ударника (в первом ряду справа) закреплен пьезоакселерометр АСМ-4. Вариант конструкции пьезоакселерометра и внешний вид показаны на рис. 2.

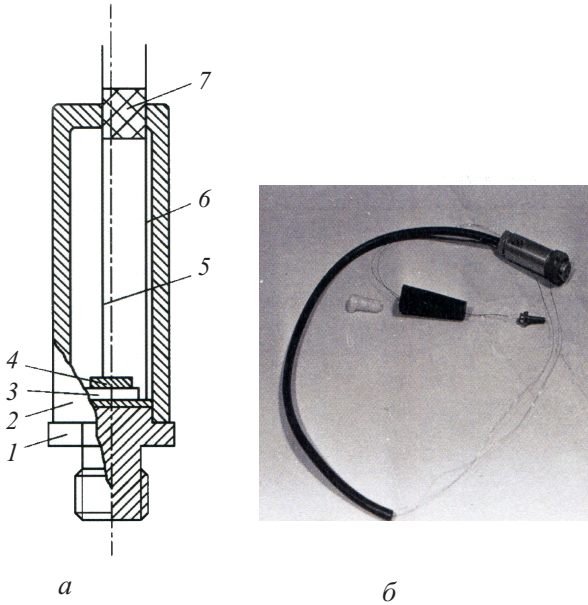


Рис. 2. Пьезоэлектрический акселерометр АСМ-4 в разрезе (а) и вид в состоянии неполной сборки (б):

1 — основание с узлом крепления; 2 — съемный корпус; 3 — пьезоэлемент; 4 — инерционный элемент; 5 и 6 — провода связи; 7 — съемная втулка

Данные о начальных условиях опытов в испытаниях, результаты которых приведены в настоящей работе, сведены в таблицу.

Начальные условия испытаний

Процесс	Материал / диаметр стержня, мм	Масса стержня, кг / удлинение	Скорость мишени, м/с	Материал мишени / диаметр / масса, кг	Датчик/ f_c , МГц
Натурный <i>n</i>	Сталь 45 / 3	0,202 / 15	1160	Сталь 45 / 125 / 8,7	АСМ-4/1,1
Модельный <i>m</i>	Сталь 30 / 3	0,00248 / 15	1078	Сталь 30 / 24 / 0,141	АСМ-4/1,1

Анализ определяющих параметров. Теоретически процесс взаимодействия с мишенью ударников в натурном и модельном процессах рассмотрен в условиях геометрического подобия ударников при соблюдении подобия материалов и условий встречи ударников с мишенью:

$$\frac{(l_0)_n}{(l_0)_m} = \frac{(d_0)_n}{(d_0)_m} = k_{gs}; \quad \begin{aligned} (\rho_1)_n &= (\rho_1)_m; \\ (\rho_2)_n &= (\rho_2)_m; \\ (V_{02})_n &= (V_{02})_m, \end{aligned} \quad (1)$$

где n и m — индексы натурального и модельного процессов; 1 и 2 — индексы мишени и ударника соответственно; l_0 , d_0 и V_{02} — начальная длина, диаметр стержня и скорость встречи мишени с ударником; ρ — плотность материалов мишени и ударника.

С применением первой и второй теорем подобия из совокупности определяющих параметров исследуемого процесса составлены системы критериев подобия натурального и модельного процессов:

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{V_{02}t}{l_{02}}; \quad P_2 = \frac{l_{02}}{d_{02}}; \quad P_3 = \frac{\rho_1 V_{02}^2}{H_{д1}}; \quad P_4 = \frac{\rho_2 V_{02}^2}{\sigma_{тд2}}; \\ P_5 &= \frac{c_2}{c_1}; \quad P_6 = \frac{\rho_2}{\rho_1}; \quad P_7 = \frac{\sigma_{тд2}}{H_{д1}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где c — скорость звука в материалах; $\sigma_{тд}$ и $H_{д}$ — динамические предел текучести и твердость.

В рамках поставленной задачи (1) критерии P_2 , P_5 и P_6 в системе (2) заведомо соблюдаются. Отклонения от подобия, вызываемые различием скоростей деформирования, с учетом высоких значений этих скоростей рассматриваются как допустимые, а само подобие — приближенным. Известно, что при этих условиях будут одинаковыми безразмерные кинематические и динамические параметры ударника и мишени в соответствующие моменты времени. Это позволяет проводить взаимный пересчет однородных параметров модельного процесса на натуральный в сходственные моменты времени.

В процессах, изменяющихся с течением времени t , основным критерием подобия, характеризующим одинаковость протекания процессов во времени, является критерий гомохронности

$$C_{Ho} = \frac{Vt}{l},$$

где l и V — характерные линейный размер и скорость процесса; t — характерный для нестационарного движения промежуток времени.

Из условия соблюдения критерия гомохронности запишем:

$$C_{\text{Ню}} = (P_1)_n = (P_1)_m.$$

Тогда
$$P_1 = \frac{V_{02}t}{l_{02}}; \quad t_n = \frac{(V_{02})_m (l_{02})_n}{(V_{02})_n (l_{02})_m} t_m;$$

а так как
$$(l_{02})_n = k_{gs} (l_{02})_m \quad \text{и} \quad (V_{02})_n = (V_{02})_m,$$

то
$$t_n = k_{gs} t_m.$$

Из условия равенства напряжений текучести материала $\sigma_{\text{ТД}}$ на границе упругой и пластической частей ударника записываем соотношение для действующих в натурном и модельном процессах сил сопротивления движению ударника F :

$$F_n = k_{gs}^2 F_m.$$

Из соотношений длин упругой части l_g ударников, а следовательно, и масс m_g в модельном и натурном случаях устанавливаем, что $(m_{e2})_n = k_{gs}^3 (m_{e2})_m$. Это означает, что ускорения, испытываемые натурным ударником, в k_{gs} раз меньше, чем у модельного:

$$(dV/dt)_n = \frac{k_{gs}^2 F_m}{k_{gs}^3 (m_{e2})_m} = \frac{1}{k_{gs}} (dV/dt)_m.$$

Аналитически установленные взаимосвязи между основными параметрами натурального и модельного процессов обобщены выражением $A_n = (k_{gs})^z A_m$. Для ряда параметров, обозначенных символом A , ниже приведены установленные значения показателя степени z при коэффициенте геометрического подобия k_{gs} :

Значения показателя степени

A	l	t	τ, τ_p	F	dV/dt	M
z	1	1	1	2	-1	3

Здесь l — длина упругой части ударника; M — масса упругой части стержня; τ и τ_p — период колебательных процессов в ударнике и полное время процесса проникания; F — сила сопротивления; dV/dt — ускорения свободного торца упругой части ударника.

При высокоскоростной оптической регистрации модельного процесса (рис. 3) можно наблюдать функционирование НЭС-

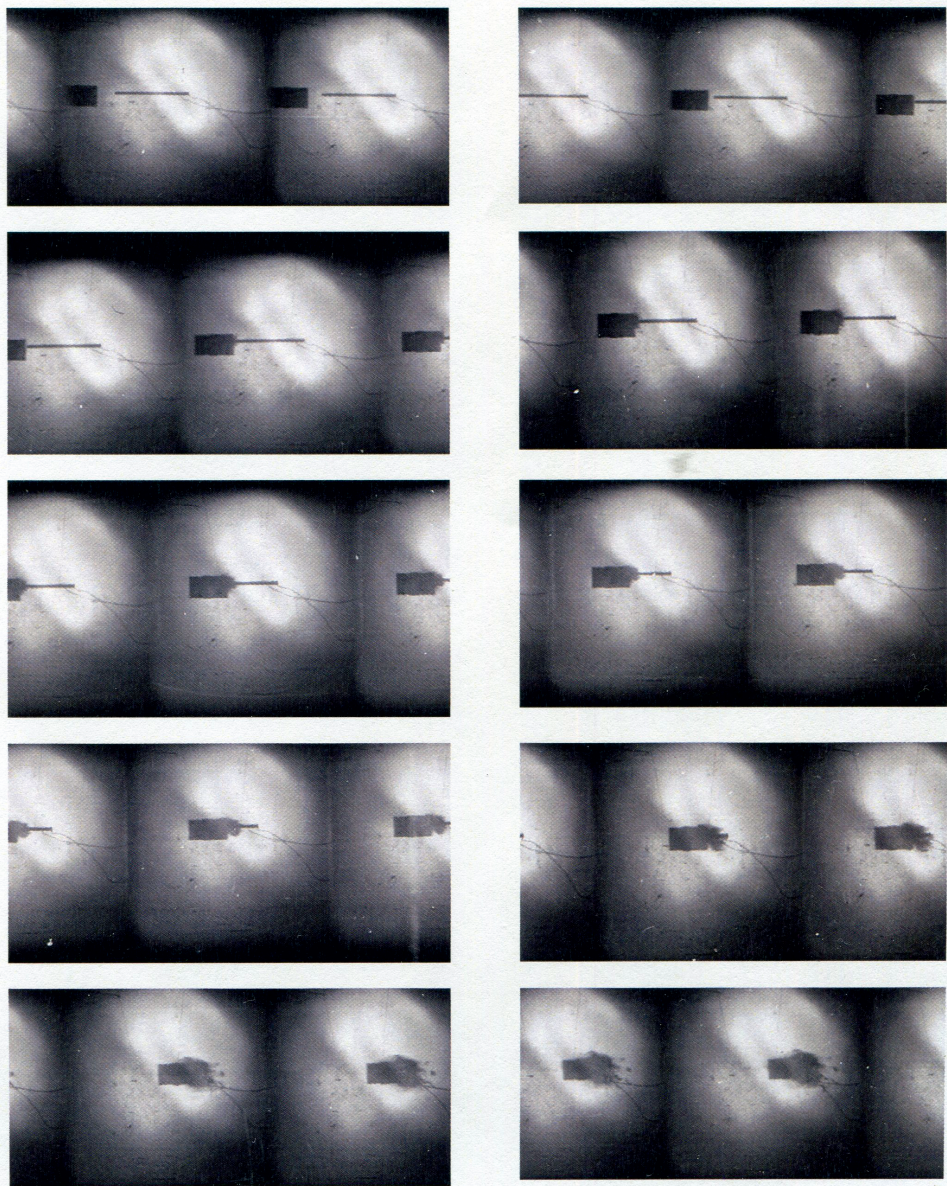


Рис. 3. Высокоскоростная оптическая съемка процесса при скорости 1078 м/с и с начальными условиями модельного процесса (t в таблице). Время между кадрами 5,18 мкс

системы во времени: взаимодействие от начала удара мишени по подвешенному на нитях ударнику до окончания процесса проникновения ударника в мишень и в ходе дальнейшего совместного перемещения мишени и ударника.

Осциллограмма, записанная во время данного процесса, представлена на рис. 4.

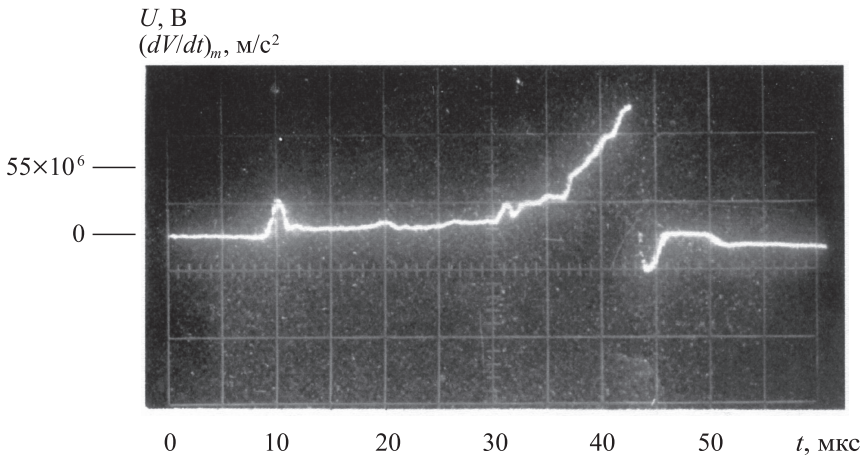


Рис. 4. Оциллограмма, регистрируемая во время испытаний с модельным ударником при скорости 1078 м/с (начальные условия m в таблице)

Для условий проведения опыта общая погрешность измерений по ТБА-технологии [8—10], основанная на суммировании частных погрешностей по правилам математической статистики, составляет 11,8 %. Следовательно, для любого момента времени результат измерения при доверительной вероятности 0,95 будет находиться в доверительном интервале, равном 23,6 % от регистрируемого на оциллограмме значения ускорения.

На оциллограмме начало регистрации электрического сигнала U совпадает с началом процесса взаимодействия. Электрический сигнал от пьезоакселерометра АСМ-4, регистрируемый в вольтах, пропорционален ускорению $(dV/dt)_m$ свободного торца упругой части ударника. Масштаб оциллограммы в единицах ускорения приведен на рис. 4. Участок регистрации с нулевой амплитудой замедления определяется временем пробега упругой волны напряжения по ударнику от головной части ударника до его свободного торца, на котором закреплен пьезоакселерометр. Волна напряжения в материале ударника отражается от свободного торца и в виде волны разряжения движется по направлению к головной части ударника. В некоторой области происходит встреча ее с зоной, разделяющей упругую и пластическую части ударника. В результате взаимодействия волн по упругой части ударника распространяется волна напряжения. Момент отражения волны от свободного торца ударника вновь фиксируется на оциллограмме пульсацией амплитуды замедления. Характер зафиксированной на оциллограмме истории ускорения упругой части ударника (истории замедления относительно мишени) отражает закономерности исследуемого

процесса, установленные и сформулированные ранее [8—10]. Изменения вида истории ускорения определяются удлинением ударника, материалами ударника и мишени, начальной скоростью взаимодействия. Установлено, что конечная стадия процесса проникания, при которой упругая часть ударника перемещается относительно мишени со скоростями, не превышающими 10 % начальной скорости, составляет по длительности 20—30 % времени процесса. Величина отношения амплитуды первых пульсаций замедления к максимальной регистрируемой амплитуде замедления для ударников, проникающих в мишень с эрозией материала, лежит в пределах 0,15—0,5. Значение увеличивается с удлинением ударника и уменьшением скорости.

Результаты сопоставления историй замедления. Обоснованием возможности пересчета параметров натурального и модельного процессов при физическом моделировании в условиях геометрического подобия могут послужить результаты сравнения данных натуральных (n в таблице) и модельных (m в таблице) испытаний при соблюдении $k_{gs} = 4,33$, представленные на рис. 5—7.

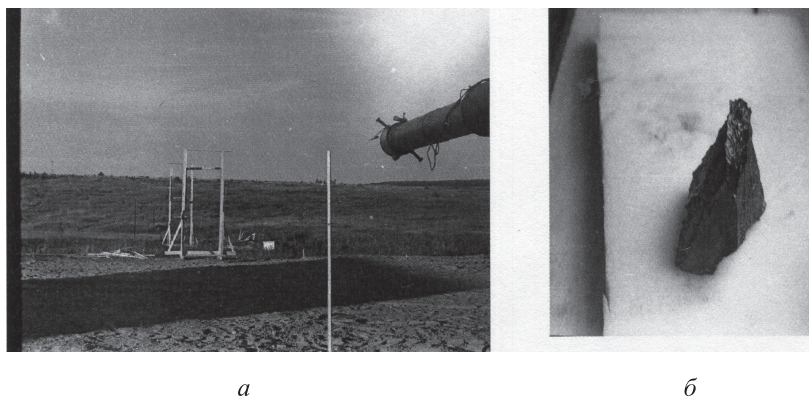


Рис. 5. Вид баллистической трассы в направлении перемещения мишени (а) и фрагмент мишени (б), остановленной уловителем

Особенности проведения натуральных испытаний отражены на рис. 5. После вылета из ствола 125-мм мишень взаимодействует с натурным ударником (начальные условия n в таблице). В отдалении установлены стойки системы регистрации скорости. Выстрел производится в холм-уловитель. На фрагменте разрушенной мишени (при скорости соударения 1160 м/с) наблюдается поверхность каверны, характерной для процессов проникания с эрозией. Вариант размещения натурального ударника до выстрела показан на рис. 6.

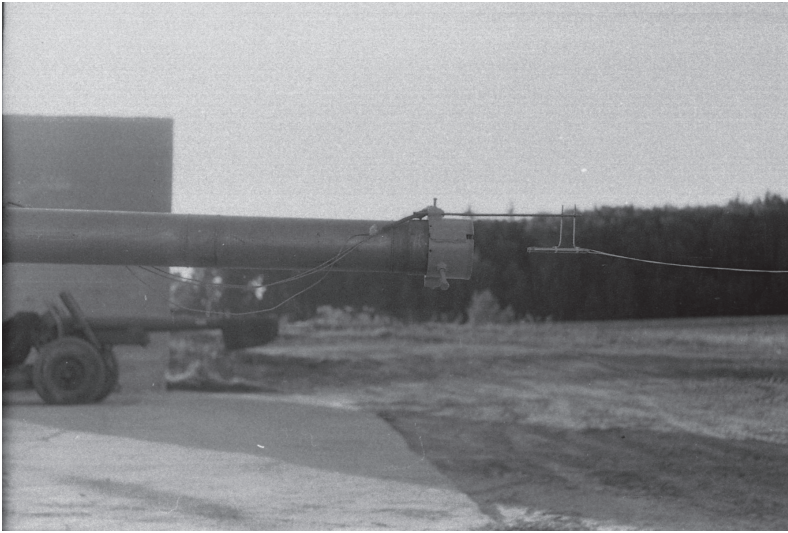


Рис. 6. Положение натурального (n) ударника и элементов НЭС-системы до выстрела

Результат регистрации истории изменения ускорения (замедления относительно мишени) упругой части натурального ударника обозначен знаком n на рис. 7.

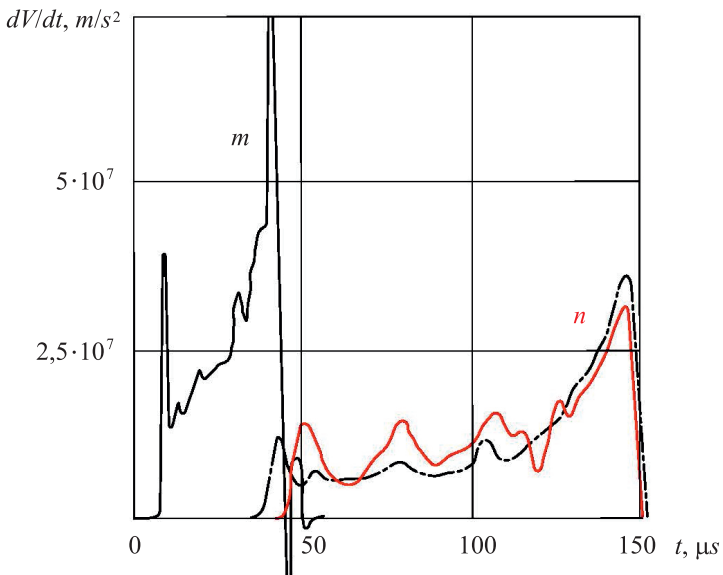


Рис. 7. Сопоставление истории замедления в мишени натурального ударника (n), регистрируемой в натуральных испытаниях, и истории замедления, рассчитываемой (пунктирная линия) с использованием регистрации (m) из испытаний геометрически подобной модели ударника

Заключение. Для ряда кинематических, геометрических и массовых параметров процесса, обозначенных символом A , установлены значения показателя степени z при коэффициенте геометрического подобия k_{gs} . Возможности пересчета параметров процесса при физическом моделировании в условиях геометрического подобия подтверждены результатами сравнения регистрируемой истории замедления в мишени натурального и модельного ударников. Опыты проведены с соблюдением величины коэффициента геометрического подобия $k_{gs} = 4,33$. Начальные условия проведенных испытаний близки по скоростям, материалам ударников и мишеней, а также по соотношениям масс ударника и метаемой модели мишени.

Авторы благодарят сотрудников и выпускников кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана, способствовавших выполнению данного исследования. Особая благодарность А.М. Ручко, О.Е. Ячнику, С.В. Соколову, М.В. Рудакову и Ю.С. Бондареву за творческое участие в развитии частных вопросов представленной измерительной технологии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 15-08-08319-а).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Forrestal M.J., Frew D.J., Hickerson J.P., Rohwer T.A. Penetration of Concrete Targets with Deceleration-Time Measurement. *Int. J. Imp. Eng.*, 2003, vol. 28 (5), pp. 479–497.
- [2] Chu Chengqun, Ren Yongfeng, Zhang Qingzhi, Zheng Yongqiu, Liu Xin. A Small-sized Hige-performance Storage Module for Hige-g Measurement. *TELEKOMNIKA Indonesian J. of Electrical Eng.*, 2014, vol. 12, no. 2, pp. 1265–1270.
- [3] Gao Jin-zhong, SUN Yuan-cheng, DU Lian-ming, CHEN Guang-yan, HUAN Yu-chuan. Present Research and Development on Measurement Technology of Penetration into Hard Targets with Hard Recovery Recorder. *Proc. 25th Int. Symp. on Ballistics*. Beijing, China, 2010, vol. 2, pp. 1187–1192.
- [4] Sibeaud J.-M., Delmas A., Hottelet A., Zappa D.-P. Kinetic Energy Perforation of Concrete Slabs: Investigation of Embedded High G-Load Sensing. *Proc. 27th Int. Symp. on Ballistics*. Freiburg, Germany, 2013, vol. 2, pp. 1557–1567.
- [5] Frew D.J., Forrestal M.J., Cargile J.D. The Effect of Concrete Target Diameter on Projectile Deceleration and Penetration Depth. *Int. J. Imp. Eng.*, 2006, vol. 32, no. 10, pp. 1584–1594.
- [6] Wendong Zhang, Lujiang Chen, Jijun Xiong, Youchun Ma. Ultra-high g deceleration-time measurement for the penetration into steel target. *Int. J. Impact Eng.*, 2007, vol. 34, pp. 436–447.
- [7] Батарев С.В., Калмыков П.Н., Кортюков И.И., Осокин А.П. Ударостойкий регистратор ускорений. *Сборник статей XXV Юбилейной Всероссийской научно-технической конференции школы семинара “Передача, прием, обработка и отображение информации о быстропотекающих процессах”*, 2014, Москва, РПА «АПП», с. 66–69.
- [8] Sotskiy, M.Yu., Veldanov V.A., Ruchko A.M., Vasilev A.Yu., Sotskiy Yu.M. Deceleration – Time Measured Projectile Penetration Tendency in Qualitatively Different Terminal Ballistics Processes. *Proc. 25th Int. Symp. on Ballistics*. Beijing, China, 2010, vol. 2, pp. 1070–1977.

- [9] Сотский М.Ю. О фундаментальных задачах исследования динамических механических свойств материалов с применением технологий акселерометрии. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*, 2011, № 4, часть 4, с. 1783–1786.
- [10] Сотский М.Ю., Велданов В.А., Пусев В.И., Ручко А.М., Сотский Ю.М. Влияние на точность получаемых данных повторяемости регистрации замедления ударника при проникании и в тесте Тейлора. *Известия вузов. Физика*, 2013, том 56, № 7/3, с. 98–100.
- [11] Велданов В.А., Марков В.А., Пусев В.И., Ручко А.М., Сотский М.Ю., Федоров С.В. Расчет проникания недеформируемых ударников в малопрочные преграды с использованием данных пьезоакселерометрии. *Журнал технической физики*, 2011, том 81, вып. 7, с. 94–104.
- [12] Велданов В.А., Марков В.А., Пусев В.И., Ручко А.М., Селиванов В.В., Сотский М.Ю., Федоров С.В. Применение акселерометрии для исследования динамических механических свойств материалов в сложных условиях проведения измерений. *Наука и образование: электронное научно-техническое издание*, 2012, №8. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/428828.html> DOI: 10.7463/0812.0428828 (дата обращения 27.05.2015).
- [13] Велданов В.А., Дудик Д.Е., Максимов М.А., Федоров С.В., Козлов В.С. Влияние угла атаки на проникание удлиненных ударников. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 1 (13). URL <http://engjournal.ru/catalog/machin/blasting/572.html> (дата обращения 27.05.2015).
- [14] Сотский М.Ю., Велданов В.А., Марков В.А., Пусев В.И., Селиванов В.В. Исследование процесса зондирования поверхностного слоя планет с применением измерительных моделей и сред-аналогов. *Инженерный вестник*, 2014, №11. URL <http://engbul.bmstu.ru/doc/751797.html> (дата обращения 27.05.2015).
- [15] Proud W.G., Lynch N., Marsh A., Field J.E. Instrumented Small Scale Rod Penetration Studies: The Effect of Pitch. *Proc. 19th Int. Symp. on Ballistics*, Interlaken, Switzerland, 2001, pp. 1289–1295.
- [16] Sotskiy M.Yu., Veldanov V.A., Sotskiy Yu.M., Dauriskikh A.Yu. Experimental and theoretical estimate impact conditions effects on strikers deceleration history in target. *Proc. 26th Int. Symp. on Ballistics*, Miami, USA, 2011, vol. 2, pp. 1468–1478.

Статья поступила в редакцию 02.07.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Сотский М.Ю., Велданов В.А. Регистрация истории замедления в мишени геометрически подобных ударников. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 5.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/mech/mdsb/1400.html>

Сотский Михаил Юрьевич родился в 1948 г., окончил Машиностроительный факультет МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1972 г. Канд. техн. наук, лауреат премии Ленинского комсомола в области науки и техники, член Международного баллистического общества (IBS), ведущий инженер Управления научной и инновационной деятельности МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: характеристики движения объектов в различных средах и динамические механические характеристики материалов и сред. e-mail: mikhail.sotskiy@gmail.com

Велданов Владислав Антонович родился в 1945 г., окончил Машиностроительный факультет МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1969 г. Канд. техн. наук, лауреат премии Совета Министров СССР за достижения в области механики, член Международного баллистического общества (IBS), доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: движение объектов и аппаратов в различных средах, прочность и разрушение материалов и конструкций. e-mail: vladislav.veldanov@gmail.com

Registration of deceleration history in a target of geometrically similar projectiles

© M.Yu. Sotskiy, V.A. Veldanov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article presents research results of adaptation of piezometry measuring technology to high-speed processes of terminal ballistics. We registered projectile deceleration history for a case of drummer penetration into a target with material erosion at speed over 1000 m/s is received. Features of private option of the technology of terminal ballistics accelerometry developed by the authors and constructive data of the applied special piezoelectric accelerometer ASM-4 are stated. A possibility of mutual recalculation of the current parameters of the same name of the considered processes in the conditions of geometrical similarity was shown with application of the theory of similarity and modeling. Data comparison results of the laboratory and natural (the coefficient of geometrical similarity realized with value 4,33) tests proved validity of recalculation possibility.

Keywords: *projectile, terminal ballistics, piezometry, deceleration history, geometrical similarity, recalculation of parameters.*

REFERENCES

- [1] Forrestal M.J., Frew D.J., Hickerson J.P., Rohwer T.A. Penetration of Concrete Targets with Deceleration-Time Measurement. *Int. J. Imp. Eng.*, 2003, vol. 28 (5), pp. 479–497.
- [2] Chu Chengqun, Ren Yongfeng, Zhang Qingzhi, Zheng Yongqiu, Liu Xin. A Small-sized Hige-performance Storage Module for Hige-g Measurement. *TELEKOMNIKA Indonesian J. of Electrical Eng.*, 2014, vol. 12, no. 2, pp. 1265–1270.
- [3] Gao Jin-zhong, SUN Yuan-cheng, DU Lian-ming, CHEN Guang-yan, HUAN Yu-chuan. Present Research and Development on Measurement Technology of Penetration into Hard Targets with Hard Recovery Recorder. *Proc. 25th Int. Symp. on Ballistics*. Beijing, China, 2010, vol. 2, pp. 1187–1192.
- [4] Sibeaud J.-M., Delmas A., Hottelet A., Zappa D.-P. Kinetic Energy Perforation of Concrete Slabs: Investigation of Embedded High G-Load Sensing. *Proc. 27th Int. Symp. on Ballistics*. Freiburg, Germany, 2013, vol. 2, pp. 1557–1567.
- [5] Frew D.J., Forrestal M.J., Cargile J.D. The Effect of Concrete Target Diameter on Projectile Deceleration and Penetration Depth. *Int. J. Imp. Eng.*, 2006, vol. 32, no. 10, pp. 1584–1594.
- [6] Wendong Zhang, Lujiang Chen, Jijun Xiong, Youchun Ma. Ultra-high g deceleration-time measurement for the penetration into steel target. *Int. J. Impact Eng.*, 2007, vol. 34, pp. 436–447.
- [7] Batarev S.V., Kalmykov P.N., Kortuyukov I.I., Osokin A.P. Udarostoiikiy registrator uskoreniy [Shockproof registrar of accelerations]. *Collection of articles of the XXV Jubilee All-Russian scientific conference of the school-seminar "Transfer, reception, processing and display of information on the fast-proceeding processes"*, 2014, Moscow, RPA "APR", pp. 66–69.
- [8] Sotskiy M.Yu., Veldanov V.A., Ruchko A.M., Vasilev A.Yu., Sotskiy Yu.M. Deceleration – Time Measured Projectile Penetration Tendency in Qualitatively Different Terminal Ballistics Processes. *Proc. 25th Int. Symp. on Ballistics*. Beijing, China, 2010, vol. 2, pp. 1070–1077.
- [9] Sotskiy, M.Yu. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta imeni N.I. Lobachevskogo — Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod*, 2011, no. 4, part 4, pp. 1783–1786.

- [10] Sotskiy M.Yu., Veldanov V.A., Pusev V.I., Ruchko A.M., Sotskiy Yu.M. *Izvestiya vuzov. Fizika — Russian Physics Journal*, 2013, vol. 56b no. 7/3, pp. 98–100.
- [11] Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.I., Ruchko A.M., Sotskiy M.Yu., Fedorov S.V. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki — Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 81, issue. 7, pp. 94–104.
- [12] Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.I., Ruchko A.M., Selivanov V.V., Sotskiy M.Yu., Fedorov S.V. *Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie — Science and Education: electronic scientific journal*, 2012, no. 8. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/428828.html> DOI: 10.7463/0812.0428828 (accessed 27.05.2015).
- [13] Veldanov V.A., Dudik D.E., Maximov M.A., Fedorov S.V., Kozlov V.S. *Inzhenernyi zhurnal nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovations*, 2013, issue. 1 (13). Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/blasting/572.html> (accessed 27.05.2015).
- [14] Sotskiy M.Yu., Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.I., Selivanov V.V. *Inzhenernyi vestnik — Engineering Bulletin*, 2014, no. 11. Available at: <http://engbul.bmstu.ru/doc/751797.html> (accessed 27.05.2015).
- [15] Proud W.G., Lynch N., Marsh A., Field J.E. Instrumented Small Scale Rod Penetration Studies: The Effect of Pitch. *Proc. 19th Int. Symp. on Ballistics*, Interlaken, Switzerland, 2001, pp. 1289–1295.
- [16] Sotskiy M.Yu., Veldanov V.A., Sotskiy Yu.M., Daurikh A.Yu. Experimental and theoretical estimate impact conditions effects on strikers deceleration history in target. *Proc. 26th Int. Symp. on Ballistics*, Miami, USA, 2011, vol. 2, pp. 1468–1478.

Sotskiy Mikhail Yurievitch (b. 1948) graduated from Machine-Building Faculty of Bauman Moscow Higher Technical School in 1972. Cand. Sci. (Eng.), the winner of an Lenin komsomol award in the field of science and equipment, the member of the International Ballistics Society (IBS), a leading engineer of the Office of Scientific and Innovation at Bauman Moscow State Technical University. Research interests: characteristics of the movement of objects in various environments and dynamic mechanical characteristics of materials and environments. e-mail: mikhail.sotskiy@gmail.com

Veldanov Vladislav Antonovich (b. 1945) graduated from Machine-Building Faculty of Bauman Moscow Higher Technical School in 1969. Cand. Sci. (Eng.), the winner of the Council of Ministers of the USSR award for achievements in the field of mechanics, the member of the International Ballistics Society (IBS), Assoc. Professor of the High-Precision Aircraft Department at Bauman Moscow State Technical University. Research interests: the movement of objects and devices in various environments, durability and destruction of materials and designs. e-mail: vladislav.veldanov@gmail.com