

УДК 539.3; 620.17; 621.317.1

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ

М. Ю. Сотский, Д. В. Гелин, И. С. Крутов, Д. А. Лысов,
В. А. Марков, И. В. Марков, М. Ю. Четвернин

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
105005 Москва, Россия

E-mails: msotsky.bmstu@mail.ru, krotoles@yandex.ru, is.krutov@mail.ru,
bsolonichev@mail.ru, mva_2805@mail.ru, i.v.markov@yandex.ru, chetvernin@inbox.ru

С использованием лабораторной технологии ускорения измерительного зонда в баллистическом эксперименте проведена серия опытов с высокоскоростной видеорегистрацией процесса с момента начала движения измерительного зонда и электропровода в пусковом устройстве до момента окончания движения зонда в мишени. Представлены преимущества разрабатываемого варианта технологии зондирования сред. На основе анализа данных видеорегистрации динамического течения газа в пусковом устройстве и эволюции формы электропровода определены условия и предложены технические решения, обеспечивающие непрерывность регистрации параметров движения измерительного зонда на траектории полета и в среде-мишени.

Ключевые слова: измерительный зонд, баллистический эксперимент, видеорегистрация, электропровод, технические решения.

DOI: 10.15372/PMTF20190523

Введение. Технологии высокоскоростной оптической съемки и пьезометрии при проведении баллистических испытаний используются для получения информации о нестационарных процессах при метании тел в пусковых установках и последующем торможении этих тел в исследуемой среде. Экспериментальные данные составляют основу расчетно-экспериментального изучения процессов. На первом этапе баллистического цикла, при ускорении тела в ствольных пусковых установках, применение высокоскоростной оптической съемки невозможно. Использование съемки ограничено также на заключительном этапе торможения в случаях глубокого проникания тела в среду. Технологии пьезометрии используются для получения зависимости ускорения от времени при метании содержащего пьезоакселерометр измерительного зонда и зависимости скорости торможения от времени (истории замедления) при нестационарном движении зонда в реологической среде после высокоскоростного удара. В исследовательских центрах разных стран проводятся баллистические эксперименты с регистрацией характеристик движения зондов. Извест-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 19-08-00701-а) с использованием оборудования в рамках государственных заданий 3.6196.2017/7.8, 3.6257.2017/7.8.

© Сотский М. Ю., Гелин Д. В., Крутов И. С., Лысов Д. А., Марков В. А.,
Марков И. В., Четвернин М. Ю., 2019

ны варианты технологии, в которых метаемый зонд снабжен автономным регистратором ускорений [1–7]. Известны также исследования с определением параметров процесса удара и проникания тел в реологические среды на основе методики обращенного эксперимента с использованием мерного стержня [8]. Традиционные технологии пьезометрии, использующие зонд с акселерометром и проводной связью, в настоящее время позволяют более точно регистрировать в баллистическом эксперименте скорость торможения при возможных минимальных диаметрах зондов и реализованных в эксперименте скоростях соударения [9–16]. Из анализа опубликованных данных следует, что максимальные скорости равны 820 м/с [5] и 1300 м/с [12, 13]. Максимальные значения регистрируемых ускорений при торможении равны $-1,42 \cdot 10^6$ м/с² [1, 3] и $-1,5 \cdot 10^7$ м/с² [12–15] соответственно. В опытах непрерывно регистрируется скорость торможения измерительного зонда при его движении в среде. Использование методик [9, 10, 12–14] позволяет получить экспериментальные данные о динамических механических свойствах исследуемой среды. На основе согласования данных об изменении во времени расчетных и регистрируемых параметров проводится идентификация свойств среды. Данные таких измерений используются также для верификации результатов математического моделирования [1, 5, 6, 9, 10, 12–15, 17–21].

Надежности требуемых данных с использованием проводного варианта технологии [16] можно добиться, анализируя информацию о функционировании проводной связи [9, 10, 12] вдоль траектории движения зонда. Известные технологии оптической регистрации позволяют проводить исследование на этапе движения зонда вне пускового устройства [6, 12]. Этап движения зонда в пусковом устройстве, имеющий большое значение для формирования оптимальных форм провода, не обеспечен технологиями визуализации процесса. В настоящей работе используются новые технические решения [22, 23] для детальной визуализации в лабораторных условиях изменения формы электропровода на этапе внутренней баллистики. Учет особенностей динамики позволяет управлять формой провода. Проведенная серия опытов позволила усовершенствовать технологию и технические устройства [24–26] для проведения исследований с регистрацией параметров рассматриваемых динамических процессов. При использовании предложенных технических решений увеличивается информативность единичного опыта, что повышает оперативность проведения серии опытов.

1. Технология и аппаратура визуализации. Устройство и способ проведения баллистических экспериментов [22] разработаны и применены в лабораторных опытах для визуализации процесса зондирования. С использованием устройства создана исследовательская пусковая установка [23], схема которой представлена на рис. 1.

Установка содержит направляющий элемент, в котором размещены метаемый объект и управляющая полость, образованная замкнутой эластичной оболочкой. Управляющая полость размещена в пусковой зоне ствола и заполнена рабочим газом. Управляющая полость соединена через магистраль и запорно-регулирующую аппаратуру с источником рабочего газа, выполненным в виде электролизера. Запорно-регулирующая аппаратура содержит искровой разрядник. Функционирование установки обеспечивается управляющей аппаратурой. 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 (штриховая линия на рис. 1). Экспериментально установлена малая оптическая плотность продуктов детонации смеси, что позволило применить в разгонном узле пусковой установки оптически прозрачный ствол (рис. 2, *a*). Узел размещен в бронированной камере, съемка и подсветка процесса проводятся через иллюминаторы (см. рис. 2, *a*).

В сочетании с высокоскоростным видеорегистратором разработанная пусковая установка обеспечивает возможность получения новых данных о нестационарных процессах

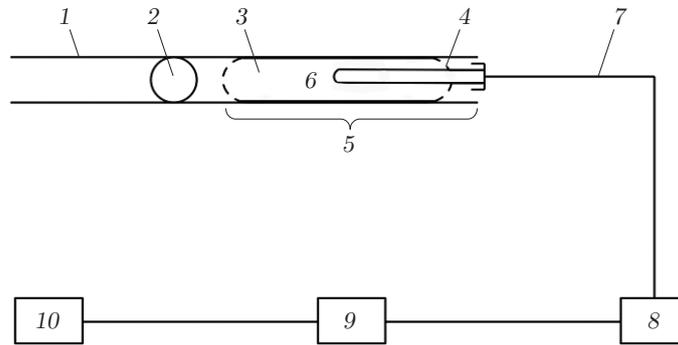


Рис. 1. Схема исследовательской пусковой установки:

1 — направляющий элемент, 2 — метаемый объект, 3 — управляющая полость, 4 — замкнутая эластичная оболочка, 5 — пусковая зона ствола, 6 — рабочий газ, 7 — магистраль, 8 — запорно-регулирующая аппаратура, 9 — источник рабочего газа, 10 — управляющая аппаратура

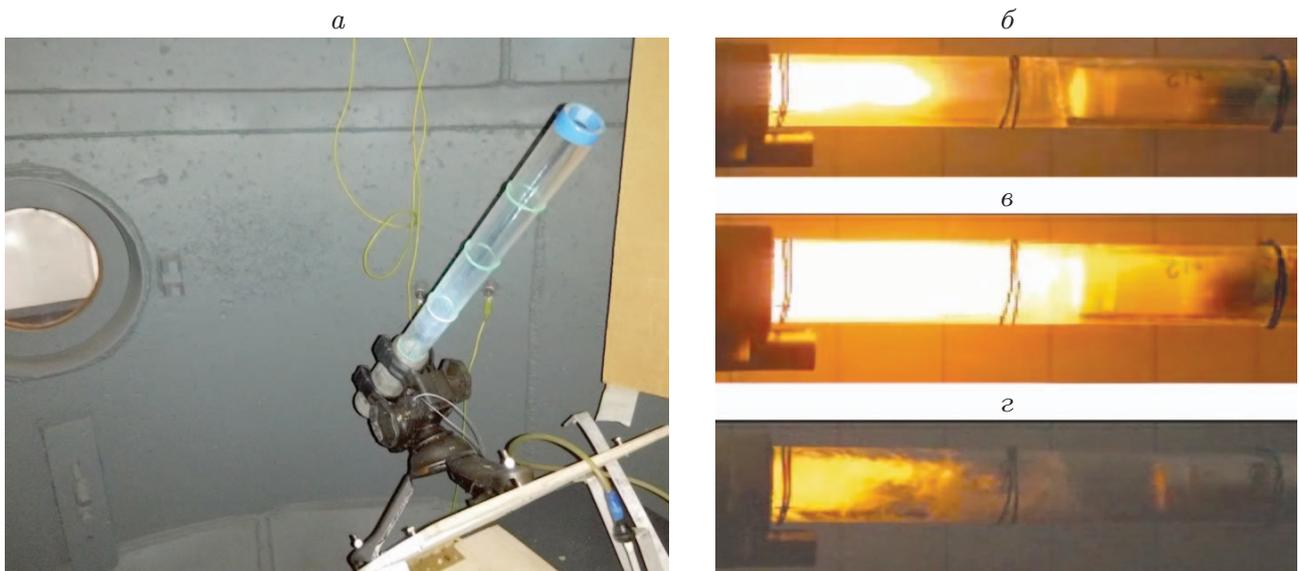


Рис. 2. Разгонный узел установки (а) и результаты визуализации начального этапа ускорения измерительного зонда в различные моменты времени (б-г):

б — движение фронта детонационной волны к донной части неподвижного зонда, в — положение донной части в момент четвертого отражения волны от нее, г — ускоренное движение зонда после многократных воздействий

в баллистических экспериментах [24]. Кроме того, современные регистраторы позволяют анализировать динамику высокоскоростных детонационных процессов в рабочем газе (рис. 2, б-г).

2. Визуализация процесса движения зонда. Исследования динамических механических свойств реологических сред основаны на расчетно-экспериментальном изучении движения инерциальных зондов в среде-мишени. Постоянно совершенствуются как расчетные, так и экспериментальные технологии подготовки контактного зондирования поверхностей удаленных изучаемых объектов, проекты устранения или снижения опасности объектов, угрожающих жизнедеятельности людей и дальнейшему исследованию космического пространства [10, 11, 15]. Актуальной задачей является создание на основе результатов расчетов и экспериментов виртуальных моделей процессов, верифицированных

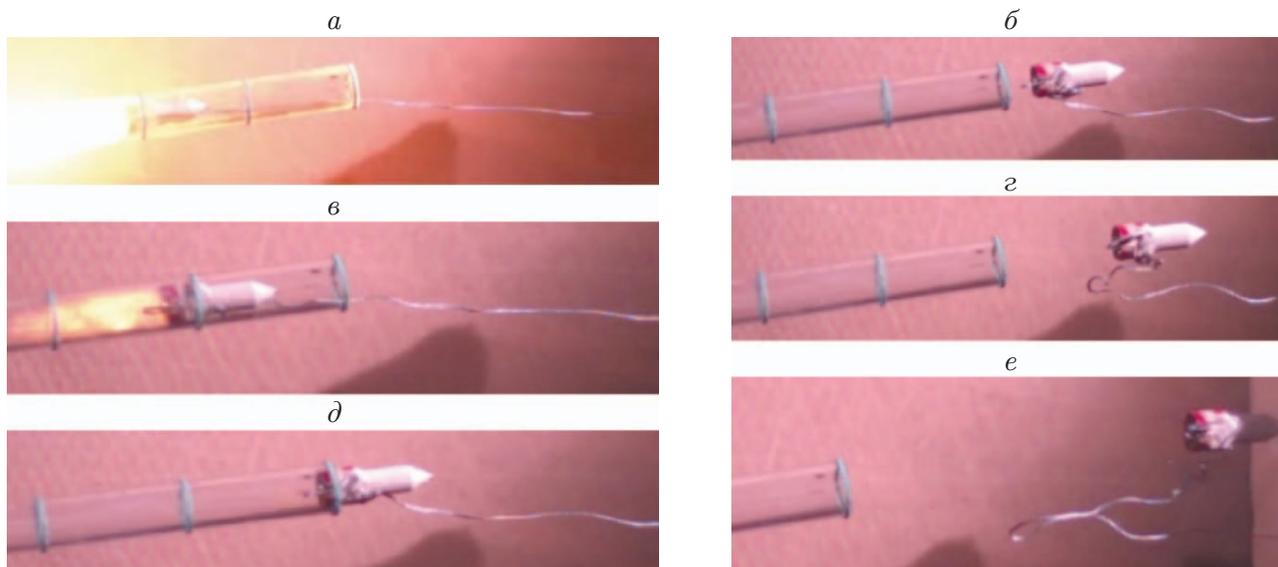


Рис. 3. Результаты визуализации процесса движения зонда в направляющем элементе установки (*a, в, д*) и вне направляющего элемента (*б, г, е*) в различные моменты времени

по данным лабораторного наблюдения и регистрации параметров движения инерциального измерительного зонда [9, 16] в полном баллистическом цикле: на этапах ускорения измерительного зонда, движения во время сближения с исследуемой реологической средой и дальнейшего движения в ней. Результаты исследований нестационарных процессов баллистики с использованием исследовательской пусковой установки [23] и способа испытаний [22] позволяют совершенствовать проводной вариант измерительной технологии пьезометрии [16].

С частотой съемки 140 000 кадр/с регистрировался нестационарный процесс воздействия газовой среды на донную область зонда при его ускорении (см. рис. 2, *б-г*). Данные на рис. 2, *б-г* приведены для направляющего элемента длиной 1000 мм с внешним диаметром 40 мм и внутренним 30 мм.

На рис. 3 представлены результаты высокоскоростной съемки процесса движения измерительного зонда, соединенного проводной связью с регистратором [16], в полном баллистическом цикле. Съемка осуществлялась камерой Phantom v1210 (частота съемки 14 000 кадр/с, время экспозиции 1 мкс). Представленные на рис. 3 результаты визуализации процессов приведены только для иллюстрации технологии исследования. Количественные измерения кинематических характеристик формоизменения осуществляются непосредственно при обработке видеофайла в формате CINE.

Испытания проведены в широком диапазоне значений длины L разгонного элемента, объема U управляющей полости с рабочим газом и массы m зонда. Рабочий газ представляет собой смесь кислорода и водорода в стехиометрическом соотношении объемов 2 : 1. Значения частных параметров реализованных процессов получены при обработке видеофайлов. Ряд значений, регистрируемых в экспериментах, приведен в таблице. Расстояние b , на которое перемещается донная часть зонда до среза разгонного элемента, зависит от заданного в конкретном эксперименте объема рабочей смеси U . Совокупность характерных параметров эксперимента (L, U, m, b) определяет значения параметров, реализуемых в конкретном баллистическом процессе: начальной скорости V и дульной энергии E зонда, среднего ускорения dV/dt зонда, среднего давления P рабочей смеси.

Результаты экспериментов по метанию зондов диаметром 30 мм

Номер эксперимента	L , м	$U \cdot 10^6$, м ³	b , м	m , кг	V , м/с	dV/dt , м/с ²	P , МПа	E , Дж
1	1,000	280,5	0,603	0,148 80	20,01	610	128	30
2	1,000	399,2	0,435	0,070 35	52,25	4282	426	96
3	1,000	243,7	0,655	0,148 80	28,98	1198	119	62
4	0,450	120,1	0,280	0,070 35	31,01	2501	249	34
5	0,450	126,5	0,271	0,070 35	30,41	2452	244	32
6	0,450	108,1	0,297	0,070 35	22,69	1401	140	18

Регистрируемые в данной пусковой установке значения баллистических параметров используются для верификации задач математического моделирования и получения дополнительной информации об особенностях процесса внутренней баллистики: динамике ускорения зонда и течения газа, изменении параметров рабочей смеси.

Анализ пространственно-временной картины движения зонда на основе данных видеорегистрации выявил и позволил оценить воздействие газов на проводную связь при различной степени обтюрации газов. Исследовательская пусковая установка использовалась также для изучения формоизменения 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 направляющего элемента до дульного среза разгонного узла. Проведены опыты с различной ориентацией паза и провода относительно горизонтальной поверхности. Анализ результатов позволил определить 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 движения провода за зондом вне разгонного устройства. Указанные факторы позволяют уменьшить погрешность измерений [9, 13] и время регистрации экспериментальных данных при использовании технологий пьезометрии [9–11, 14, 15]. Большое 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 с частотой до 200 000 кадр/с позволяет провести детальный анализ процесса воздействия продуктов детонации рабочего газа на зонд при его ускорении. Выявлены многократные подходы ударной волны к торцевой поверхности зонда и отражения ее до момента начала движения зонда. Наблюдается также процесс проникания продуктов детонации через обтюрирующий узел при различной степени обтюрации измерительного зонда, что предоставляет дополнительные возможности для регулирования процесса зондирования.

3. Результаты совершенствования технологии зондирования. В пусковой установке [23] управляющая полость (см. рис. 1) выполняет функции быстродействующего клапана. Особенностью технологии зондирования при использовании пусковых установок с быстродействующими клапанами является необходимость заведения измерительного зонда или сборки ведущего устройства с зондом через дульное отверстие пусковой установки до начала эксперимента. В проведенных по такой технологии испытаниях определены необходимые требования к комплексу: наличие пусковой установки, ведущего поддона и измерительной сборки. С помощью комплекса [26] поддерживается непрерывная электрическая связь при движении измерительного зонда на этапах внутренней и внешней баллистики. Измерительные сборки для проведения опытов с зондами с использованием

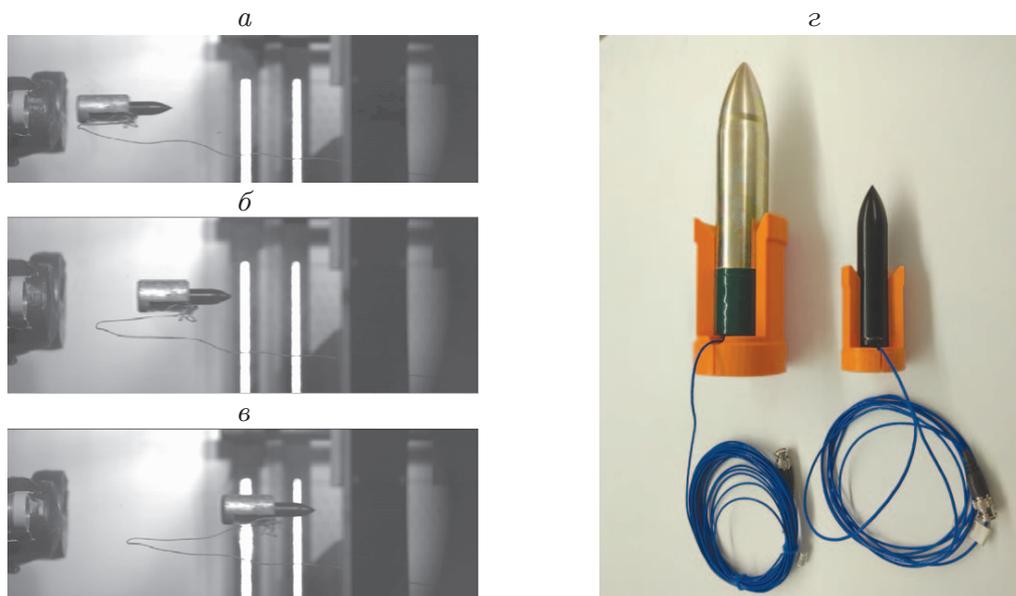


Рис. 4. Результаты визуализации движения измерительной сборки в баллистическом модуле [26] в различные моменты времени (*а-в*) и варианты измерительныхборок [25] (*з*)

технологии с непрерывной электрической связью [16, 25] и результаты видеорегистрации работы комплекса показаны на рис. 4.

Диаметры представленных на рис. 4, *з* пластиковых ведущих устройств (поддонов [25]), разработанных и изготовленных по аддитивной технологии, равны 50 и 80 мм. Зонды снабжены современными ударными ИСР-пьезоакселерометрами или пьезорезистивными ударными MEMS-акселерометрами. На рис. 4, *а-в* показано изменение формы провода связи вне разгонного узла баллистического модуля для измерительной сборки диаметром 50 мм при скорости ее движения, не превышающей скорости звука в воздухе. Результаты анализа данных видеорегистрации с использованием различных конструктивных вариантов зондов позволяют обосновать техническое решение и разработать баллистический измерительный модуль [26]. Модуль в лабораторном исполнении закреплен на ступе мультикалиберной баллистической установки (калибры стволов пусковых установок равны 10 ÷ 100 мм). Модуль выполнен на базе промышленного пневматического пускового устройства с быстродействующим клапаном КБ-28-10.

Заключение. В работе показана возможность повышения информативности эксперимента с помощью подробной визуализации полного цикла баллистического процесса. Результаты анализа формоизменения электропровода при его нестационарном движении с измерительным зондом в баллистическом эксперименте позволили предложить новые технические решения. Совершенствование проводной связи в технологии зондирования актуально для верификации расчетных моделей материалов среды и виртуальных моделей взаимодействия зондов с реологическими средами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Forrester M. J., Frew D. J., Hickerson J. P., Rohwer T. A. Penetration of concrete targets with deceleration-time measurement // Intern. J. Impact Engng. 2003. V. 28, N 5. P. 479–497.
2. Frew D. J., Forrester M. J., Cargile J. D. The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth // Intern. J. Impact Engng. 2006. V. 32, N 10. P. 1584–1594.

3. **Wendong Zhang, Lujiang Chen, Jijun Xiong, Youchun Ma.** Ultra-high g deceleration-time measurement for the penetration into steel target // Intern. J. Impact Engng. 2007. V. 34, N 3. P. 436–447.
4. **Chu Chengqun, Ren Yongfeng, Zhang Qingzhi, et al.** A small-sized hige-performance storage module for hige-g measurement // TELKOMNIKA Indones. J. Electric. Engng. 2014. V. 12, N 2. P. 1265–1270.
5. **Gao Jin-zhong, Sun Yuan-cheng, Du Lian-ming, et al.** Present research and development on measurement technology of penetration into hard targets with hard recovery recorder // Proc. of the 25th Intern. symp. on ballistics, Beijing (China), 17–21 May 2010. Beijing: China Sci. and Technol. Press, 2010. V. 2. P. 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 // Proc. of the 27th Intern. symp. on ballistics, Freiburg (Germany), 22–26 Apr. 2013. Lancaster: DEZteach Publ. Inc., 2013. V. 2. P. 1557–1567.
7. **Батарев С. В., Калмыков П. Н., Кортюков И. И., Осокин А. П.** Ударостойкий регистратор ускорений // Сб. ст. 15-й Юбил. всерос. науч.-техн. конф. шк.-семинара “Передача, прием, обработка и отображение информации о быстропротекающих процессах”, Сочи (Россия), 4–8 окт. 2014 г. Сочи; М.: Издат. дом Акад. им. Н. Е. Жуковского, 2014. С. 66–69.
8. **Брагов А. М., Баландин Вл. В., Котов В. Л. и др.** Экспериментальное исследование удара и проникания конического ударника в мерзлый песчаный грунт // ПМТФ. 2018. Т. 59, № 3. С. 111–120.
9. **Veldanov V. A., Markov V. A., Pusev V. I., et al.** Computation of nondeformable striker penetration into low-strength obstacles using piezoelectric accelerometry data // Tech. Phys. 2011. V. 56, N 7. P. 992–1002.
10. **Велданов В. А., Марков В. А., Пусев В. И. и др.** Применение акселерометрии для исследования динамических механических свойств материалов в усложненных условиях проведения измерений // Наука и образование. 2012. № 8. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/428828.html>. DOI: 10.7463/0812.0428828.
11. **Сотский М. Ю., Велданов В. А., Марков В. А. и др.** Исследование процесса зондирования поверхностного слоя планет с применением измерительных моделей и сред-аналогов // Инж. вестн. 2014. № 11. С. 633–642. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://engbul.bmstu.ru/doc/751797.html>.
12. **Сотский М. Ю., Велданов В. А.** Регистрация истории замедления в мишени геометрически подобных ударников // Инж. журн.: наука и инновации. 2015. Вып. 5. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://engjournal.ru/cata.../mech/mdsb/1400.html>. DOI: 10.18698/2308-6033-2015-3-1384.
13. **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 // Сб. тр. 9-й Всерос. науч. конф. “Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики”, Томск, 21–25 сент. 2016 г. Томск: Том. гос. ун-т, 2016. С. 229–230. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: http://conf.niipmm.tsu.ru/Content/Doc/FPPSM.2016_NIIPMMTSU.pdf.
14. **Сотский М. Ю., Велданов В. А., Ручко А. М. и др.** Адаптация технологии пьезометрии к исследованию процессов высокоскоростного проникания за 45 лет ее развития в МГТУ им. Н. Э. Баумана // Сб. тр. 9-й Всерос. науч. конф. “Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики”, Томск, 21–25 сент. 2016 г. Томск: Том. гос. ун-т, 2016. С. 231–233. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: http://conf.niipmm.tsu.ru/Content/Doc/FPPSM.2016_NIIPMMTSU.pdf.
15. **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. V. 135. P. 10–14.

16. Пат. 2413917 РФ, МКИ F 41 A 31/00, G 01 N 3/30 (2006.01). Устройство и способ проводной электрической связи для регистрации параметров функционирования метаемого тела в полном баллистическом цикле / В. А. Велданов, А. В. Жариков, А. Ф. Овчинников, В. И. Пусев, А. М. Ручко, М. Ю. Сотский, Ю. М. Сотский, В. В. Ткачев. 2011, Бюл. № 7.
17. Sotskiy M. Yu., Veldanov V. A. Two-channel projectile deceleration history registration during their high-speed motion with erosion in target // Proc. of the 29th Intern. symp. on ballistics, Edinburgh (UK), 9–13 May 2016. Lancaster: DEZteach Publ. Inc., 2016. V. 2. P. 2057–2066.
18. Veldanov V. A., Kozlov V. S., Khorev I. E., et al. On stability loss of rod projectiles during penetration // Proc. of the 29th Intern. symp. on ballistics, Edinburgh (UK), 9–13 May 2016. Lancaster: DEZteach Publ. Inc., 2016. V. 2. P. 2108–2117.
19. Fedorov S. V., Babkin A. V., Veldanov V. A., et al. High-velocity penetration of porous material rods // Herald of the Bauman Moscow State Techn. Univ. Ser. Natural Sci. 2016. N 5. P. 18–32. DOI: 10.18698/1812-3368-2016-5-18-32.
20. Sotskiy M. Yu., Veldanov V. A. Deceleration-times data for the verification of calculation models of the penetration with erosion in target // Proc. of the 30th Intern. symp. on ballistics, Long Beach (USA), 11–15 Sept. 2017. Lancaster: DEZteach Publ. Inc., 2017. V. 2. P. 2006–2011. DOI: 10.12783/ballistics2017/16986.
21. Veldanov V. A., Kozlov V. S., Kudyukov N. A., et al. Experimental and numerical results of high-speed penetration of projectiles with concrete and soil // Proc. of the 30th Intern. symp. on ballistics, Long Beach (USA), 11–15 Sept. 2017. Lancaster: DEZteach Publ. Inc., 2017. V. 2. P. 2279–2287. DOI: 10.12783/ballistics2017/17015.
22. Пат. 2625404 РФ, МКИ F 41 F 1/00 (2006.01). Способ ускорения тела в баллистическом эксперименте и устройство для его осуществления / Д. В. Гелин, Н. Д. Гелин, Д. А. Лысов, В. А. Марков, И. В. Марков, В. В. Селиванов, М. М. Сотская, М. Ю. Сотский. 2017, Бюл. № 20.
23. Пат. 2619501 РФ, МКИ F 41 F 1/00 (2006.01). Исследовательская пусковая установка / Д. В. Гелин, Н. Д. Гелин, Д. А. Лысов, В. А. Марков, И. В. Марков, В. В. Селиванов, М. М. Сотская, М. Ю. Сотский. 2017, Бюл. № 14.
24. Сотский М. Ю., Велданов В. А., Гелин Д. В. и др. Новые возможности для расчетно-экспериментального изучения параметров баллистики и функционирования исследовательских зондов // Тез. докл. Междунар. науч. конф. “Фундаментальные и прикладные задачи механики”, Москва, 24–27 окт. 2017 г. М.: Моск. гос. техн. ун-т им. Н. Э. Баумана, 2017. С. 212–213. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://fn.bmstu.ru/conferences-secs/fs/item/615-fundamental-and-applied-problems-of-mechanics-fapm-2017-fs-ru>.
25. Пат. 2685011 РФ, МКИ F 42 B 14/06 (2006.01). Поддон для метаемого измерительного зонда / А. Ю. Гузун, И. С. Крутов, М. М. Сотская, М. Ю. Сотский, М. Ю. Четвернин. 2019, Бюл. № 11.
26. Пат. 2679946 РФ, МКИ G 01 N 3/30 (2006.01). Баллистический модуль и способ проводной электрической связи для регистрации параметров функционирования метаемого измерительного зонда в полном баллистическом цикле / В. А. Велданов, И. С. Крутов, В. И. Пусев, М. Ю. Сотский, Ю. М. Сотский. 2019, Бюл. № 5.

*Поступила в редакцию 10/X 2018 г.,
после доработки — 29/I 2019 г.
Принята к публикации 25/II 2019 г.*