

Новые технические решения для получения дополнительной информации о нестационарных процессах в баллистических опытах

© Д.В. Гелин¹, Д.А. Лысов¹, В.А. Марков¹, И.В. Марков¹,
М.Ю. Сотский¹, В.В. Селиванов¹, Н.Д. Гелин¹, М.М. Сотская²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

²Агентство «Ключевое Звено», Москва, 115221, Россия

Представлена лабораторная технология ускорения тела в баллистическом эксперименте, позволившая проводить детальную визуализацию баллистического процесса в полном цикле. Осуществлена серия опытов с высокоскоростной регистрацией процесса от начала движения измерительного зонда и провода электрической связи в пусковом устройстве до окончания движения зонда в мишени. При этом исследован ряд конструктивных вариантов зонда с внешним диаметром, как меньшим внутреннего диаметра пускового устройства, так и равным ему. На основании анализа видеоизображений формы провода электрической связи, соединяющего зонд с регистратором, определены условия, обеспечивающие надежность регистрации параметров движения измерительного зонда на траектории полета и в мишени. В результате дополнительных исследований предложены технические решения для проведения опытов в лабораторных и полевых условиях и применения при этом измерительных зондов, метаемых с использованием отделяемых ведущих устройств.

Ключевые слова: измерительный зонд, баллистический эксперимент, провод электрической связи, визуализация процесса, технические решения

Введение. Информацию о нестационарных процессах при метании тел в пусковых установках и последующем их торможении в исследуемой среде получают с использованием технологий высокоскоростной оптической съемки и измерительных технологий пьезометрии при проведении баллистических опытов. Экспериментальные данные являются основой для расчетно-экспериментального изучения процессов и получения дополнительной информации. Применение высокоскоростной оптической съемки невозможно для ствольных пусковых установок на первом этапе баллистического цикла при ускорении тела. Ограничено также применение съемки и на заключительном этапе торможения, особенно в случаях глубокого проникания тела в среду.

Технологии пьезометрии предназначены для получения зависимостей ускорения от времени при метании содержащего пьезоакселерометр измерительного зонда и замедления от времени (истории замедления) зонда при его нестационарном движении в реологической среде после высокоскоростного удара. Баллистические эксперименты с регистрацией характеристик движения зондов в данных процессах проводятся во многих исследовательских центрах в раз-

ных странах. Известны варианты технологии, в которых метаемый зонд снабжен автономным регистратором ускорений [1–7]. Однако традиционные варианты технологии пьезометрии, использующие зонд с акселерометром и проводной связью, обладают в настоящее время преимуществами по уровням регистрируемых в баллистическом эксперименте замедлений, возможным минимальным диаметрам зондов и реализованным в эксперименте скоростям соударения [8–24]. Так, максимальные скорости составляют 820 м/с [5] и 1300 м/с [18], максимальные уровни регистрируемых замедлений равны соответственно $-1,42 \cdot 10^6$ м/с² [1, 3] и $-1,5 \cdot 10^7$ м/с² [15, 18–23].

Непрерывная регистрация истории замедления измерительного зонда при его движении в среде позволяет получить экспериментальные данные о динамических механических свойствах исследуемой среды и провести идентификацию свойств среды путем согласования данных об изменении во времени процесса расчетных и регистрируемых параметров. Данные таких измерений используются не только для исследования особенностей нестационарных процессов проникания и установления динамических прочностных свойств материалов, но и для верификации результатов математического моделирования [1, 5, 6, 8, 11, 13, 20–23].

Для обеспечения надежности получения требуемых данных с использованием проводного варианта технологии [24] необходима детальная информация о функционировании проводной связи [11–13, 15] на траектории движения зонда. Известные технологии оптической регистрации позволяют проводить исследование на этапе движения зонда вне пускового устройства [6, 13]. Важный для формирования оптимальной формы провода этап движения зонда в пусковом устройстве не обеспечен технологиями визуализации процесса.

В работе рассмотрены варианты применения разработанных новых технических решений для получения в лабораторных условиях данных в виде кадров видеорегистрации динамики изменения формы провода электрической связи на этапе внутренней баллистики. Учет особенностей динамики и возможность управления формой провода позволили усовершенствовать технологию и технические устройства для проведения опытов. Использование предложенных технических решений способствует оперативности проведения серии опытов за счет увеличения информативности единичного опыта.

Методика проведения эксперимента. Для проведения лабораторных опытов разработаны устройство и способ осуществления баллистических экспериментов [25, 26]. С использованием устройства создана исследовательская пусковая установка [27, 28], повышающая информативность единичного опыта. Действие установки основано на преобразовании энергии рабочего газа — смеси кислорода и водорода. Смесь образуется в результате электролиза воды

и заполняет управляющую полость, выполненную в виде эластичной разрушаемой оболочки требуемого объема. Экспериментально установлена малая оптическая плотность продуктов детонации смеси. Это наблюдение позволило применить в пусковом устройстве оптически прозрачный разгонный узел (рис. 1). В сочетании с высокоскоростным видеорегистратором разработанная пусковая установка обеспечивает возможность получения качественно новой информации о нестационарных процессах в баллистических экспериментах [27, 28].

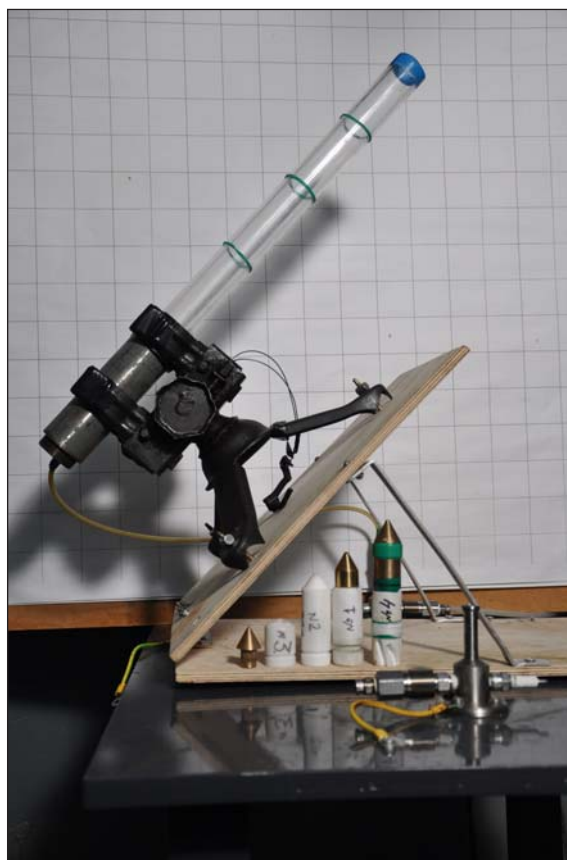


Рис. 1. Разгонный узел установки и комплект метаемых тел

Современные регистраторы позволяют анализировать динамику высокоскоростных детонационных процессов в рабочем газе. Реализованные варианты практического применения разработанного устройства представлены в лабораторном практикуме кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Применение предлагаемой установки позволяет обслуживающему персоналу оперативно и экономично придавать требуемую скорость перемещения исследуемым метаемым объектам [29].

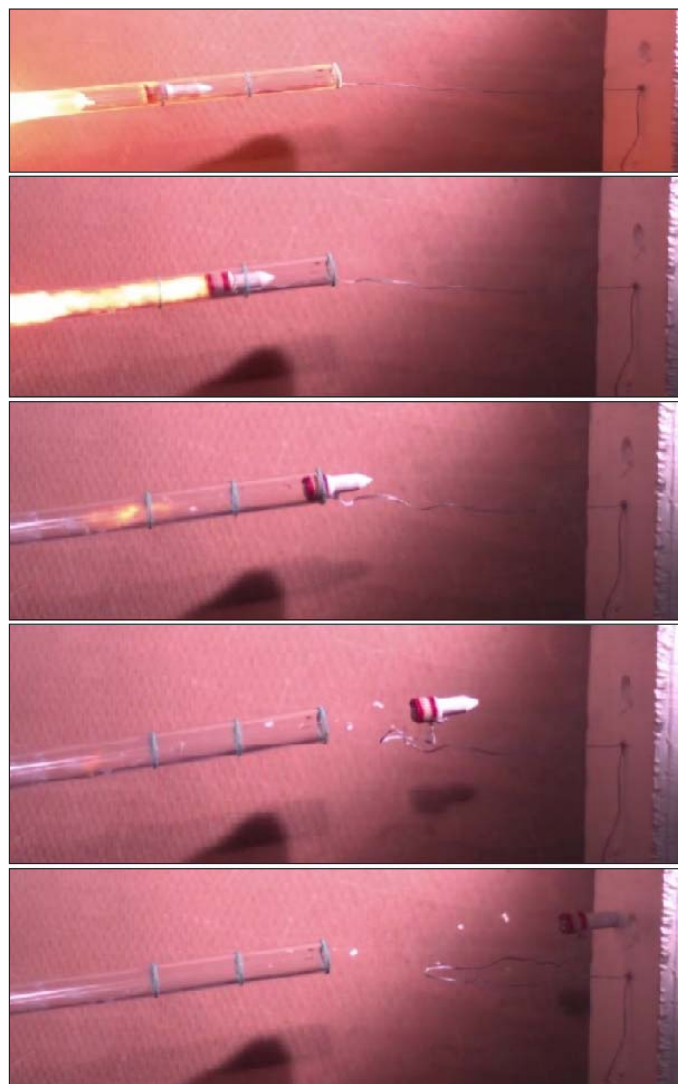


Рис. 2. Отдельные кадры видеорегистрации движения зонда на траектории

На рис. 2 представлены отдельные кадры высокоскоростной съемки процесса движения измерительного зонда, соединенного проводной связью с регистратором [24], в полном баллистическом цикле. Камера Phantom v1210, скорость съемки 14 000 кадров/с, время экспозиции 1 мкс. Установка использована для исследования динамики изменения формы провода на этапах ускорения измерительного зонда и его перемещения от разгонного узла к мишени-среде. Рассмотрены варианты зондов с конструктивно различающимися продольными пазами для размещения провода при перемещении зонда внутри ствола до дульного среза разгонного узла. Проведены опыты с различной ориентацией паза и провода относительно горизонтальной поверхности.

Анализ результатов позволил установить необходимые конструктивные параметры пазов и условия закрепления провода, которые способствуют регулярной форме изгибов провода в процессе укладки его в полости на участке перемещения до дульного среза. Регулярность укладки определяет в дальнейшем стабильность динамики движения провода за зондом вне разгонного устройства. Приведенные факторы уменьшают погрешность измерений [10, 11] и сроки получения экспериментальных данных в расчетно-экспериментальных исследованиях с использованием технологий пьезометрии [12–14, 20–23]. Важное влияние на ускорение зонда и движение провода связи в баллистическом эксперименте оказывают процессы воздействия рабочего газа на зонд и продуктов детонации газа на провод при их проникании через обтюрирующий узел зонда.

Высокоскоростная съемка со скоростью съемки до 200 000 кадров/с позволила осуществить детальный анализ процесса воздействия продуктов детонации рабочего газа на зонд при его ускорении. Установлены многократные подходы ударной волны к торцевой поверхности зонда и отражения ее до начала движения зонда. Визуальное наблюдение предоставляет дополнительные возможности для регулирования процесса проникания продуктов детонации через обтюрирующий узел при различной степени обтюрации измерительного зонда.

Управляющая полость в пусковой установке [27, 28] выполняет функции быстродействующего клапана. Особенностью применяемых для метания измерительных зондов пусковых установок с быстродействующими клапанами является необходимость заведения зонда или сборки ведущего устройства с зондом через дульное отверстие пусковой установки перед проведением опыта. Частный вариант такой технологии [16, 25, 27] реализован в Научно-экспериментальном комплексе «Фундаментальные и прикладные исследования физики быстропротекающих процессов» кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Измерительные сборки для опытов с зондами по технологии с непрерывной электрической связью [24, 30] приведены на рис. 3.

На рис. 4 представлены кадры, регистрирующие изменение формы провода связи вне разгонного узла, для измерительной сборки диаметром 50 мм при скорости ее движения 250 м/с.

Диаметры показанных на рис. 3 и изготовленных по аддитивной технологии пластиковых ведущих устройств (поддонов [30]) равны 50 и 80 мм. Зонды снабжены современными ударными ИСР-пьезоакселерометрами или пьезорезистивными ударными MEMS-акселерометрами компании PCB. Анализ данных видеорегистрации с применением различных конструктивных вариантов зондов позволил обосновать техническое решение и разработать баллистический измерительный модуль [31]. Лабораторный вариант модуля приведен на рис. 5.

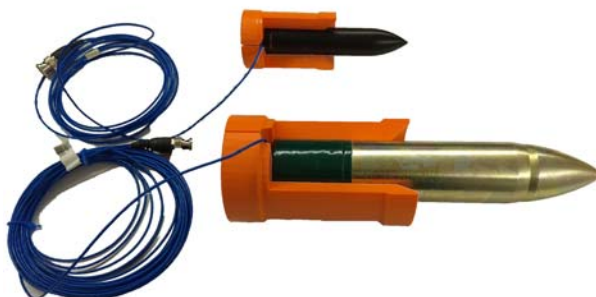


Рис. 3. Измерительные сборки

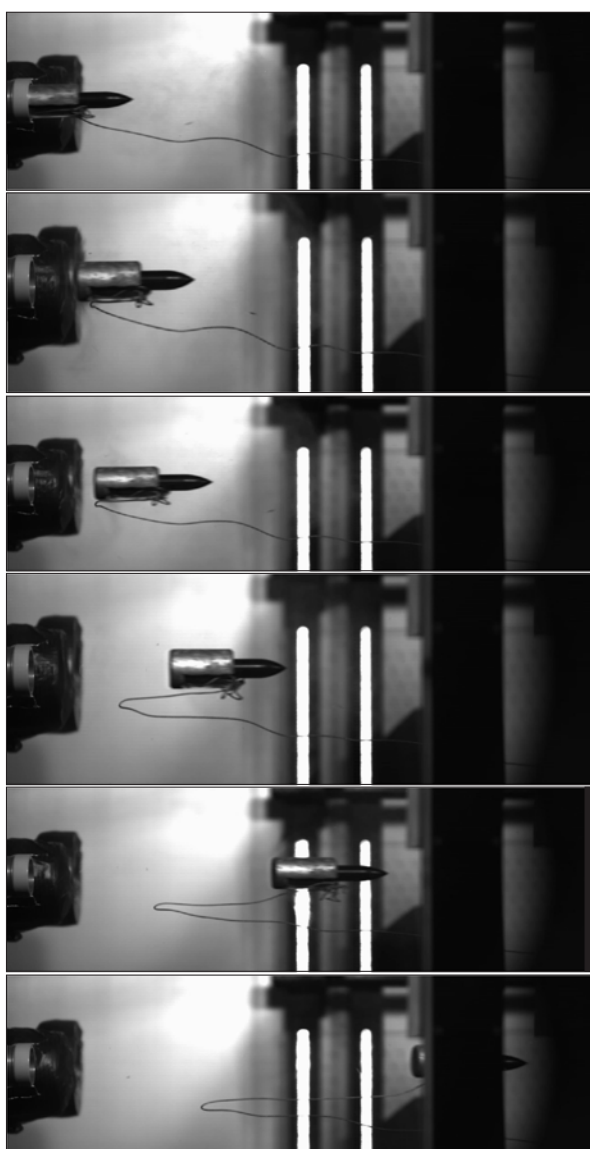


Рис. 4. Кадры движения зонда с ведущим устройством



Рис. 5. Баллистический измерительный модуль

Модуль закреплен на стапеле мультикалиберной баллистической установки (калибры пусковых установок от 10 до 100 мм). Модуль выполнен на базе промышленного пневматического пускового устройства с быстродействующим клапаном КБ-28-10 и представлен на переднем плане в момент заведения измерительной сборки диаметром 50 мм с зондом и проводной связью в дульное отверстие установки.

Заключение. Экспериментальные данные иллюстрируют возможности приведенных технических решений для применения в исследовании вопросов внутренней и внешней баллистики, механики и горения газов. Их использование повышает эффективность выполнения исследовательских заданий в области фундаментальных и прикладных исследований физики быстропротекающих ударных процессов. В работе показана возможность повышения информативности опыта за счет подробной регистрации визуальной картины баллистического процесса в полном цикле при эксплуатации ствольных пусковых установок. Использование установок в условиях университетской лаборатории позволило изучить динамику изменения формы провода электрической связи в процессе его нестационарного движения с измерительным зондом в баллистическом эксперименте. Совершенствование проводной связи в технологии пьезометрии актуально для верификации расчетных моделей материалов среды и виртуальных моделей взаимодействия зондов с реологическими средами.

На кафедре «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана на базе применения технологии пьезометрии в процессах терминальной баллистики с 2007 г. выполнен цикл научно-исследовательских работ (НИР) с использованием регистрируемых

историй замедления измерительных зондов в реологических средах. В результате выполнения цикла НИР решена проблема регистрации параметров движения в прочных средах измерительных ударников при высокоскоростном ударе, связанная с моделированием процесса расчетными моделями, верифицируемыми на основании экспериментальных данных пьезометрии о замедлениях ударника в течение процесса. С участием студентов, аспирантов и сотрудников кафедры выполнено семь отчетов, опубликовано более 30 работ в научных изданиях, более 40 докладов в материалах съездов, отраслевых и международных конференций и симпозиумов, получены патенты на 15 технических решений.

Представленная в данной работе пусковая установка экспонировалась в салоне изобретений и инновационных технологий «Архимед» в мае 2017 г. и на Международном военно-техническом форуме «АРМИЯ-2017» в августе 2017 г. Разработаны материалы и рекомендации по изготовлению и эксплуатации пусковых установок в научных и учебных подразделениях, осуществляющих физическое и математическое моделирование нестационарных газовых и ударных процессов.

Работа выполнена с использованием оборудования ГЗ 3.6196.2017/7.8 и ГЗ 3.6257.2017/7.8.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Forrestal M.J., Frew D.J., Hickerson J.P., Rohwer T.A. Penetration of Concrete Targets with Deceleration-Time Measurements. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, vol. 28 (5), pp. 479–497.
- [2] Frew D.J., Forrestal M.J., Cargile J.D. The Effect of Concrete Target Diameter on Projectile Deceleration and Penetration Depth. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, vol. 32, no. 10, pp. 1584–1594.
- [3] Wendong Zhang, Lujiang Chen, Jijun Xiong, Youchun Ma. High-g Deceleration-time Measurement for the Penetration into Steel Target. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, vol. 34, pp. 436–447.
- [4] Chu Chengqun, Ren Yongfeng, Zhang Qingzhi, Zheng Yongqiu, Liu Xin. A Small-Sized High-Performance Storage Module for High-g Measurement. *Telekomnika Indonesian Journal of Electrical Engineering*, 2014, vol. 12, no. 2, pp. 1265–1270.
- [5] 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. *Proceedings of the 25th International Symposium on Ballistics*. Beijing, China, 2010, vol. 2, pp. 1187–1192.
- [6] Sibeaud J.-M., Delmas A., Hottélet A., Zappa D.-P. Kinetic Energy Perforation of Concrete Slabs: Investigation of Embedded High g-Load Sensing. *Proceedings of the 27th International Symposium on Ballistics*. Freiburg, Germany, 2013, vol. 2, pp. 1557–1567.
- [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, об-*

- работка и отображение информации о быстропотекающих процессах», 2014, Москва, РПА «АПР», 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. *Proceedings of the 25th International Symposium 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, ч. 4, с. 1783–1786.
- [10] 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. *Proceedings of the 26th International Symposium on Ballistics*, Miami, USA, 2011, vol. 2, pp. 1468–1478.
- [11] 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, т. 56, № 7/3, с. 98–100.
- [12] 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, т. 81, вып. 7, с. 94–104.
- [13] 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 усложненных условиях проведения измерений. *Наука и образование*, 2012, № 8. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/428828.html> DOI: 10.7463/0812.0428828 (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 27.01.2018).
- [15] Сотский М.Ю., Велданов В.А. Регистрация истории замедления в мишени геометрически подобных ударников. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 5. DOI: 10.18698/2308-6033-2015-5-1400 (дата обращения 27.01.2018).
- [16] Сотский М.Ю., Велданов В.А., Гелин Д.В., Марков В.А., Пусев В.И., Селиванов В.В. Модернизированный экспериментальный комплекс для исследования физики ударных процессов с использованием пьезометрии. *Материалы XXI Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова*. Москва, ООО «ТР-Принт», 2015, т. 2, с. 208–212.
- [17] Сотский М.Ю. Методические разработки к анализу непрерывных регистраций истории замедления в мишени пластически деформируемых стержней. *Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Аннотации докладов. Казань, 20–24 августа 2015 г.* Казань, Изд-во Академии наук РТ, 2015, с. 264.
- [18] Sotskiy M.Yu., Veldanov V.A. Two-Channel Projectile Deceleration History Registration during Their High-Speed Motion with Erosion in Target. *Proceedings of the 29th International Symposium on Ballistics*. Edinburgh, Scotland, UK, 2016, vol. 2, pp. 2057–2066.

- [19] Сотский М.Ю., Велданов В.А., Марков В.А., Пусев В.И. Алгоритм определения параметров движения ударника с эрозией в мишени по экспериментальным данным об истории его замедления. *Сборник трудов IX Всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики»*, Томск, 21–25 сентября 2016 г. Томский государственный университет, 2016, с. 229–230.
URL: http://conf.niipmm.tsu.ru/Content/Doc/FPPSM_2016_NIIPMMTSU.pdf (дата обращения 19.12.2016).
- [20] Сотский М.Ю., Велданов В.А. Опытные данные технологии пьезометрии для верифицирования задач проникания с эрозией. *Материалы XXIII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова*. Москва, ООО «ТР-Принт», 2017, т. 2, с. 159–164.
- [21] Сотский М.Ю., Велданов В.А., Пусев В.И. Дополнительная информация из данных пьезометрии о характеристиках деформирования и динамической прочности материала ударника. *Материалы XXIII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова*. Москва, ООО «ТР-Принт», 2017, т. 2, с. 164–169.
- [22] Sotskiy M.Yu., Veldanov V.A., Selivanov V.V. Growth in the Quantity of Debris in Space as AN-Effect of Mutual Mechanical Collisions of Various Types. *Acta Astronautica*, 2017, vol. 135, pp. 10–14.
- [23] Sotskiy M.Yu., Veldanov V.A. Deceleration-Time Data for the Verification of Calculation Models of the Penetration with Erosion in Target. *Proceedings of the 30th International Symposium on Ballistics*. Long Beach, US, September 11–15, 2017, vol. 2, pp. 2006–2011.
- [24] Велданов В.А., Жариков А.В., Овчинников А.Ф., Пусев В.И., Ручко А.М., Сотский М.Ю., Сотский Ю.М., Ткачев В.В. *Устройство и способ проводной электрической связи для регистрации параметров функционирования метаемога тела в полном баллистическом цикле*. Пат. № 2413917 Российская Федерация, 2011, бюл. № 7, 17 с.
- [25] Гелин Д.В., Гелин Н.Д., Лысов Д.А., Марков В.А., Марков И.В., Селиванов В.В., Сотская М.М., Сотский М.Ю. *Способ ускорения тела в баллистическом эксперименте и устройство для его осуществления*. Пат. № 2625404 Российская Федерация, 2017, бюл. № 20, 12 с.
- [26] Сотский М.Ю., Гелин Д.В., Гелин Н.Д., Лысов Д.А., Марков В.А., Марков И.В., Селиванов В.В., Сотская М.М. Наблюдение нестационарных процессов в баллистических опытах для верификации расчетных моделей. *Материалы XXIII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова*. Москва, ООО «ТР-Принт», 2017, т. 2, с. 170–172.
- [27] Гелин Д.В., Гелин Н.Д., Лысов Д.А., Марков В.А., Марков И.В., Селиванов В.В., Сотская М.М., Сотский М.Ю. *Исследовательская пусковая установка*. Пат. № 2619501 Российская Федерация, 2017, бюл. № 14, 8 с.
- [28] Гелин Д.В., Гелин Н.Д., Лысов Д.А., Марков В.А., Марков И.В., Селиванов В.В., Сотская М.М., Сотский М.Ю. Получение дополнительной информации о нестационарных процессах в баллистических опытах для верификации расчетных моделей. *Материалы XX Юбилейной Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам*. Алушта, 24–31 мая 2017 г., с. 736–738. URL: http://www.cmmass.ru/files/cmmass2017_web.pdf (дата обращения 19.01.2018).
- [29] Сотский М.Ю., Велданов В.А., Гелин Д.В., Гелин Н.Д., Лысов Д.А., Марков В.А., Марков И.В., Селиванов В.В., Сотская М.М. Новые возможности

- для расчетно-экспериментального изучения параметров баллистики и функционирования исследовательских зондов. *Тезисы докладов Международной научной конференции «Фундаментальные и прикладные задачи механики»*, Москва, 24–27 октября 2017 г., с. 212–213. URL: <http://fn.bmstu.ru/coferences-sec-fs/item/615-fundamental-and-applied-problems-of-mechanics-fapm-2017-fs-ru> (дата обращения 19.01.2018).
- [30] Гузун А.Ю., Крутов И.С., Сотская М.М., Сотский М.Ю., Четвернин М.Ю. *Поддон для метаемого измерительного зонда*. Заявка о выдаче патента Российской Федерации на изобретение № 2017146797 / 17 (079983) от 28.12.2017.
- [31] Велданов В.А., Крутов И.С., Пусев В.И., Сотский М.Ю., Сотский Ю.М. *Баллистический модуль и способ проводной электрической связи для регистрации параметров функционирования метаемого измерительного зонда в полном баллистическом цикле*. Заявка о выдаче патента Российской Федерации на изобретение № 2017146808 / 17 (079967) от 28.12.2017.

Статья поступила в редакцию 16.02.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Гелин Д.В., Лысов Д.А., Марков В.А., Марков И.В., Сотский М.Ю., Селиванов В.В., Гелин Н.Д., Сотская М.М. Новые технические решения для получения дополнительной информации о нестационарных процессах в баллистических опытах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 3. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-3-1747>

Гелин Дмитрий Владиленович — заведующий лабораторией кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 публикаций по вопросам взрыва и удара. Область научных интересов: физика быстропротекающих процессов. e-mail: krotoles@yandex.ru

Лысов Дмитрий Алексеевич — ведущий инженер Управления научной и инновационной деятельности МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 10 публикаций по вопросам взрыва и удара. Область научных интересов: физика быстропротекающих процессов.

Марков Владимир Александрович — заведующий лабораторией кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 публикаций по вопросам взрыва и удара. Область научных интересов: физика быстропротекающих процессов. e-mail: mva_2805@mail.ru

Марков Иван Владимирович окончил кафедру «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2010 г. и аспирантуру. Автор более 20 публикаций по вопросам взрыва и удара. Область научных интересов: физика быстропротекающих процессов.

Сотский Михаил Юрьевич — канд. техн. наук, ведущий инженер Управления научной и инновационной деятельности МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 публикаций по вопросам терминальной баллистики. Область научных интересов: характеристики движения объектов в различных средах и динамические механические характеристики материалов и сред. e-mail: msotsky.bmstu@mail.ru

Селиванов Виктор Валентинович — д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 публикаций по вопросам взрыва и удара. Область научных интересов: механика сплошных сред, физика быстропротекающих процессов.

Гелин Николай Дмитриевич — студент факультета «Информационные технологии» Московского университета синергии. Работает в Научно-учебном комплексе «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана в должности электроника. Автор пяти публикаций по вопросам взрыва и удара. Область научных интересов: информационные системы и технологии, физика быстропротекающих процессов.

Сотская Мария Михайловна окончила МГУ им. М.В. Ломоносова в 2007 г. Работает в сфере креативного менеджмента. Область научных интересов: эвристика и синергетика.

New technical solutions for obtaining additional information about non-stationary processes in ballistic experiments

© D.V. Gelin¹, D.A. Lysov¹, V.A. Markov¹, I.V. Markov¹,
M.Yu. Sotskiy¹, V.V. Selivanov¹, N.D. Gelin¹, M.M. Sotskaya²

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

²Key Link Agency, Moscow, 115221, Russia

The article presents the laboratory technology for body accelerating in a ballistic experiment allowing for ballistic process detailed visualization in a full cycle. A series of experiments with a high-speed recording of the process from the beginning of the movement of the measuring probe and the wire of the electrical link in the launcher until the probe movement termination in the target was performed. A number of design variants of the probe with an external diameter, both smaller and equal to the internal diameter of the launcher, was investigated. Based on the analysis of the video images of the form of the electrical wire connecting the probe to the recorder, conditions are determined that ensure the reliability of recording of the parameters of the probe movement on the flight path and in the target. As a result of additional research, technical solutions have also been proposed for carrying out experiments in laboratory and field conditions and the use of measuring probes, which are thrown using detachable master devices.

Keywords: *measuring probe, ballistic experiment, electric communication wire, process visualization, technical solutions*

REFERENCES

- [1] Forrestal M.J., Frew D.J., Hickerson J.P., Rohwer T.A. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, vol. 28 (5), pp. 479–497.
- [2] Frew D.J., Forrestal M.J., Cargile J.D. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, vol. 32, no. 10, pp. 1584–1594.
- [3] Wendong Zhang, Lujiang Chen, Jijun Xiong, Youchun Ma. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, vol. 34, pp. 436–447.
- [4] Chu Chengqun, Ren Yongfeng, Zhang Qingzhi, Zheng Yongqiu, Liu Xin. *Telekomnika Indonesian Journal of Electrical Engineering*, 2014, vol. 12, no. 2, pp. 1265–1270.
- [5] 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. *Proceedings of the 25th International Symposium on Ballistics*. Beijing, China, 2010, vol. 2, pp. 1187–1192.
- [6] Sibeaud J-M., Delmas A., Hottelet A., Zappa D-P. Kinetic Energy Perforation of Concrete Slabs: Investigation of Embedded High g-Load Sensing. *Proceedings of the 27th International Symposium on Ballistics*. Freiburg, Germany, 2013, vol. 2, pp. 1557–1567.
- [7] Batarev S.V., Kalmykov P.N., Kortukov I.I., Osokin A.P. Udarostoykiy registrator uskoreniy [Shockproof accelerometer]. *Sbornik statey XXV Ubileynoy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii shkoly-seminara "Peredacha, priem, obrabotka i otobrazhenie informatsii o bystroprotokaushchikh protsessakh"* [Collection of articles of the XXV National Anniversary Scientific and Technical Conference School-

- Seminar “Transmission, Reception, Processing and Display of Information about Fast Processes”]. Moscow, RPA “APR” Publ., 2014, 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. *Proceedings of 25th International Symposium on Ballistics*. Beijing, China, 2010, vol. 2, pp. 1070–1077.
- [9] Sotskiy M.Yu. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo — Vestnik of Lobachevsky University of Nizhniy Novgorod*, 2011, no. 4, part 4, pp. 1783–1786.
- [10] 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. *Proceedings of 26th International Symposium on Ballistics*. Miami, USA, 2011, vol. 2, pp. 1468–1478.
- [11] Sotskiy M.Yu., Veldanov V.A., Pusev V.I., Ruchko A.M., Sotskiy Yu.M. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika — Proceedings of Higher Educational Institutions. Physics*, 2013, vol. 56, no. 7/3, pp. 98–100.
- [12] Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.I., Ruchko A.M., Sotskiy M.Yu., Fedorov S.V. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Journal of Technical Physics*, 2011, vol. 81, no. 7, pp. 94–104.
- [13] Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.I., Ruchko A.M., Selivanov V.V., Sotskiy M.Yu., Fedorov S.V. *Nauka i obrazovanie: elektronnyy nauchno-tekhnicheskyy zhurnal — Science and Education: Electronic Scientific and Technical Journal*, 2012, no. 8. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/428828.html> (accessed May 27, 2015). DOI: 10.7463/0812.0428828
- [14] Sotskiy M.Yu., Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.I., Selivanov V.V. *Inzhenernyy vestnik — Engineering Bulletin*, 2014, no. 11. Available at: <http://engbul.bmstu.ru/doc/751797.html> (accessed January 27, 2018).
- [15] Sotskiy M.Yu., Veldanov V.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2015, iss. 5. DOI: 10.18698/2308-6033-2015-5-1400 (accessed January 27, 2018).
- [16] Sotskiy M.Yu., Veldanov V.A., Gelin D.V., Markov V.A., Pusev V.I., Selivanov V.V. Modernizirovannyy eksperimentalnyy kompleks dlya issledovaniya fiziki udarnykh protsessov s ispolzovaniem pyezometrii [Modernized experimental complex for studying the physics of impact processes using piezometry]. *Materialy XXI Mezhdunarodnogo simpoziuma im. A.G. Gorshkova. “Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruktivnykh i sploshnykh sred”. T. 2* [Proceedings of the XXI A.G. Gorshkov International Symposium “Dynamic and Technological Problems of Mechanics of Constructions and Continuous Media”. Vol. 2]. Moscow, OOO “TRP” Publ., 2015, pp. 208–212.
- [17] Sotskiy M.Yu. Metodicheskie razrabotki k analizu nepreryvnykh registratsiy istorii zamedleniya v misheni plasticheski deformiruemyykh sterzhney [Methodical developments for the analysis of continuous registrations of the history of plastically deformable rod deceleration in the target]. *Vserossiyskiy syezhd po fundamentalnym problemam teoreticheskoy i prikladnoy mekhaniki. Kazan, 20-24 avgusta 2015 g. Annotatsii dokladov* [National Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics. Kazan, August 20–24, 2015. Abstracts]. Kazan, Academy of Sciences of Tatarstan Republic Publ., 2015, 264 p.
- [18] Sotskiy M.Yu., Veldanov V.A. Two-Channel Projectile Deceleration History Registration during Their High-Speed Motion with Erosion in Target. *Proceedings of the 29th International Symposium on Ballistics*. Edinburgh, Scotland, UK, 2016, vol. 2, pp. 2057–2066.

- [19] Sotskiy M.Yu., Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.I. Algoritm opredeleniya parametrov dvizheniya udarnika s eroziyey v misheni po eksperimentalnym dannym ob istorii ego zamedleniya [Algorithm for determining the parameters of movement of the projectile with erosion in the target from experimental data on the history of its slowing down]. *Sbornik trudov IX Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii "Fundamentalnye i prikladnye problemy sovremennoy mekhaniki" Tomsk, 21–25 sentyabrya 2016 g.* [Proceedings of the IX National Scientific conference "Fundamental and applied problems of modern mechanics" Tomsk, September 21–25, 2016]. Tomsk, Tomsk State University Publ., 2016, pp. 229–230. Available at: http://conf.niipmm.tsu.ru/Content/Doc/FPPSM_2016_NIIPMMTSU.pdf (accessed December 19, 2016).
- [20] Sotskiy M.Yu., Veldanov V.A. Opytnye dannye tekhnologii pyezometrii dlya verifitsirovaniya zadach pronikaniya s eroziyey [Experimental data of piezometric technology for verification of problems of penetration with erosion]. *Materialy XXIII Mezhdunarodnogo simpoziuma im. A.G. Gorshkova "Dinamicheskoye i tekhnologicheskoye problemy mekhaniki konstruktivnykh i sploshnykh sred". T. 2* [Proceedings of the XXIII A.G. Gorshkov International Symposium "Dynamic and Technological Problems of Mechanics of Constructions and Continuous Media". Vol. 2]. Moscow, OOO "TR-Print" Publ., 2017, pp. 159–164.
- [21] Sotskiy M.Yu., Veldanov V.A., Pusev V.I. Dopolnitelnaya informatsiya iz dannykh pyezometrii o kharakteristikakh deformirovaniya i dinamicheskoy prochnosti materiala udarnika [Additional information from the piezometric data on the deformation characteristics and the dynamic strength of the projectile material]. *Materialy XXIII Mezhdunarodnogo simpoziuma im. A.G. Gorshkova. "Dinamicheskoye i tekhnologicheskoye problemy mekhaniki konstruktivnykh i sploshnykh sred". T. 2* [Proceedings of the XXIII A.G. Gorshkov International Symposium "Dynamic and Technological Problems of Mechanics of Constructions and Continuous Media". Vol. 2]. Moscow, OOO "TR-Print" Publ., 2017, pp. 164–169.
- [22] Sotskiy M.Yu., Veldanov V.A., Selivanov V.V. Growth in the Quantity of Debris in Space as AN-effect of Mutual Mechanical Collisions of Various Types. *Acta Astronautica*, 2017, vol. 135, pp. 10–14.
- [23] Sotskiy M.Yu., Veldanov V.A. Deceleration-Time Data for the Verification of Calculation Models of the Penetration with Erosion in Target. *Proceedings of 30th International Symposium on Ballistics*. Long Beach, US, September 11–15, 2017, vol. 2, pp. 2006–2011.
- [24] Veldanov V.A., Zharikov A.V., Ovchinnikov A.F., Pusev V.I., Ruchko A.M., Sotskiy M.Yu., Sotskiy Yu.M., Tkachev V.V. *Ustroystvo i sposob provodnoy elektricheskoy svyazi dlya registratsii parametrov funktsionirovaniya metaemogo tela v polnom ballisticheskoy tsikle* [The device and method of wire-based electrical communication for recording the parameters of the projectile functioning in a full ballistic cycle]. Patent RF, no. 2413917, 2011, bul. no. 7, 17 p.
- [25] Gelin D.V., Gelin N.D., Lysov D.A., Markov V.A., Markov I.V., Selivanov V.V., Sotskaya M.M., Sotskiy M.Yu. *Sposob uskoreniya tela v ballisticheskoy eksperimente i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [The method of body accelerating in a ballistic experiment and the device for its implementation]. Patent RF, no. 2625404, 2017, bul. no. 20, 12 p.
- [26] Sotskiy M.Yu., Gelin D.V., Gelin N.D., Lysov D.A., Markov V.A., Markov I.V., Selivanov V.V., Sotskaya M.M. Nabludenie nestatsionarnykh protsessov v ballisticheskikh opytakh dlya verifikatsii raschetnykh modeley [Monitoring nonstationary processes in ballistic experiments for the verification of computational mo-

- dels]. *Materialy XXIII Mezhdunarodnogo simpoziuma im. A.G. Gorshkova. "Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruksiy i sploshnykh sred"*. T. 2 [Proceedings of the XXIII A.G. Gorshkov International Symposium "Dynamic and Technological Problems of Mechanics of Constructions and Continuous Media". Vol. 2]. Moscow, OOO "TR-print" Publ., 2017, pp. 170–172.
- [27] Gelin D.V., Gelin N.D., Lysov D.A., Markov V.A., Markov I.V., Selivanov V.V., Sotskaya M.M., Sotskiy M.Yu. *Issledovatel'skaya puskovaya ustanovka* [Research launcher]. Patent RF, no. 2619501, 2017, bul. no. 14, 8 p.
- [28] Gelin D.V., Gelin N.D., Lysov D.A., Markov V.A., Markov I.V., Selivanov V.V., Sotskaya M.M., Sotskiy M.Yu. Poluchenie dopolnitel'noy informatsii o nes-tatsionarnykh protsessakh v ballisticheskikh opytakh dlya verifikatsii raschetnykh modeley [Obtaining additional information about non-stationary processes in ballistic experiments for the verification of computational models]. *Materialy XX Ubileynoy Mezhdunarodnoy konferentsii po vychislitel'noy mekhanike i covremennym prikladnym programmnyim sistemam, Alushta, 24–31 maya 2017 g.* [Proceedings of the XX International Anniversary Conference on Computational Mechanics and Contemporary Applied Software Systems. Alushta, May 24–31, 2017]. Alushta, 2017, pp. 736–738. Available at: http://www.cmmass.ru/files/cmmass2017_web.pdf (accessed January 19, 2018).
- [29] Sotskiy M.Yu., Veldanov V.A., Gelin D.V., Gelin N.D., Lysov D.A., Markov V.A., Markov I.V., Selivanov V.V., Sotskaya M.M. Novye vozmozhnosti dlya raschetno-eksperimental'nogo izucheniya parametrov ballistiki i funktsionirovaniya issledovatel'skikh zondov [New possibilities for calculation and experimental study of research probe ballistic parameters and functioning]. *Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Fundamentalnye i prikladnye zadachi mekhaniki", Moscow, 24–27 oktyabrya 2017 g.* [International Scientific Conference "Fundamental and Applied Problems of Mechanics". Abstracts. Moscow, October 24–27, 2017]. Moscow, 2017, pp. 212–213. Available at: <http://fn.bmstu.ru/coferences-secf/item/615-fundamental-and-applied-problems-of-mechanics-fapm-2017-fs-ru> (accessed January 19, 2018).
- [30] Guzun A.Yu., Krutov I.S., Sotskaya M.M., Sotskiy M.Yu., Chetvernin M.Yu. *Poddon dlya metaemogo izmeritel'nogo zonda* [Platform for projectile measuring probe]. Application for the grant of a RF patent on invention no. 2017146797 / 17 (079983) of 28.12.2017.
- [31] Veldanov V.A., Krutov I.S., Pusev V.I., Sotskiy M.Yu., Sotskiy Yu.M. *Ballisticheskii modul i sposob provodnoy elektricheskoy svyazi dlya registratsii parametrov funktsionirovaniya metaemogo izmeritel'nogo zonda v polnom ballisticheskoy tsikle* [The ballistic module and the method of wire-based electrical communication for recording the projectile sampling probe functioning parameters in a full ballistic cycle]. Application for the grant of a RF patent on invention no. 2017146808 / 17 (079967) of 28.12.2017.

Gelin D.V., Head of the laboratory, Department of Precise Flying Vehicles, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 50 research publications in the field of explosion and impact. Research interests: physics of fast processes. e-mail: krotoles@yandex.ru

Lysov D.A., Leading Engineer, Department of Scientific and Innovation Activity, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 10 research publications in the field of explosion and impact. Research interests: physics of fast processes.

Markov V.A., Head of the laboratory, Department of Precise Flying Vehicles, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 150 research publications in the field of explosion and impact. Research interests: physics of fast processes. e-mail: mva_2805@mail.ru

Markov I.V. graduated from Bauman Moscow State Technical University, Department of Precise Flying Vehicles in 2010 and postgraduate study. Author of over 20 research publications in the field of explosion and impact. Research interests: physics of fast processes.

Sotskiy M.Yu., Cand. Sc. (Eng.), Leading Engineer, Department of Scientific and Innovation Activity, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 150 research publications in the field of terminal ballistics. Research interests: characteristics of object motion in various media and dynamic mechanical characteristics of materials and media. e-mail: msotsky.bmstu@mail.ru

Selivanov V.V., Dr. Sc. (Eng.), Head of the Department of Precise Flying Vehicles, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 200 research publications in the field of explosion and impact. Research interests: mechanics of continuum, physics of fast processes.

Gelin N.D., student, Faculty of Information Technology, Moscow University of Synergy, electronics engineer, Scientific and Educational Complex of Special Machinery, Bauman Moscow State Technical University. Author of 5 research publications in the field of explosion and impact. Research interests: information systems and technologies, physics of fast processes.

Sotskaya M.M. graduated from Lomonosov Moscow State University in 2007, works in the field of creative management. Scientific interests: heuristics and synergetics.