

История исследования взрывной кумуляции в МГТУ им. Н.Э. Баумана

© С.В. Ладов

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

Приведен анализ научных исследований в области взрывной кумуляции. Указаны ученые кафедры боеприпасов МГТУ им. Н.Э. Баумана, которые внесли существенный вклад в развитие теоретических и практических направлений повышения эффективности действия кумулятивных зарядов военного и гражданского назначения. Представлены наиболее важные и оригинальные научные разработки в областях кумулятивного эффекта взрыва, численного моделирования задач кумуляции, запреградного действия кумулятивных зарядов, действия подводного взрыва кумулятивных зарядов и управления кумулятивным эффектом с помощью электромагнитных воздействий и теплового нагрева кумулятивной облицовки. Дан список основополагающих научных статей по данным вопросам. Сформулированы приоритетные исследования на ближайшую перспективу.

Ключевые слова: кумуляция, кумулятивный заряд, кумулятивная облицовка, кумулятивная струя, кумулятивное действие, численное моделирование

Введение. Основные направления научной деятельности ученых МГТУ им. Н.Э. Баумана и созданные на их основе научно-педагогические школы достаточно подробно представлены в книге [1]. Исследования в области физики быстропротекающих процессов, в том числе физики взрыва и физики высокоскоростного удара, связывают с деятельностью профессорско-преподавательского состава и научных сотрудников кафедры «Высокоточные летательные аппараты», созданной в 1938 г. под наименованием «Проектирование боеприпасов» (ПБ-Н) при образовании первых оборонных факультетов: артиллерийского, факультета боеприпасов и бронетанкового [2].

Основателем научно-педагогической школы нестационарной газовой динамики (физики взрыва) на кафедре по праву считается профессор К.П. Станюкович — ученый с мировым именем в этой области [3, 4]. В 1960-х годах он передал эстафету выпускнику кафедры, своему ученику и последователю, нынешнему профессору Л.П. Орленко, который в течение 50 лет читал студентам базовый курс по фундаментальной дисциплине «Прикладная газодинамика» (ныне «Физика взрыва и удара»), конспективно изложенный в учебном пособии [5]. Основная научная составляющая и методологическая основа данного курса изложены в монографии «Физика взрыва» [6]. Постепенно из данного направления научной и педагогической деятельности кафедры выделились другие более узкие направления, связанные с детализацией различных видов действия боеприпасов, в том числе кумулятивного [7, 8].

Указанное направление в течение длительного времени возглавлял профессор Л.П. Орленко, создавший одну из самых многочисленных и продуктивных научных групп. В настоящее время его курирует доцент С.В. Ладов, который разработал и преподает учебный курс «Действие кумулятивных боеприпасов», являющийся одним из модулей крупной учебной дисциплины «Действие боеприпасов».

На основе глубоких исследований физических особенностей процесса схлопывания кумулятивной облицовки, образования кумулятивной струи, ее растяжения и разрыва в свободном полете, проникания в различные преграды учеными кафедры были разработаны инженерные и численные методы расчета функционирования кумулятивных зарядов с коническими и полусферическими облицовками, получившие широкое признание в России и используемые промышленными организациями при проектировании кумулятивных боеприпасов [6, 9–11]. Разработанная Л.П. Орленко инженерная методика расчета действия кумулятивных зарядов с высокими коническими облицовками широко используется в учебном процессе [5–7]. В 1980-х годах на кафедре успешно проведены исследования в области численного моделирования процесса кумуляции и созданы одни из первых в России двухмерные методики расчета функционирования кумулятивных зарядов (кандидатские диссертации А.В. Лукьянова, А.В. Бабкина, В.И. Колпакова).

Разработка методик расчета. В настоящее время проводятся работы по совершенствованию существующих методик расчета с учетом воздействия различных факторов на кумулятивную струю и по расширению их возможностей относительно оценки действия кумулятивных зарядов с полусферическими и пологими (сегментными) облицовками, формирующими удлиненные и компактные поражающие элементы — ударные ядра. Активную работу по данному направлению ведут Л.П. Орленко, А.В. Бабкин, В.И. Колпаков, С.В. Ладов, С.С. Рассоха, С.В. Федоров. Исследовано влияние вращения кумулятивной струи на пробивное действие кумулятивного заряда (кандидатская диссертация С.С. Рассохи), что позволило дополнить имеющиеся расчетные методики учетом данного явления [12]. При этом оценивалось проникание (глубина и диаметр пробоины) не только при действии по гомогенной металлической преграде, но и по преградам из различных других материалов или их комбинаций (стеклопластик, керамика, бетон, мерзлый грунт, лед, вода, динамическая защита и др.) [13].

Проводящиеся в настоящее время С.С. Рассохой, А.В. Бабкиным и С.В. Ладовым исследования в части изыскания способов компенсации потерь бронепробиваемости при вращении кумулятивных боеприпасов связаны с использованием так называемых рифленых или ребристых облицовок, предложенных в 1950 г. американским ученым Р. Эйчельбергером [14].

Направлением современных исследований, проводимых под руководством профессора А.В. Бабкина, является использование в качестве материала кумулятивной облицовки порошковых и реакционно-способных материалов [15].

Исследование действия кумулятивного заряда. Важное прикладное значение имеют экспериментально-теоретические работы, организованные кафедрой, в области исследования запреградного действия взрыва кумулятивного заряда, действия кумулятивных зарядов по подводным, разнесенным и многослойным преградам, а также в области динамической защиты (кандидатские диссертации В.И. Зворыкина, В.И. Васюкова, Ю.М. Дильдина, С.В. Ладова, В.В. Иваненко, А.В. Головачева, В.В. Сапрыкина). Результаты исследований обобщены в докторской диссертации Л.П. Орленко и в учебном пособии по основам проектирования кумулятивных зарядов боеприпасов (1986).

Под руководством Л.П. Орленко еще в середине 1960-х гг. начались новаторские работы в области подводной кумуляции, что позволило всесторонне изучить особенности проникания кумулятивной струи в воде (с использованием специального гидробассейна и аппаратуры для подводной съемки) и совместного действия кумулятивно-фугасного взрыва на подводные конструкции. По данному направлению были защищены две кандидатские диссертации (В.И. Зворыкин, С.В. Ладов). В 1989 г. под редакцией Л.П. Орленко вышла книга, посвященная действию подводного взрыва фугасных и кумулятивных зарядов. В результате этих исследований разработаны практические рекомендации по проектированию кумулятивно-фугасных боевых частей и зарядных отделений подводных боеприпасов (противолодочных авиабомб, реактивных глубинных бомб, малогабаритных торпед, инженерных мин) и методике оценки поражающего действия подводного взрыва [16–20], длительное время остававшиеся не востребованными. Однако в последнее время к этому направлению проявился интерес, на вооружение приняты первые отечественные противолодочные боеприпасы с кумулятивно-фугасным боевым снаряжением.

Управление кумулятивным эффектом взрыва. На кафедре проводятся перспективные исследования относительно возможности управления кумулятивным эффектом взрыва за счет каких-либо внешних воздействий на кумулятивную облицовку или кумулятивную струю на разных стадиях функционирования кумулятивного заряда. Работы возглавляют профессор А.В. Бабкин, защитивший в 2007 г. докторскую диссертацию, канд. техн. наук доцент С.В. Ладов и старший преподаватель С.В. Федоров.

Высокую оценку на международных симпозиумах в России и за рубежом получили работы по исследованию влияния электромагнитного поля на пробивное действие кумулятивных зарядов. Рассмотрен-

ны его различные варианты для управления кумулятивным эффектом взрыва — как снижающие пробивное действие зарядов, так и приводящие к увеличению пробития преграды [6, 21–24]. При этом установлено, что снижение пробивного действия вызывается:

введением в облицовку кумулятивного заряда аксиального магнитного поля непосредственно перед подрывом;

пропуском мощного импульса электрического тока по кумулятивной струе;

поперечным к направлению движения кумулятивной струи магнитным полем в материале преграды.

В свою очередь, увеличение пробивного действия достигается:

путем мягкого воздействия тока на кумулятивную струю;

вследствие создания продольного низкочастотного магнитного поля в области деформирования кумулятивной струи в полете;

при продольном высокочастотном магнитном поле в области деформирования кумулятивной струи в полете.

По указанному направлению С.В. Демидковым защищена кандидатская диссертация, в настоящее время С.В. Федоровым подготовлена к защите кандидатская диссертация. Прикладное значение названной проблемы нашло отражение в совместной с Институтом гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН и ОАО «НИИ стали» (ныне АО «НИИ стали») разработке научных основ проектирования так называемой электродинамической защиты бронетехники и других объектов от действия кумулятивных средств поражения. Авторитет исследований российских ученых по указанной проблеме в 2010 г. подтвержден вручением дипломов сотрудникам кафедры А.В. Бабкину, С.В. Ладову и С.В. Федорову за лучший научный доклад (Best Paper Award) на тему: *Effect of External Magnetic Fields on Shaped-Charge Operation* (Влияние внешних магнитных полей на функционирование кумулятивного заряда) на престижном международном симпозиуме по высокоскоростному соударению (HVIS 2010, Freiburg, Germany).

Возможным способом управления кумулятивным эффектом взрыва является также предварительный (до подрыва кумулятивного заряда) нагрев кумулятивной облицовки до определенной температуры, приводящий, с одной стороны, к увеличению удлинения металлической струи за счет разупрочнения материала кумулятивной облицовки, с другой — не нарушающий состояние взрывчатого вещества заряда вследствие чрезмерного теплового нагрева. Определены оптимальные режимы такого нагрева и предложены некоторые схемные решения в конструкции кумулятивных боеприпасов, которые могут привести к увеличению глубины пробития преграды кумулятивной струей [25–27]. По данному направлению на кафедре под руководством доцента А.В. Бабкина (ныне профессора) были защищены кандидатские диссертации Г.Е. Маркеловым и П.А. Бондаренко.

В настоящее время приобрели актуальность работы по формированию высокоскоростных компактных элементов,двигающихся со скоростями 8...10 км/с и более, при функционировании кумулятивных зарядов с комбинированными облицовками, которые имеют струеобразующую часть в форме оболочек вращения положительной гауссовой кривизны и отсекающую часть в форме цилиндрической оболочки [28–30]. Такие работы важны с точки зрения моделирования высокоскоростного взаимодействия тел с защитной конструкцией летательных аппаратов в наземных условиях, а также для изучения свойств материалов при интенсивном нагружении. По данной тематике под руководством С.В. Ладова была защищена кандидатская диссертация Я.М. Никольской.

Технологические аспекты взрывной кумуляции. Следует упомянуть еще об одном важном направлении исследований в области разработки боеприпасов — влиянии различных технологических факторов на пробивное действие кумулятивных зарядов. Такие исследования организованы на кафедре «Технологии ракетно-космического машиностроения» (ранее кафедра «Технологии специального машиностроения») выпускниками кафедры боеприпасов В.А. Тарасовым, В.Д. Баскаковым и В.И. Колпаковым.

Профессор В.А. Тарасов является основоположником научного направления в области разработки и исследования прецизионных технологий изготовления командных деталей высокоэффективных боеприпасов различного назначения, он защитил докторскую диссертацию по теме на стыке *боеприпасной* и *технологической* специальностей. В.А. Тарасов, В.Д. Баскаков и В.И. Колпаков разработали основы теории неидеальной кумуляции, которая учитывает возмущающее действие факторов технологической природы на кумулятивные поражающие элементы и вероятностные характеристики эффективного действия кумулятивных и снарядоформирующих зарядов.

В 2012–2013 гг. доцентами В.Д. Баскаковым и В.И. Колпаковым защищены докторские диссертации по специальности «Средства поражения и боеприпасы», которые предварительно прошли апробацию и получили положительную оценку.

Заключение. Отметим, что исследования в области кумулятивного эффекта взрыва обобщены в достаточно объемной главе «Кумуляция» монографии «Физика взрыва» под редакцией Л.П. Орленко [6], а также нашли отражение в десяти учебных пособиях и методических указаниях, изданных в 1995–2018 гг.

В настоящее время исследования в области взрывной кумуляции на кафедре боеприпасов активно продолжают. Приоритетными являются следующие исследования:

- использование перспективных порошковых и различных активных материалов в кумулятивных облицовках;

- влияние вращения кумулятивной струи и боеприпаса на эффективность пробивного действия;
- влияние электромагнитного воздействия на эффективность пробивного действия зарядов;
- разработка боеприпасов двойного (кумулятивно-фугасного) и тройного (кумулятивного, кинетического, фугасного) действий;
- разработка новых перспективных схем кумулятивных боеприпасов (использование тандемных зарядов, различных комбинированных облицовок, поперечного и бокового расположения кумулятивных зарядов и др.) и численных трехмерных методик расчета функционирования кумулятивных и снарядоформирующих зарядов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Федоров И.Б., Колесников К.С., ред. *Научные школы Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана. История развития*. 2-е изд., доп. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005, 464 с.
- [2] Селиванов В.В., ред. *Кафедра «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Люди, события, история развития. 1938–2013*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013, 422 с.
- [3] Селиванов В.В., Ладов С.В., Марков В.А. Кирилл Петрович Станюкович — основатель научно-педагогической школы по физике взрыва в МГТУ им. Н.Э. Баумана. *Изв. Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2016, вып. 1 (91), с. 127–132.
- [4] Зимин В.Н., Калугин В.Т., Ладов С.В. От ракетной техники до физики взрыва (к 100-летию выдающихся ученых педагогов В.И. Феодосьева и К.П. Станюковича). *Оборонная техника*, 2016, № 5, с. 54–61.
- [5] Орленко Л.П. *Физика взрыва и удара*. 2-е изд., испр. Москва, Физматлит, 2008, 304 с.
- [6] Андреев С.Г., Бабкин А.В., Имховик Н.А., Кобылкин И.Ф., Колпаков В.И., Ладов С.В. и др. *Физика взрыва*. В 2 т. Т. 2. 3-е изд., испр. Орленко Л.П., ред. Москва, Физматлит, 2004, 656 с.
- [7] Бабкин А.В., Велданов В.А., Имховик Н.А., Кобылкин И.Ф., Колпаков В.И., Ладов С.В. и др. *Боеприпасы*. В 2 т. Т. 1. Селиванов В.В., ред. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 506 с.
- [8] Ладов С.В., Кобылкин И.Ф. *Использование кумулятивных зарядов во взрывных технологиях*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1995, 47 с.
- [9] Бабкин А.В., Ладов С.В., Маринин В.М., Федоров С.В. Особенности инерционного растяжения кумулятивных струй в свободном полете. *Прикладная механика и техническая физика*, 1997, т. 38, № 2, с. 3–9.
- [10] Бабкин А.В., Ладов С.В., Маринин В.М., Федоров С.В. Влияние сжимаемости и прочности материала кумулятивных струй на особенности их инерционного растяжения в свободном полете. *Прикладная механика и техническая физика*, 1997, т. 38, № 2, с. 10–18.
- [11] Бабкин А.В., Ладов С.В., Маринин В.М., Федоров С.В. Закономерности растяжения и пластического разрушения металлических кумулятивных струй. *Прикладная механика и техническая физика*, 1999, т. 40, № 4, с. 25–35.
- [12] Бабкин А.В., Ладов С.В., Рассоха С.С. Методика расчета параметров функционирования вращающихся кумулятивных зарядов. *Оборонная техника*, 2010, № 1–2, с. 23–30.

- [13] Ладов С.В., Колпаков В.И., Федоров С.В. Особенности пробития ледяных и грунтобетонных преград кумулятивными зарядами. *Оборонная техника*, 1995, № 4, с. 39–45.
- [14] Рассоха С.С., Ладов С.В., Бабкин А.В. Анализ осевого вращательного движения рифленых кумулятивных облицовок. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2016, № 6, с. 74–88.
- [15] Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В. Особенности поведения в свободном полете кумулятивных струй из композитных порошковых облицовок. *Оборонная техника*, 2007, № 3–4, с. 38–53.
- [16] Бабкин А.В., Васюков В.И., Ладов С.В., Федоров С.В. Физическая картина и параметры взрыва кумулятивного заряда в безграничной жидкости. *Оборонная техника*, 2002, № 1–2, с. 65–71.
- [17] Колпаков В.И., Ладов С.В., Орленко Л.П. Методика расчета глубины проникания кумулятивной струи в воду. *Оборонная техника*, 2004, № 11, с. 60–64.
- [18] Бабкин А.В., Колпаков В.И., Ладов С.В., Федоров С.В., Икоев Л.Н., Пронозов А.Г. Использование кумулятивно-фугасных боевых зарядных отделений в малогабаритных торпедах для поражения двухкорпусных подводных лодок. *Оборонная техника*, 2005, № 4–5, с. 35–43.
- [19] Ладов С.В. Возможный механизм разрушения корпуса подводной лодки при взрыве кумулятивного заряда. *Изв. Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2015, вып. 1 (85), с. 54–62.
- [20] Ладов С.В. Повышение эффективности действия малогабаритных противолодочных торпед. *Изв. Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2016, вып. 1 (91), с. 73–79.
- [21] Бабкин А.В., Колычев М.Е., Ладов С.В., Федоров С.В. О возможном механизме разрушения кумулятивной струи импульсом тока. *Оборонная техника*, 1995, № 4, с. 47–54.
- [22] Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В. Электрическая защита перспективной боевой машины XXI века. *Оборонная техника*, 2000, № 1–2, с. 19–25.
- [23] Shvetsov G.A., Matrosov A.D., Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. Effect of external magnetic fields on shaped-charge operation. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, vol. 38, iss. 6, pp. 521–526.
- [24] Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В. Проявление магнитокумулятивного эффекта при взрыве кумулятивного заряда с созданным в его облицовке аксиальным магнитным полем. *Журнал технической физики*, 2003, т. 73, № 8, с. 111–117.
- [25] Бабкин А.В., Бондаренко П.А., Федоров С.В., Андреев С.Г., Ладов С.В., Колпаков В.И. Предельно допустимые параметры импульсного теплового воздействия на кольцевые системы с энергетическим материалом. *Оборонная техника*, 2000, № 1–2, с. 35–40.
- [26] Бабкин А.В., Колпаков В.И., Ладов С.В., Плетнев С.Л., Федоров С.В., Бондаренко П.А. О возможностях «теплового» способа повышения пробития кумулятивных зарядов. *Оборонная техника*, 2000, № 1–2, с. 41–48.
- [27] Бабкин А.В., Бондаренко П.А., Федоров С.В., Колпаков В.И., Андреев С.Г., Ладов С.В. Пределы увеличения глубины пробития кумулятивного заряда при импульсном тепловом воздействии на его облицовку. *Физика горения и взрыва*, 2001, т. 37, № 6, с. 124–132.
- [28] Федоров С.В., Баянова Я.М., Ладов С.В. Влияние параметров кумулятивного заряда на формирование высокоскоростных компактных элементов. *Изв. Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2012, вып. 1 (71), с. 51–57.

- [29] Федоров С.В., Баянова Я.М., Ладов С.В. Численный анализ влияния геометрических параметров комбинированной кумулятивной облицовки на массу и скорость формируемых взрывом компактных элементов. *Физика горения и взрыва*, 2015, т. 51, № 1, с. 150–164.
- [30] Федоров С.В., Ладов С.В., Никольская Я.М., Бабурин М.А., Баскаков В.Д., Курепин А.Е и др. Формирование потока высокоскоростных частиц кумулятивными зарядами с облицовками типа полусфера-цилиндр дегрессивной толщины. *Физика горения и взрыва*, 2017, т. 53, № 4, с. 122–125.

Статья поступила в редакцию 15.03.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ладов С.В. История исследования взрывной кумуляции в МГТУ им. Н.Э. Баумана. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 6.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-6-1776>

Ладов Сергей Вячеславович — канд. техн. наук, чл.-кор. РАЕН, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 350 научных работ в области физики взрыва. e-mail: sm4-2009@mail.ru

History of shaped charge effect studies in Bauman Moscow State Technical University

© S.V. Ladov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article analyses scientific investigations of the shaped charge effect. It lists the scientists who work or worked at the munitions department of Bauman Moscow State Technical University and contributed significantly to the development of theoretical and applied methods of increasing shaped charge efficiency for both military and civilian purposes. We present the most important and original scientific investigations concerning the shaped charge effect, numerical simulation of shaped charge problems, post-penetration effect of shaped charges, effects of underwater shaped charge explosion and controlling the shaped charge effect by means of electromagnetic forces and heating of the shaped charge liner. We provide a list of fundamental scientific publications dealing with these issues. We state priority directions for research in the immediate future.

Keywords: *shaped-charge effect, shaped charge, shaped charge liner, shaped charge jet, shaped-charge effect, numerical simulation*

REFERENCES

- [1] Fedorov I.B., Kolesnikov K.S., ed. *Nauchnye shkoly Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Baumana. Istoriya razvitiya* [Scientific schools of the Bauman Moscow State Technical University. History of development]. 2nd ed., expanded. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2005, 464 p.
- [2] Selivanov V.V., ed. *Kafedra Vysokotochnye letatelnye apparaty MGTU im. N.E. Baumana. Lyudi, sobytiya, istoriya razvitiya* [BMSTU Department of High-Precision Airborne Devices. Personalities, events, history]. 1938–2013. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2013, 422 p.
- [3] Selivanov V.V., Ladov S.V., Markov V.A. *Izv. Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk — Proceedings of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences*, 2016, no. 1 (91), pp. 127–132.
- [4] Zimin V.N., Kalugin V.T., Ladov S.V. *Oboronnaya tekhnika — Defence technology*, 2016, no. 5, pp. 54–61.
- [5] Orlenko L.P. *Fizika vzryva i udara* [Physics of explosion and impact]. 2nd ed., revised. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2008, 304 p.
- [6] Andreev S.G., Babkin A.V., Imkhovik N.A., Kobylkin I.F., Kolpakov V.I., Ladov S.V. et al. *Fizika vzryva* [Physics of Explosion]. In 2 vols. Vol. 2. 3rd ed., revised. Orlenko L.P., ed. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2004, 656 p.
- [7] Babkin A.V., Veldanov V.A., Imkhovik N.A., Kobylkin I.F., Kolpakov V.I., Ladov S.V. et al. *Boepripasy* [Munitions]. In 2 vols. Vol. 1. Selivanov V.V., ed. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2016, 506 p.
- [8] Ladov S.V., Kobylkin I.F. *Ispolzovanie kumulyativnykh zaryadov vo vzryvnykh tekhnologiyakh* [Using shaped charges in explosive technologies]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 1995, 47 p.
- [9] Babkin A.V., Ladov S.V., Marinin V.M., Fedorov S.V. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1997, vol. 38, no. 2, pp. 3–9.

- [10] Babkin A.V., Ladov S.V., Marinin V.M., Fedorov S.V. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1997, vol. 38, no. 2, pp. 10–18.
- [11] Babkin A.V., Ladov S.V., Marinin V.M., Fedorov S.V. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1999, vol. 40, no. 4, pp. 25–35.
- [12] Babkin A.V., Ladov S.V., Rassokha S.S. *Oboronnaya tekhnika — Defence technology*, 2010, no. 1–2, pp. 23–30.
- [13] Ladov S.V., Kolpakov V.I., Fedorov S.V. *Oboronnaya tekhnika — Defence technology*, 1995, no. 4, pp. 39–45.
- [14] Rassokha S.S., Ladov S.V., Babkin A.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2016, no. 6, pp. 74–88.
- [15] Babkin A.V., Ladov S.V., Fedorov S.V. *Oboronnaya tekhnika — Defence technology*, 2007, no. 3–4, pp. 38–53.
- [16] Babkin A.V., Vasyukov V.I., Ladov S.V., Fedorov S.V. *Oboronnaya tekhnika — Defence technology*, 2002, no. 1–2, pp. 65–71.
- [17] Kolpakov V.I., Ladov S.V., Orlenko L.P. *Oboronnaya tekhnika — Defence technology*, 2004, no. 11, pp. 60–64.
- [18] Babkin A.V., Kolpakov V.I., Ladov S.V., Fedorov S.V., Ikoev L.N., Pronozov A.G. *Oboronnaya tekhnika — Defence technology*, 2005, no. 4–5, pp. 35–43.
- [19] Ladov S.V. *Izv. Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk — Proceedings of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences*, 2015, no. 1 (85), pp. 54–62.
- [20] Ladov S.V. *Izv. Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk — Proceedings of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences*, 2016, no. 1 (91), pp. 73–79.
- [21] Babkin A.V., Kolychev M.E., Ladov S.V., Fedorov S.V. *Oboronnaya tekhnika — Defence technology*, 1995, no. 4, pp. 47–54.
- [22] Babkin A.V., Ladov S.V., Fedorov S.V. *Oboronnaya tekhnika — Defence technology*, 2000, no. 1–2, pp. 19–25.
- [23] Shvetsov G.A., Matrosov A.D., Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, vol. 38, iss. 6, pp. 521–526.
- [24] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Technical Physics*, 2003, vol. 73, no. 8, pp. 111–117.
- [25] Babkin A.V., Bondarenko P.A., Fedorov S.V., Andreev S.G., Ladov S.V., Kolpakov V.I. *Oboronnaya tekhnika — Defence technology*, 2000, no. 1–2, pp. 35–40.
- [26] Babkin A.V., Kolpakov V.I., Ladov S.V., Pletnev S.L., Fedorov S.V., Bondarenko P.A. *Oboronnaya tekhnika — Defence technology*, 2000, no. 1–2, pp. 41–48.
- [27] Babkin A.V., Bondarenko P.A., Fedorov S.V., Kolpakov V.I., Andreev S.G., Ladov S.V. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2001, vol. 37, no. 6, pp. 124–132.
- [28] Fedorov S.V., Bayanova Ya.M., Ladov S.V. *Izv. Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk — Proceedings of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences*, 2012, no. 1 (71), pp. 51–57.
- [29] Fedorov S.V., Bayanova Ya.M., Ladov S.V. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2015, vol. 51, no. 1, pp. 150–164.

- [30] Fedorov S.V., Ladov S.V., Nikolskaya Ya.M., Baburin M.A., Baskakov V.D., Kurepin A.E. et al. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 122–125.

Ladov S.V., Cand. Sc. (Eng.), Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences, Assoc. Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 350 scientific publications in the field of physics of explosion. e-mail: sm4-2009@mail.ru