

## Данные об истории замедления тела в реологической среде как основа для верификации расчетных задач

© М.Ю. Сотский, В.А. Велданов

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

*Приведен обзор результатов получения и использования данных об истории замедления тел при высокоскоростном проникании в мишень, которые были опубликованы по докладам авторов, представленным на 23–31-м Международных симпозиумах по баллистике. Эти результаты, относящиеся к области терминальной баллистики — изучению действия тела на мишень, представляют собой данные об истории замедления ударника в материале мишени. Прослежен полувековой путь развития данной технологии как нового научного направления, основанного на кафедре «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. В измерительной технологии ударники оснащены ударными акселерометрами и оригинальными системами электрической связи с регистратором. Теоретические и экспериментальные исследования позволили выявить новый закон сопротивления среды прониканию, который допускает применение инженерных методов для решения задач. С помощью этого закона стало возможным решать пространственные задачи проникания. Регистрируемые опытные данные об истории замедления измерительного ударника предоставили дополнительные возможности для верификации моделей и результатов виртуального моделирования процессов пространственного проникания. Приведены результаты исследований, выполненных авторами в широком диапазоне вариантов начальных условий соударения и конструкций ударников и мишеней, а также разработанные в последнее время новые технические решения в измерительной технологии.*

**Ключевые слова:** ударник, пространственное проникание, закон сопротивления, история замедления, верификация, моделирование

**Введение.** Задача определения динамики высокоскоростного проникания тел (ударников, зондов) в различные мишени (преграды, среды) имеет большое прикладное значение. Такие ударники используются во многих областях техники, к примеру устройство для доставки полезного груза в массив небесного тела (по патенту RU 2349514, 2007, В.А. Велданов и др.). Следует отметить и проект применения ударников, оснащенных разного рода датчиками, для исследования строения поверхности Луны и планет Солнечной системы [1, 2]. Проникая на определенную глубину в поверхностный слой планеты, такие исследовательские зонды-ударники могут передавать информацию о свойствах пород, слагающих кору, причем в процессе проникания должна быть обеспечена сохранность приборных устройств, входящих в их состав. Однако для функционирования таких зондов необходимо определять перегрузки, воздейству-

ющие на проникающий модуль зонда. Давно установлено [3], что при проникании металлических ударников в грунтовые преграды вплоть до скорости взаимодействия 1000 м/с их деформации малы.

В процессе движения ударники можно рассматривать как абсолютно жесткие тела. Динамика проникания недеформируемого ударника в преграду зависит от распределения нормальных и касательных механических напряжений на поверхности его контакта с преградой, которые определяют силовое воздействие на ударник. При расчете проникания недеформируемых ударников в грунтовые преграды используются различные подходы для определения напряжений на контактной границе. В простых (инженерных) методиках расчета контактные напряжения часто вычисляются с помощью эмпирических соотношений [4], которые включают набор коэффициентов, характеризующих динамические механические свойства конкретной рассматриваемой преграды, и учитывают зависимость контактных напряжений от текущей скорости ударника.

В расчетных методиках более высокого уровня силовое воздействие на ударник при его движении в преграде определяется на основе численного моделирования с позиций механики сплошных сред. Экспериментальные и теоретические исследования динамики пространственного проникания для множества вариантов и скоростей взаимодействия ударников с мишенью представлены в [5–11].

Цель настоящего исследования — ретроспективный анализ развития и взаимодействия новой измерительной технологии акселерометрии терминальной баллистики, используемый для решения практических задач, при виртуальном моделировании процессов пространственного проникания ударников в реологические среды.

**Развитие исследований процессов проникания.** В 1969 г. научная группа будущего профессора Ю.В. Хайдина приступила к исследованию пространственного взаимодействия ударников с реологическими средами. С этого времени и началось развитие на кафедре М4 Машиностроительного факультета МВТУ им. Н.Э. Баумана современной научно-педагогической школы, получившей впоследствии название «Школа конечной (терминальной) баллистики» [12]. Тогда же, начиная 1970-х годов, приступили к разработке экспериментально-теоретической методики и проведению экспериментов по пространственному прониканию ударников в грунты на вакуумируемой баллистической установке.

Методы оценки параметров движения ударников в преграде и определения нагрузок требуются при выборе конструктивных параметров и расчете эффективности. Они должны быть максимально быстрыми и простыми, но в то же время должны учитывать значимые для формирования облика проникающих ударников особенности физики процесса. Были отработаны методы киносъемки условий

встречи ударников с преградой, а также методы замера их максимальных перегрузок с помощью упругих контактных датчиков. Анализ и обработка экспериментальных результатов, полученных отечественными и зарубежными исследователями, процессов проникания в грунты ударников различных форм позволили выявить новый закон удельного сопротивления прониканию. При использовании этого закона стало возможным решать пространственные задачи проникания ударника. В 1974 г. мл. науч. сотрудник В.А. Велданов защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата наук, в которой и изложил разработанную экспериментально-теоретическую методику.

Величина силы сопротивления среды прониканию ударника в каждый момент времени зависит от создающихся при текущей скорости удельного давления среды и площади поверхности ударника, контактирующей со средой. Метод расчета проникания недеформируемых ударников в плотные и прочные преграды, основанный на известной гипотезе [4] о полиномиальной зависимости нормального удельного сопротивления  $\sigma_n$ , возникающего в области контакта ударника со средой, от нормальной составляющей скорости проникания ударника  $V_n$ , можно представить следующим выражением:

$$\sigma_n = aV_n^2 + bV_n + c.$$

В более простом виде при внедрении в прочные преграды, оно имеет вид

$$\sigma_n = aV_n^2 + c.$$

Полагается, что в любой точке контакта ударника со средой действует сопротивление трения  $\tau_n$ , зависящее от коэффициента трения  $\mu$  и нормального удельного сопротивления  $\sigma_n$ :

$$\tau_n = \mu\sigma_n.$$

Здесь под  $a$  подразумевается некий аналог плотности среды, а под  $c$  — величина, обобщенно характеризующая прочность среды. При этом значения  $a$ ,  $c$ ,  $\mu$  выбирают из условий сходимости с имеющимися экспериментальными данными.

В 1971 г. были проведены пионерные исследования уникальных экспериментальных методик непрерывной электрической регистрации перегрузок ударников при проникании в преграды и составлен научно-технический отчет об их разработке. Наличие данных об уровне и истории изменения действующих при проникании сил дает возможность усовершенствовать экспериментально-теоретическую методику оценки пространственного проникания ударников в преграды на качественно новом уровне. Кроме того, по данным об истории замедления был предложен способ определения зависимости  $\sigma_n(V_n)$  непосредственно путем эксперимента. Это позволяет уточнять коэффициенты

в законе сопротивления для конкретных реологической среды и принятого в эксперименте диапазона скоростей проникания. В научной группе под руководством мл. науч. сотрудника А.М. Ручко проводилась разработка методик непрерывной электрической регистрации перегрузок. В 1977 г. им была защищена диссертация по разработанным экспериментальным методикам, которые адаптируют известную измерительную технологию пьезометрии (измерение статических давлений с использованием пьезоэффекта) к условиям проведения высокоскоростных баллистических опытов. К 2006 г., в рамках школы конечной баллистики, направление исследований с использованием пьезоакселерометров оформилось как методически, так и терминологически в виде отдельного научного направления — технологии акселерометрии терминальной баллистики (ТБА-технологии) [12–16]. Это совокупность методического, технологического и программного обеспечения испытаний ударников, снабженных акселерометрами, в диапазоне скоростей встречи 100...2500 м/с на этапе действия по мишени. Таким образом, начиная с 1971 г. можно проследить развитие научного направления ТБА-технологии. Первая публикация, посвященная этому вопросу, датируется 1980 г. [17]. Развитие ТБА-технологий и практическое применение получаемых в исследованиях данных (в виде истории замедления тел в мишени) продолжались в направлении увеличения возможностей измерений по скоростям встречи и усложнению начальных условий опытов.

Передовыми для своего времени (1986) стали независимые исследования, проведенные в МВТУ им. Н.Э. Баумана и Институте прикладной физики СО АН СССР (Новосибирск). Как показывает анализ публикаций, новацией стал впервые использованный способ верификации модели материала ударника, предложенной для численного расчета ударного процесса. Верификация была проведена не только по конечному результату ударного процесса (остаточным деформациям), но и по сопоставлению регистрируемых и моделируемых историй замедления ударника и изменения длины его упругой части. Были получены опытные данные пьезометрии, зарегистрированные М.Ю. Сотским. Соответствующие расчетные данные численного моделирования для одинаковых исходных условий были получены В.А. Агурейкиным и Б.П. Крюковым, использовавшими метод «индивидуальных частиц» [18]. Экспериментальные данные, отражающие историю замедления свободного торца стержня при его соударении в нормаль с жесткой мишенью, были получены путем регистрации с помощью технологии пьезометрии. Несколько зарегистрированных показателей при соударении в диапазоне скоростей  $V = 217...222$  м/с стали обобщенным результатом измерений, сведенным в виде единого графика. Для экспериментов в качестве ударника был выбран стержень

из АРМКО-железа диаметром 5 мм и длиной 30 мм. Метаемая мишень была изготовлена из стали с НВ = 2200 МПа. Измерительный преобразователь ускорений был закреплен на торце стержня. Расчет проводился для скорости взаимодействия 222 м/с, фиксировалось осредненное по слою толщиной 1 мм осевое ускорение вблизи торца стержня. Сопоставлялись также зависимости изменения длины части стержня, находящейся в упругом состоянии, определенные по результатам обработки осциллограммы и моделирования. Расчетная длина упругой части зависит от расположения на оси стержня изолинии интенсивности деформаций, соответствующей уровню их интенсивности в 0,18 %, она находится в доверительном интервале результата искомой длины, определяемой опытным путем.

По результатам моделирования получены сведения о положении границы пластической области в процессе соударения, уровнях деформаций, напряжений и скоростей деформирования, а также о динамике деформирования стержня. Установлено, что выбранная для описания поведения ударника упруго-вязкопластическая модель с нелинейным изменением вязкости и определяющими параметрами, функционально связанными с условиями деформирования ударника, адекватно отражает параметры движения ударника, регистрируемые по технологии пьезометрии.

Таким образом, проведенное исследование показало, что экспериментальная информация об истории замедления позволила более обоснованно использовать результаты математического моделирования для получения и анализа многопараметрической дополнительной информации о динамике деформирования ударника в процессе взаимодействия с препятствием. Результаты данного исследования были представлены на нескольких отраслевых и академических научно-технических конференциях [19], но, к сожалению, поданная в академический журнал статья не была в свое время опубликована.

Результаты дальнейшей разработки ТБА-технологии и получаемые при ее применении данные стали значимой частью следующих исследовательских работ, по результатам которых были защищены диссертации на соискание ученой степени доктора наук — Ю.В. Хайдиным (1981, конечная баллистика); на соискание ученой степени кандидата наук — М.Ю. Сотским (1983, отработка технологии измерений применительно к высоким скоростям взаимодействия в условиях обращенного удара), О.Е. Ячником (1983, моделирование высокоскоростных взаимодействий с эрозией материалов ударника и преграды), О.А. Зубаревым (1984, моделирование применительно к срабатывающим ударникам с твердосплавным сердечником), Е.А. Хмельниковым (1990, моделирование применительно к многокомпонентным ударникам, взаимодействующим с многослойными преградами),

С.В. Соколовым (1992, разработка методов автоматизированной системы обработки результатов измерений). Экспериментальные методики измерений (М.Ю. Сотский) вошли в коллективную с сотрудниками НИМИ (ныне — АО «НИМИ им. В.В. Бахирева») работу, отмеченную в 1980 г. Премией Ленинского комсомола в области науки и техники. За работы по моделированию действия высокоэффективных проникающих ударников сотрудникам кафедры М4 МВТУ им. Н.Э. Баумана В.А. Велданову, А.Л. Исаеву, С.П. Илюнину, Д.В. Маринчеву, Ю.М. Пушилину была присуждена Премия Совета Министров СССР в области науки и техники за 1990 г. Ряд исследований, выполненных в разное время в области терминальной баллистики, отмечены в ссылок:

- численный анализ проникания металлического ударника в грунт [20];
- экспериментальное определение силы сопротивления бетонной преграды прониканию [21];
- регистрация нагрузок на ударник в полном баллистическом цикле [22];
- экспериментальные исследования нагрузок на ударник при взаимодействии со сложными, разнесенными и наклонными преградами [23];
- экспериментально-теоретическое исследование проникания при наличии угла атаки [24];
- результаты лабораторной отработки технологии зондирования поверхностного слоя планет [25];
- регистрация замедлений металлических ударников в металлических преградах при проникании с эрозией со скоростями до 1800 м/с [26].

Проведенный авторами статьи анализ известных публикаций в области регистраций истории замедления тел в реологических преградах показал, что отсутствуют мировые аналоги баллистическим «рекордам», установленным в процессе разработки и применения ТБА-технологии:

- максимальные уровни регистрируемых замедлений до  $-10^8$  м/с<sup>2</sup> [10, 16, 23, 26];
- максимальные уровни скоростей взаимодействия с мишенью измерительных зондов до 1,8 км/с [10, 16, 23, 26];
- одновременные регистрации по двум измерительным каналам историй замедления ударника в осевом и боковом направлениях при наклонном проникании в реологическую преграду [4, 10, 23];
- одновременные регистрации по двум измерительным каналам историй замедления в мишени двух элементов многоэлементного ударника [10, 16, 23, 26];

– регистрация истории ускорения — замедления измерительного зонда в полном баллистическом цикле при ускорении в стволе, на траектории полета к мишени и при проникании в мишень [16, 22, 23].

Впервые авторы представили результаты исследований на 23-м Международном симпозиуме по баллистике [20]. Входящие в состав научной группы исследователей В.А. Велданов и М.Ю. Сотский являются членами Международного баллистического общества (IBS). К настоящему времени на прошедших симпозиумах с участием авторов статьи представлено более 15 исследований в области терминальной баллистики. Наряду с вынесенными в список литературы [16, 20, 27] следует отметить и такие работы:

– «Проникание снарядов трубчатой формы в металлические мишени» (24-й Международный симпозиум по баллистике — 24-й ISB);

– «Высокоскоростное проникание группы удлиненных снарядов в металлическую цель» (25-й ISB);

– «Экспериментальная и теоретическая оценка влияния условий удара на историю торможения снарядов в мишени» (26-й ISB);

– «Влияние условий наклонного воздействия удлиненных стержней на историю торможения снарядов в мишени» (26-й ISB);

– «Влияние угла атаки на проникающую способность снарядов с удлиненными стержнями» (27-й ISB);

– «Экспериментальное и теоретическое исследование истории торможения удлиненных снарядов в массивных мишенях» (27-й ISB);

– «Экспериментальное и теоретическое исследование истории торможения удлиненных стержней в мишени при физическом моделировании в условиях геометрического подобия» (27-й ISB);

– «Скоростное пробитие снарядами металлических пластин» (28-й ISB);

– «Регистрация двухканальной истории замедления снарядов при их скоростном движении с эрозией в мишени» (29-й ISB);

– «О потере устойчивости стержневых снарядов при пробитии» (29-й ISB);

– «Экспериментальные и численные результаты высокоскоростного проникания снарядов в бетон и грунт» (30-й ISB).

**Разработка новых технических решений.** В настоящее время разработана лабораторная технология ускорения тела в баллистическом эксперименте [27–29], позволившая осуществлять детальную визуализацию баллистического процесса в полном цикле. Частный вариант такой технологии реализован в научно-экспериментальном комплексе «Фундаментальные и прикладные исследования физики быстропотекающих процессов» кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Для того чтобы обеспечить надежность получения требуемых данных с использованием провод-

ного варианта измерительной технологии (по патенту RU 2413917), требуется детальная информация о функционировании проводной связи на траектории движения зонда. Известные технологии оптической регистрации позволяют проводить исследование на этапе движения зонда вне пускового устройства. Важный для формирования оптимальных форм провода этап движения зонда в пусковом устройстве не обеспечен технологиями визуализации процесса. В публикациях [27–29] рассмотрены варианты применения разработанных новых технических решений (патенты RU 2619501 и RU 2625404) для получения в лабораторных условиях данных в виде видеорегистраций динамики изменения формы провода электрической связи на этапе внутренней баллистики. С применением этой технологии проведена серия опытов с высокоскоростной (до 150 000 кадр/с) регистрацией баллистического процесса. Видеорегистрация осуществлялась от момента начала движения измерительного зонда с проводной электрической связью в пусковом устройстве до окончания движения зонда в мишени.

Анализ позволил выявить картину процесса и степень влияния газов на проводную связь при различной степени их обтюрации. На этом этапе наблюдение за динамикой изменения формы провода связи позволило установить конструктивные критерии, необходимые для обеспечения стабильности пространственных форм при перемещении провода в процессе проведения измерений по технологии контактного динамического зондирования исследуемых сред. Исследован ряд конструктивных вариантов зонда с внешним диаметром, равным внутреннему диаметру пускового устройства.

Результатом выполненных исследований стала разработка устройства, представленного на рис. 1.

Устройство выполнено на основе патента RU 2679946 «Баллистический модуль и способ проводной электрической связи для регистрации параметров функционирования метаемого измерительного зонда в полном баллистическом цикле» (2019, М.Ю. Сотский, В.А. Велданов и др.). Это устройство обеспечивает реализацию технологии контактного динамического зондирования [27, 28] в условиях автономного мобильного стенда.

Баллистический модуль содержит закрепленное на основании 1 пусковое устройство, от которого проведена магистраль (указана стрелкой) для соединения с управляющей аппаратурой. Казенная часть 2 и ствол 3 соединены управляющим устройством 4. Перед дульным срезом ствола 3 размещен опорный узел 5, предназначенный для установки за ним объекта исследования. Он представляет собой ряд опорных элементов. Элементы размещены вокруг точки пересечения  $O$  осевой линии 6 ствола 3 в плоскости, перпендикуляр-

ной этой линии. Перед управляющим узлом установлен измерительный зонд 7, изображенный на рис. 1 штриховой линией. К бортовой аппаратуре зонда электрически подключен провод электрической связи 8, снабженный с обоих концов элементами электрического подключения 9 к бортовой аппаратуре метаемого зонда и к внешней измерительно-регистрирующей аппаратуре.

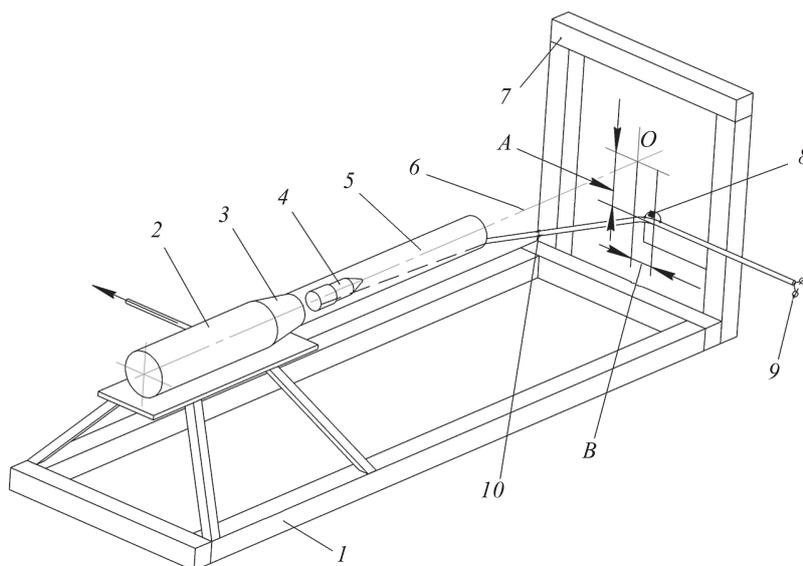


Рис. 1. Общий вид баллистического модуля

Провод впереди зонда внутри ствола подведен вдоль нижней образующей внутренней поверхности ствола к фиксирующему элементу 10, закрепленному на расстоянии  $A$ , которое выбирается в диапазоне от двух до четырех диаметров ствола ниже его осевой линии. Расстояние  $B$  назначается в диапазоне от двух до четырех диаметров ствола в боковом направлении от осевой линии. Диапазоны размеров  $A$  и  $B$  установлены путем анализа данных непрерывной электрической регистрации, а также видеорегистраций функционирования проводной электрической связи в процессе движения зондов со скоростями в диапазоне 20...320 м/с.

Вариант баллистического модуля калибра 50 мм был представлен в [27, 28]. Серии опытов были проведены с целью отработки ведущих устройств к измерительным зондам, внешний диаметр которых меньше внутреннего диаметра пускового устройства. Анализ экспериментальных данных позволил обосновать выбор конструктивных параметров зондов и их ведущих устройств, обеспечивающих стабильность получения результатов измерений путем создания условий для регулярной укладки провода связи при ускорении зонда или сборки с измерительным зондом. В результате реализации регуляр-

ной формы провода связи это также обеспечивает надежность получения данных о процессе функционирования зонда.

Продольный разрез ствола 5, управляющего узла 1 и запорного элемента 9 этого узла показаны на рис. 2.

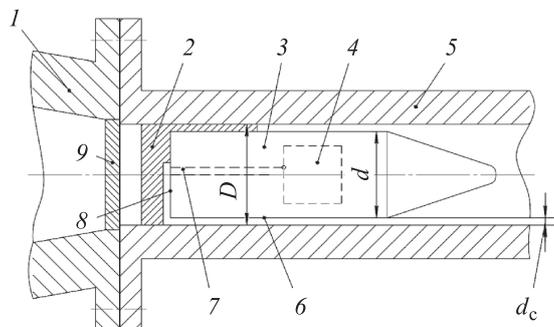


Рис. 2. Пример конструкции измерительного зонда

Перед запорным элементом установлен направляющий элемент 2 с размещенным в нем метаемым измерительным зондом 3. Зонд содержит бортовую аппаратуру 4, электрически соединенную с проводом 7 канала электрической связи. Направляющий элемент 2, выполненный в форме поддона, имеет размер  $D$ , который в радиальном направлении превышает максимальный размер  $d$  метаемого зонда более чем на два диаметра  $d_c$  провода. В направляющем элементе также выполнен паз 8, направленный радиально, с которым сообщается второй паз 7, проходящий вдоль образующей поверхности направляющего элемента. При этом минимальный размер пазов 8 и 6 в поперечном сечении превышает диаметр  $d_c$  провода, размещенного в сообщающихся пазах. Провод может быть разъединен с направляющим элементом.

Для измерительного модуля были разработаны специальные ведущие поддоны. Вариант конструкции выполненного по патенту RU 2685011 поддона для метаемого измерительного зонда показан на рис. 3. Двухсекторные ведущие поддоны изготовлены по аддитивной технологии и отработаны в условиях лаборатории.

Результаты оптической регистрации функционирования проводной связи в полном баллистическом цикле, а также фотографии измерительныхборок зондов с ведущими поддонами представлены в [27, 28]. Кроме того, там же была отмечена регулярность формирования проводной связи как при движении провода впереди сборки до дульного среза, так и в дальнейшем, при движении за зондом на траектории и в исследуемой среде. В разных сериях опытов конструкции зондов имели значительные различия, однако все их изображения зафиксировали вовлечение провода в движение за зондом малыми дугообразными элементами и без натяжения.

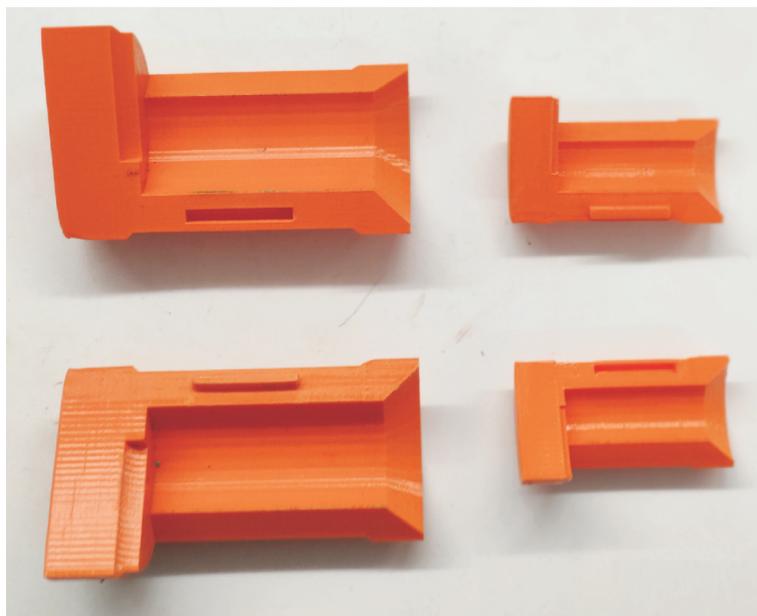


Рис. 3. Секторные ведущие поддоны калибров 50 мм и 80 мм

Преимуществами разработанного модуля являются автономность, повышение надежности и уменьшение периода времени получения достоверной информации, обеспечение стабильности динамического формоизменения провода электрической связи при метании зонда, а также регистрации параметров функционирования метаэмого измерительного зонда в полном баллистическом цикле.

**Заключение.** Всего за полувековой период развития научного направления ТБА-технологии результаты исследований были обобщены и представлены более чем в 220 публикациях, а также изложены более чем в 40 научно-технических отчетах. Технические решения защищены семью авторскими свидетельствами и 14 патентами. ТБА-технологии применены для получения данных о динамических механических свойствах реологических сред и верификации виртуальных моделей проникания при выполнении серии проектов Российского фонда фундаментальных исследований и Минобрнауки России. За последние пять лет был выполнен ряд прикладных исследований с использованием ТБА-технологий, а их результаты представлены более чем в 60 публикациях. За этот же период по результатам разработки частных вариантов ТБА-технологии получено четыре патента РФ на пять объектов патентования. В последнее десятилетие на основе применения технологии пьезометрии в процессах терминальной баллистики с участием авторов статьи выполнены несколько исследовательских работ с использованием данных об истории замедления измерительных зондов в реологических средах. В результате

завершения цикла научно-исследовательских работ решена задача регистрации параметров пространственного движения тел в прочных средах при высокоскоростном ударе. Этот цикл связан с моделированием процесса пространственного проникания тел в мишень с применением расчетных моделей, верифицируемых на основе экспериментальных данных, полученных пьезометрией, о замедлении измерительного зонда в процессе проникания. Представленные в данной работе технология и пусковая установка были в 2018 г. отмечены двумя серебряными медалями XXI Международного салона изобретений и инновационных технологий.

Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана С.В. Федорову, В.В. Селиванову, Д.В. Гелину, Д.А. Лысову и В.А. Маркову за активное участие в рассмотренных теоретических и экспериментальных исследованиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Veldanov V.A., Smirnov V.E., Khavroshkin O.A. Lunar Penetrator: Reducing Overload and Penetration Control. *Solar System Research*, 1999, vol. 33 (5), pp. 432–436. (Official English Translation of *Astronomicheskii Vestnik*.)
- [2] Galimov E.M., Veldanov V.A., Khavroshkin O.B. Cosmogonic researches — change of the paradigm: high-velocity penetrator. “*Penetrometry in the Solar System II*”, *Proc. of the Int. Workshop*. Vienna, Austria, 2009, pp. 233–250.
- [3] Allen W.A., Mayfield E.B., Morrison H.L. *J. Appl. Phys*, 1957, vol. 28 (30), pp. 370–376.
- [4] 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.
- [5] Levy N., Goldsmith W. Normal impact and perforation of thin plates by hemispherically-tipped projectiles — II. Experimental Results. *Int. J. Impact Eng.*, 1984, vol. 2 (4), pp. 299–324.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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 (6), pp. 10–14.  
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.11.003>

- [11] Fedorov S.V., Veldanov V.A., Sotskiy M.Y., Fedorova N.A. Jet Thrust Penetrators for Sounding the Surface Layer of Space Bodies. *Acta Astronautica*, 2021, vol. 180. pp. 189–195. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.12.030>
- [12] Ладов С.В., авт.-сост. *Кафедра «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. 80 лет вместе. 1938–2018*. В.В. Селиванов, ред. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018, с. 328–330.
- [13] Велданов В.А., Ручко А.М., Сотский М.Ю. Ретроспектива становления и развития акселерометрии конечной баллистики в МГТУ им. Н.Э. Баумана. В кн.: *Сб. матер. Междунар. конф. «Проблемы баллистики — 2006», Санкт-Петербург, 19–23 июня 2006 г.* Т. II. Санкт-Петербургский БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2007, с. 74–77.
- [14] Велданов В.А., Жариков А.В., Марков В.А., Пусев В.И., Ручко А.М., Сотский М.Ю., Федоров С.В. Исследование динамических механических свойств песчаного грунта методом акселерометрии. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2008, с. 79–87.
- [15] Велданов В.А., Марков В.А., Пусев В.И., Ручко А.М., Сотский М.Ю., Сотский Ю.М., Федоров С.В. Исследование динамических механических свойств алюминиевых сплавов методом акселерометрии. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2010, № 2, с. 37–46.
- [16] 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.
- [17] Ручко А.М., Сотский М.Ю., Ячник О.Е. Высокочастотный измерительный преобразователь для регистрации ускорений до  $10^7$  м/с<sup>2</sup>. *Тез. докл. Всесоюз. научн.-техн. семинара машиностроительного фак-та*. Москва, Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1980, с. 42–43.
- [18] Агурейкин В.А., Крюков Б.П. Метод индивидуальных частиц для расчета течений многокомпонентных сред с большими деформациями. *Численные методы механики сплошной среды*, 1986, вып. 17 (1), с. 17–31.
- [19] Сотский М.Ю., Агурейкин В.А., Крюков Б.П. Экспериментальное и расчетное исследование процесса взаимодействия стержня с жесткой преградой. *Динамическая прочность и трещиностойкость конструкционных материалов. 2-й Республиканский семинар*. Киев, Изд-во ИПП АН УССР, 1988, с. 166–171.
- [20] Fedorov S.V., Veldanov V.A., Kozlov V.S. Numerical analysis of metal projectile penetration into soil in hydrodynamic mode. *Proc. 23rd International Symposium on Ballistics*. Tarragona, Spain, 2007, vol. 2, pp. 1421–1428.
- [21] Сотский М.Ю., Велданов В.А., Пусев В.И., Ручко А.М., Сотский Ю.М. Экспериментальное обоснование возможности использования технологии акселерометрии для определения силы сопротивления бетонной преграды прониканию ударника *Известия высших учебных заведений. Физика*, 2013, т. 56, № 7/3, с. 95–97.
- [22] 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 высших учебных заведений. Физика*, 2013, т. 56, № 7/3, с. 98–100.
- [23] 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: электронное научно-техническое издание*, 2012, № 8. DOI: 10.7463/0812.0428828 URL: <http://technomag.edu.ru/doc/428828.html>

- [24] 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), с. 158–167. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/blasting/572.html>  
<https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-1-572>
- [25] 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, с. 633–642. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/751797.html>
- [26] Сотский М.Ю., Велданов В.А. Регистрация истории замедления в мишени геометрически подобных ударников. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 5. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2015-5-1400>
- [27] Sotskiy M.Yu., Veldanov V.A. Optical Analysis of Probe Movement in a Ballistic Measuring Module. *Proc. 31st International Symposium on Ballistics*. Hyderabad, India, 2019, vol. 2, pp. 1421–1428.
- [28] Сотский М.Ю., Гелин Д.В., Крутов И.С., Лысов Д.А., Марков В.А., Марков И.В., Четвернин М.Ю. Новые технологии визуализации и измерения параметров баллистических процессов и динамических течений. *Прикладная механика и техническая физика*, 2019, т. 60 (5), (357), с. 217–224. URL: [https://sibran.ru/journal...66&ARTICLE\\_ID=177489](https://sibran.ru/journal...66&ARTICLE_ID=177489)  
DOI: 10.15372/PMTF20190523
- [29] Sotskiy M.Yu., Levin D.P., Selivanov V.V. Special cases of using visualization technology for analyzing the dynamics of gaseous environment. *Fluids*, 2021, vol. 6 (8). <https://doi.org/10.3390/fluids6080290>

Статья поступила в редакцию 16.02.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Сотский М.Ю., Велданов В.А. Данные об истории замедления тела в реологической среде как основа для верификации расчетных задач. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 6. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-6-2183>

**Сотский Михаил Юрьевич** — канд. техн. наук, ведущий инженер кафедры «Высокоточные летательные аппараты» 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](mailto:msotsky.bmstu@mail.ru)

**Велданов Владислав Антонович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 220 публикаций по вопросам терминальной баллистики. Область научных интересов: моделирование пространственного движения объектов в различных средах и механика твердого тела. e-mail: [vevladi@mail.ru](mailto:vevladi@mail.ru)

## **Data on the history of body deceleration in a rheological medium as a basis for verification of computational problems**

© M.Yu. Sotskiy, V.A. Veldanov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*Relying on data on the history of body deceleration during high-speed penetration into the target, the paper reviews the Proceedings of the 23<sup>rd</sup> – 31st International Symposiums on Ballistics, as well as the findings in the field of terminal ballistics, i.e. the study of body acting on a target, and the history of striker deceleration in the target material. The paper observes a half-century path of development of the technology as a new scientific direction, started in the department of High-Precision Airborne Devices at Bauman Moscow State Technical University. Strikers in measuring technology are equipped with shock accelerometers and original electrical recorder communication systems. Theoretical and experimental studies revealed a new law of medium penetration resistance. The law allows the use of engineering methods to solve problems, e.g. spatial problems of penetration. The data on the history of the measuring striker deceleration recorded in the experiments provided additional opportunities for verifying the models and the results of virtual simulation of the processes of spatial penetration. The paper introduces the studies carried out by the authors in a wide range of different initial conditions of impact and designs of strikers and targets. New technical solutions in measuring technology developed recently are also presented.*

**Keywords:** *striker, spatial penetration, resistance law, deceleration history, verification, simulation*

### REFERENCES

- [1] Veldanov V.A., Smirnov V.E., Khavroshkin O.A. Lunar penetrator: reducing overload and penetration control. *Solar System Research*, 1999, vol. 33 (5), pp. 432–436.
- [2] Galimov E.M., Veldanov V.A., Khavroshkin O.B. Cosmogonic researches — change of the paradigm: high-velocity penetrator. Penetrometry in the Solar System II. *Proc. of the Int. Workshop*. Vienna, Austria, 2009, pp. 233–250.
- [3] Allen W.A., Mayfield E.B., Morrison H.L. *J. Appl. Phys.*, 1957, vol. 28 (30), pp. 370–376.
- [4] Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.I., Ruchko A.M., Sotskiy M.Yu., Fedorov S.V. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Technical Physics*, 2011, vol. 81, no. 7, pp. 94–104.
- [5] Levy N., Goldsmith W. Normal impact and perforation of thin plates by hemispherically-tipped projectiles – II. Experimental Results. *Int. J. Impact Eng.*, 1984, vol. 2 (4), pp. 299–324.
- [6] 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.
- [7] 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, no. 28 (5), pp. 479–497.
- [8] Sibeaud J-M., Delmas A., Hottélet 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.

- [9] 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.
- [10] 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 (6), pp. 10–14. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.11.003>
- [11] Fedorov S.V., Veldanov V.A., Sotskiy M.Y., Fedorova N.A. Jet Thrust Penetrators for Sounding the Surface Layer of Space Bodies. *Acta Astronautica*, 2021, vol. 180, pp. 189–195. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.12.030>
- [12] Ladov S.V. *Kafedra «Vysokotochnye letatelnye apparaty» MGTU im. N.E. Baumana. 80 let vmeste. 1938–2018* [Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University. 80 years together. 1938–2018]. V.V. Selivanov, ed. Moscow, BMSTU Publ., 2018, pp. 328–330.
- [13] Veldanov V.A., Ruchko A.M., Sotskiy M.Yu. Retrospektiva stanovleniya i razvitiya akselerometrii konechnoy ballistiki v MGTU im. N.E. Baumana [A retrospective of the formation and development of the accelerometry of final ballistics at Bauman Moscow State Technical University]. In: *Sb. mater. Mezhdunar. konf. «Problemy ballistiki–2006», Sankt-Peterburg, 19–23 iyunia 2006 g. T. II* [Proc. Intern. Conf. “Problems of ballistics–2006”, St. Petersburg, June 19–23, 2006, vol. II]. St. Petersburg, BSTU VOENMEH named after D.F. Ustinov Publ., 2007, pp. 74–77.
- [14] Veldanov V.A., Zharikov A.V., Markov V.A., Pusev V.I., Ruchko A.M., Sotskiy M.Yu., Fedorov S.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2008, no. S, pp. 79–87.
- [15] Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.I., Ruchko A.M., Sotskiy M.Yu., Sotskiy Yu.M., Fedorov S.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2010, no. 2, pp. 37–46.
- [16] 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.
- [17] Ruchko A.M., Sotskiy M.Yu., Yachnik O.E. Vysokochastotny izmeritelny preobrazovatel dlya registratsii uskorenii do  $10^7$  m/s<sup>2</sup> [High-frequency transducer for recording accelerations up to  $10^7$  m/s<sup>2</sup>]. In: *Tez. dokl. Vsesoyuzn. nauchn.-tekhn. seminarov mashinostroitel'nogo fak-va* [Abstracts of reports of All-Union. Sc.-Techn. Sem. of the Mechanical Engineering Faculty]. BMSTU Publ., 1980, pp. 42–43.
- [18] Agureykin V.A., Kryukov B.P. *Chislennyye metody mekhaniki sploshnoy sredy (Numerical methods of continuum mechanics)*, 1986, no. 17 (1), pp. 17–31.
- [19] Sotskiy M.Yu., Agureykin V.A., Kryukov B.P. Eksperimentalnoe i raschetnoe issledovanie protsessa vzaimodeystviya sterzhnya s zhestkoy pregradoy [Experimental and computational study of the process of interaction between a rod and a rigid barrier]. In: *Dinamicheskaya prochnost i treschinostoykost konstruktsionnykh materialov. 2-y Respublikanskiy seminar* [Dynamic strength and crack resistance of structural materials. 2nd Republican Seminar]. 1988, Kiev, IPP AN USSR Publ., pp. 166–171.
- [20] Fedorov S.V., Veldanov V.A., Kozlov V.S. Numerical Analysis of Metal Projectile Penetration into Soil in Hydrodynamic Mode. In: *Proc. 23rd International Symposium on Ballistics*. Tarragona, Spain, 2007, vol. 2, pp. 1421–1428.

- [21] Sotskiy M.Yu., Veldanov V.A., Pusev V.I., Ruchko A.M., Sotskiy Yu.M. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika — Russian Physics Journal*, 2013, vol. 56, no. 7/3, pp. 95–97.
- [22] Sotskiy M.Yu., Veldanov V.A., Pusev V.I., Ruchko A.M., Sotskiy Yu.M. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika — Russian Physics Journal*, 2013, vol. 56, no. 7/3, pp. 98–100.
- [23] 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 periodical*, 2012, no. 8. DOI: 10.7463/0812.0428828 Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/428828.html>
- [24] Veldanov V.A., Dudik D.E., Maksimov M.A., Fedorov S.V., Kozlov V.S. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, iss. 1 (13), pp. 158–167. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-1-572>
- [25] Sotskiy M.Yu., Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.I., Selivanov V.V. *Inzhenerny vestnik — Instrument Engineering*, 2014, no. 11, pp. 633–642. Available at: <http://engbul.bmstu.ru/doc/751797.html>
- [26] Sotskiy M.Yu., Veldanov V.A. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2015, iss. 5. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2015-5-1400>
- [27] Sotskiy M.Yu., Veldanov V.A. Optical Analysis of Probe Movement in a Ballistic Measuring Module. In: *Proc. 31st International Symposium on Ballistics*. Hyderabad, India, 2019, vol. 2, pp. 1421–1428.
- [28] Sotskiy M.Yu., Gelin D.V., Krutov I.S., Lysov D.A., Markov V.A., Markov I.V., Chetvernin M.Yu. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2019, vol. 60 (5), (357), pp. 217–224. DOI: 10.15372/PMTF20190523 Available at: [https://sibran.ru/journal...66&ARTICLE\\_ID=177489](https://sibran.ru/journal...66&ARTICLE_ID=177489)
- [29] Sotskiy M.Yu., Levin D.P., Selivanov V.V. Special cases of using visualization technology for analyzing the dynamics of gaseous environment. *Fluids*, 2021, vol. 6(8). <https://doi.org/10.3390/fluids6080290>

**Sotskiy M.Yu.**, Cand. Sc. (Eng.), Lead Engineer, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 180 research papers on terminal ballistics. Research interests: characteristics of motion of objects in various media and dynamic mechanical characteristics of materials and media. e-mail: [msotsky.bmstu@mail.ru](mailto:msotsky.bmstu@mail.ru)

**Veldanov V.A.**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 220 research papers on terminal ballistics. Research interests: modeling of spatial motion of objects in various media and solid body mechanics. e-mail: [vevladi@mail.ru](mailto:vevladi@mail.ru)