

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 534.222.2; 634.454

doi: 10.18698/0536-1044-2019-8-65-72

Определение скорости гиперзвуковых компактных элементов в наземной испытательной установке*

С.И. Герасимов^{1,2}, И.А. Одзерихо^{1,2}, Р.В. Герасимова¹, Б.А. Яненко¹

¹ Саровский физико-технический институт — филиал НИЯУ МИФИ

² Институт проблем машиностроения РАН

Determining the Velocity of Hypersonic Compact Elements in Ground Testing Plants

S.I. Gerasimov^{1,2}, I.A. Odzeriho^{1,2}, R.V. Gerasimova², B.A. Yanenko^{1,2}

¹ Sarov Institute of Physics and Technology — Branch of National Research Nuclear University MEPhI

² Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences

Защита космических аппаратов от высокоскоростного удара при встрече с метеоритными частицами и техногенным мусором является актуальной проблемой. Приведены методы определения реакции сложных конструкций на удар частиц с космическими скоростями. Для нахождения противометеоритной стойкости материалов и конструкций и изучения реакции материалов в условиях высокоинтенсивного ударного нагружения разработаны схемы получения и регистрации высокоскоростных металлических компактных элементов, движущихся с гиперзвуковыми скоростями, с использованием кумулятивных взрывных метаяющих устройств на основе мощных конденсированных взрывчатых веществ. Применение облицовки формы полусферы-цилиндр позволило отработать кумулятивный заряд, устойчиво формирующий стальной компактный элемент со скоростью около 6 км/с. Приведены результаты численного расчета и экспериментальной отработки такого разгонного устройства. На его примере отработан метод определения скорости гиперзвукового ударника по визуализации головной ударной волны при его входе в воду.

Ключевые слова: взрывное метаяющее устройство, компактный элемент, гиперзвуковая скорость, визуализация ударной волны

Protection of spacecraft from high-speed impact when encountering meteorite particles and man-made debris is currently a pressing issue. This article presents methods for determining the reaction of complex structures to the impact of particles with cosmic velocities. To determine the anti-meteorite resistance of materials and structures and to study the reaction of materials under high-intensity shock loading, schemes are developed for the production and registration of high-speed metal compact elements moving at hypersonic speeds using cumulative explosive throwing devices based on high-power condensed explosives. The use of the 'hemisphere-cylinder' shaped lining made it possible to test a shaped charge, consistently forming a steel compact element with a velocity of 6

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ по проекту №17-08-01096.

km/s. The paper presents the results of numerical calculations and experimental testing of such a booster. Using this device, a method for determining the speed of the hypersonic striker pin is developed based on visualization of the head shock wave at the entrance of the striker into water.

Keywords: explosive throwing device, compact unit, hypersonic velocity, shock wave visualization

Защита космического аппарата от метеороидов и орбитальных осколков является актуальной проблемой, которую в наземных условиях изучают, в частности, путем решения задачи фрагментации ударника на сеточном экране при высоких скоростях соударения [1, 2]. Здесь разгон ударника осуществляется с помощью легкогазовой баллистической установки.

Более экономичным методом разгона может служить использование взрывных метательных устройств (ВМУ). При отработке ВМУ важнейшей задачей является определение скорости ударника перед соударением. Так как полет ударника с гиперзвуковой скоростью в атмосфере сопровождается ионизацией воздуха, применение обычных скоростных камер для регистрации в отраженном свете неэффективно.

Цель работы — определение скорости ударника в заданной точке траектории по визуализации ударной волны в воде, создаваемой при его соударении с водой.

Описание метода. Определение реакции сложных конструкций на удар частиц с космическими скоростями является сложной задачей. Для ее решения не всегда достаточно расчетных методов, и часто требуются непосредственные экспериментальные исследования. Для их проведения в наземных условиях используют кумулятивные ВМУ, которые при относительной простоте конструкции и невысокой стоимости обеспечивают метание КЭ массой от долей до нескольких десятков граммов со скоростями движения более 5 км/с.

Отличительной особенностью таких устройств является то, что КЭ формируется из головной части кумулятивной струи, поэтому его масса априори неизвестна. Кроме того, при движении в воздушной среде с высокой скоростью этот параметр из-за горения и абляции может существенно изменяться. Тем не менее для корректного моделирования процесса взаимодействия метеоритно-техногенной частицы с корпусом космического аппарата необходимо знать ее массу и скорость движения с хорошей точностью.

Для определения массы предложен метод, основанный на регистрации параметров ударной волны, формируемой при проникании высокоскоростного КЭ в прозрачную плотную среду, например, в воду.

Рассмотрим ударник, ускоряемый импульсно в момент времени $t = 0$ до скорости соударения v_i и проникающий в сжимаемую жидкость по прямолинейной траектории в направлении $+z$, где z — ось проникновения.

Торможение скорости ударника можно описать с помощью второго закона Ньютона:

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = -\frac{1}{2} C_d A_p \rho_w v_p^2,$$

где m_p и v_p — масса и скорость движения ударника; C_d — коэффициент сопротивления, зависящий от скорости v_p ; A_p — площадь проекции ударника; ρ_w — плотность жидкости.

Используя постоянную затухания скорости $\beta = C_d A_p \rho_w / 2m_p$, получим темп изменения кинетической энергии с глубиной проникания dE_p/dZ_b , связанной со скоростью движения:

$$\frac{dE_p}{dZ_b} = -m_p v_p^2 \frac{dv_p}{dZ_b} = m_p \beta v_p^2,$$

где $E_p = m_p v_p^2$; Z_b — глубина проникания.

Чтобы описать изменение коэффициента сопротивления в зависимости от числа Маха, необходимо выбрать геометрию ударника. Для решения поставленной задачи выбран ударник сферической формы. В исследованиях с низкой скоростью движения ударника коэффициент сопротивления обычно принимают постоянным. При большой скорости движения он сильно зависит от числа Маха M (особенно в трансзвуковом режиме).

Для сферы соотношение коэффициента сопротивления с числом Маха показывает существование трех режимов, классифицируемых по скорости: дозвуковой — $M < 0,5$, $C_d = 0,384$; трансзвуковой — $M = 0,5 \dots 1,4$, $C_d = 0,6396 + 0,5974(M - 1) - 0,1618(M - 1)^2 - 0,7212(M - 1)^3$; сверхзвуковой — $M > 1,4$, $C_d = 0,7624 + 0,2398(M^{-1} - 1/2,75) - 0,475(M^{-1} - 1/2,75)^2$ [3, 4]. С помощью этих данных уравнение ди-

намики ударной волны и каверны можно представить в виде функции глубины проникания.

Измеряя начальную скорость ударной волны теневым методом, можно определить скорость ударника при входе в воду.

Для экспериментальной проверки предлагаемого метода использовано ВМУ типа полусфера–цилиндр (ПЦ) [5]. Такое устройство состоит из цилиндрического заряда взрывчатого вещества (ВВ), в торце которого выполнена полость в форме ПЦ, где размещена металлическая облицовка аналогичной формы. При подрыве заряда ВВ облицовка сходится к оси. Из полусферической части облицовки формируется относительно толстая слабоградиентная (растягивающаяся) кумулятивная струя.

Под воздействием сходящейся цилиндрической части облицовки происходит формирование нужного распределения скорости в струе — обеспечение безградиентного головного участка и высокоградиентной шейки. В результате такого распределения скорости головной участок струи отделяется от растягивающейся и разрушающейся в полете шейки, образуя КЭ.

Численное моделирование. Для понимания процессов, происходящих при работе ВМУ типа ПЦ, а также определения параметров формируемого им КЭ проведены двумерные численные исследования с использованием комплекса программ ЭГИДА [6]. В комплексе реализованы методики, позволяющие выполнять расчеты газо- и гидродинамических течений с учетом физической вязкости, прочностных свойств среды, теплопроводности, детонации ВВ, турбулентного перемешивания, наличия дисперсных примесей, тонких оболочек, магнитного поля и фазовых переходов.

Использована регулярная четырехугольная счетная сетка, узлы которой в процессе счета могут двигаться достаточно произвольно. С помощью специальных программ можно создавать счетные сетки, представляющие собой любую комбинацию лагранжевых и эйлеровых сеток, движущихся с массовой и произвольной скоростью среды соответственно. Это позволяет применять в расчетах сетки, с одной стороны, максимально адаптирующиеся к течению, с другой — не допускающие искажений, приводящих к аварийным остановкам.

Имеются широкие возможности построения разнообразных геометрий. В комплексе использованы континуальный подход для всех компо-

нентов и непрерывное представление потоков через стороны счетных ячеек. При этом для предотвращения счетной диффузии (размывания) контактных границ между компонентами в процессе счета задействован метод концентраций, который ранее был сформулирован для газодинамических течений [6].

Двумерное численное моделирование рассматриваемых задач проведено в осесимметричной постановке на неподвижной эйлеровой сетке. Счетная сетка была прямоугольной, при этом в наиболее интересных областях (в районе облицовки) ячейки представляли собой квадраты, а в менее значимых (в зонах инициирования, периферии заряда ВВ) — прямоугольники.

Минимальный размер ячеек $h \approx 0,1$ мм выбран путем тестовых расчетов на сходимость результатов. Граничные условия: на всех границах счетной области, кроме оси симметрии, — условие вытекания, на оси симметрии — абсолютно жесткая стенка.

Для учета упругопластических свойств металлов применена расчетная схема Уилкинса [7]. Уравнение состояния материалов задано в форме Ми–Грюнайзена [8]. Значения физико-механических характеристик конструкционных материалов выбраны из библиотеки программного комплекса. Продукты взрыва заряда ВВ описаны с помощью уравнений состояния Зубарева [9] с параметрами из библиотеки программного комплекса.

Разрушение материала происходило при достижении растягивающим напряжением откольной прочности, которую приняли примерно на 30 %, меньшей, чем у известных значений для данных материалов (указанных, например, в работе [7]). Это сделано с целью обеспечения некоторого запаса по отсутствию разрушения.

Результаты численного расчета ВМУ типа ПЦ приведены на рис. 1 разрезами (полями плотности) на последовательные моменты времени t .

Согласно результатам расчета, в момент времени $t = 28$ мкс сформировалась кумулятивная струя с утолщенной головной частью и высокоградиентной растягивающейся шейкой, за которой следует массивный низкоскоростной пест. В процессе движения практически безградиентная головная часть струи отделится от растягивающейся и разрушающейся шейки, образуя КЭ со следующими параметрами: массой — около 17 г, скоростью движения — около 5,8 км/с [10].

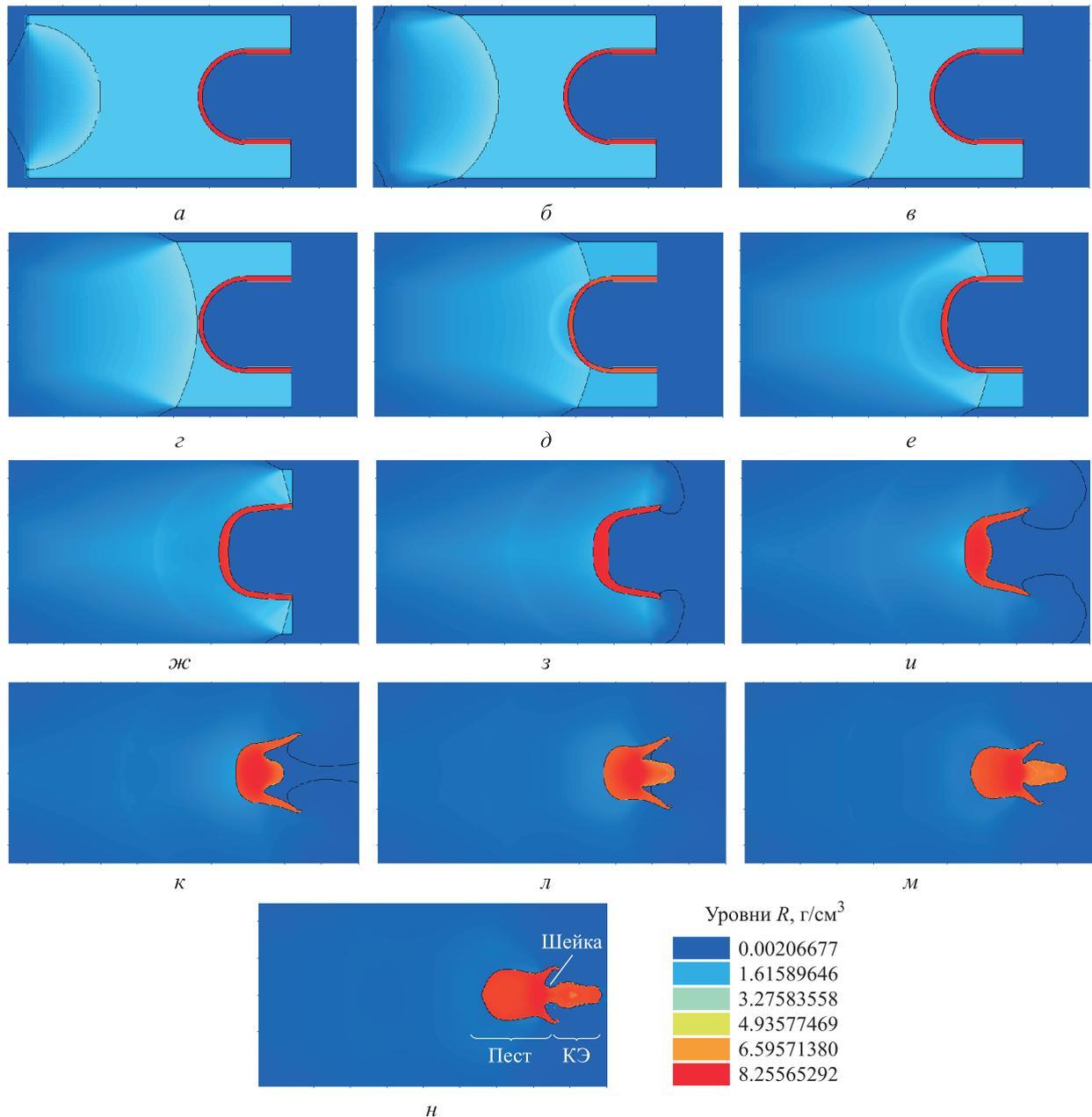


Рис. 1. Результаты численного расчета плотности R ВМУ типа ПЦ в моменты времени $t = 4$ (а), 6 (б), 8 (в), 10 (г), 12 (д), 14 (е), 16 (ж), 18 (з), 20 (и), 22 (к), 24 (л), 26 (м) и 28 мкс (н)

Экспериментальная отработка. Проведена экспериментальная отработка такой конструкции. Внешний вид ВМУ и рентгенограмма сформированного им КЭ приведены на рис. 3. Экспериментально подтверждено, что ВМУ формирует стальной КЭ, параметры которого с доверительной вероятностью 0,95 являются скоростью $5,9 \pm \pm 0,1$ км/с и масса 17 ± 1 г [10].

Масса КЭ определена по рентгеновским снимкам [11] с применением процесса автоматизированной обработки [12, 13].

Высокоскоростная видеорегистрация процесса подлета и взаимодействия КЭ с водной пре-

градой в прозрачном контейнере. Видеорегистрацию осуществляли с помощью высокоскоростных видеокамер: PCO.dimax HD (с частотой съемки 10236,46 кадров/с, временем экспозиции 1,5 мкс, разрешением 912×384 пкс, объективом с фокусным расстоянием 80...200 мм и диафрагмой 2.8) и PhotronFastcam SA5 RV № 1 и № 2 (с частотой съемки 30000 кадров/с; временем экспозиции 1,01 мкс, разрешением 640×376 пкс, объективом с фокусным расстоянием 80...200 мм и диафрагмой 4).

Видеокамеры PhotronFastcam SA5 RV работали в синхронном режиме, при этом камера № 1

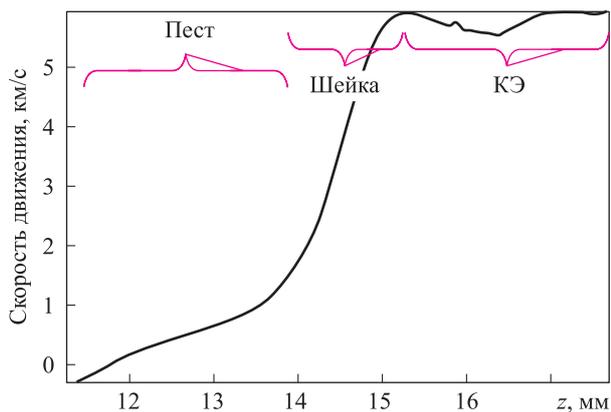


Рис. 2. Распределение скорости движения КЭ, песта и шейки по оси z в момент времени $t = 28$ мкс

выдавала синхроимпульс на камеру № 2 с задержкой 7...16 мкс. Видеорегистрацию подлета и движения КЭ проводили в светопрозрачном контейнере размером 300×600×500 мм, входные стенки которого выполнили из полиэтилена, а боковые — из оргстекла толщиной 9 мм. На задней стенке контейнера установили диффузно-рассеивающий экран с координатной

сеткой. Размер ячейки координатной сетки составлял 20×20 мм.

Пуск высокоскоростных видеокамер, импульсного источника света и подрывной установки осуществляли с помощью генератора импульсов. Через 10 мкс включали в работу подрывную установку. В качестве примера на рис. 4 приведены фрагменты видеорегистрации. С помощью видеокамеры PCO.dimax HD получены два кадра, а с помощью видеокамер PhotronFastcam SA5 RV № 1 и № 2 — семь кадров, на которых КЭ находится в зоне регистрации. На рис. 4, в отчетливо видно ударную волну, создаваемую метаэлементами в воде.

По результатам скоростной видеорегистрации проведен расчет скорости движения КЭ в соответствии с параметрами съемки. На участке подлета к контейнеру его скорость составила 5627 м/с, а на участке 0...101 мм — 1169 м/с (вследствие резкого торможения в водной среде). Средняя скорость движения ударной волны в воде на начальном участке (0...147 мм) равнялась 2100 м/с.



а

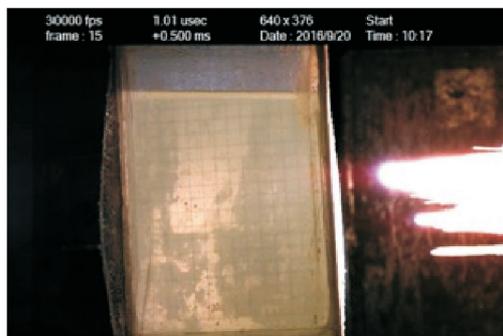


б

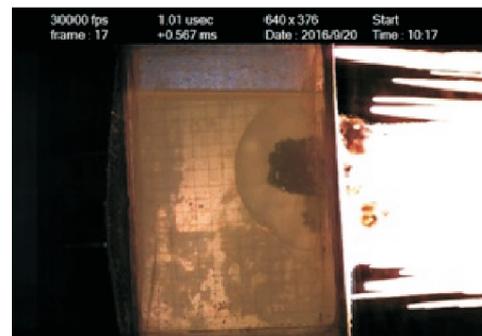
Рис. 3. Внешний вид ВМУ типа ПЦ (а) и рентгенограмма сформированного им КЭ (б)



а



б



в

Рис. 4. Результаты видеорегистрации, полученные с видеокамер PCO.dimax HD (а) и PhotronFastcam SA5 RV № 2 (б, в)

Вывод

На примере отработанного гиперзвукового ударника с известными параметрами показан перспективный метод определения скорости движения КЭ по регистрации ударной волны в

воде, создаваемой этим ударником. По точности измерения (~5...10 %) такой метод оказывается более перспективным, чем традиционный интегральный метод, оценивающий параметры ударника по размерам кратера в металлической мишени (~30...40 %).

Литература

- [1] Shumikhin T.A., Semenov A.S., Bezrukov L.N., Malkin A.I., Myagkov N.N., Kononenko M.M. On fragmentation of aluminum projectile on mesh bumpers. *Proceedings of the Fourth European Conference on Space Debris*, 18–20 April 2005, Darmstadt, Germany, 2005, pp. 471–476.
- [2] Myagkov N.N., Shumikhin T.A., Bezrukov L.N. Experimental and Numerical Study of Peculiarities at High-Velocity Interaction between a Projectile and Discrete Bumpers. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, vol. 37, pp. 980–994, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2010.04.001
- [3] Singh V.P., Voia M.S. Spherical shock waves in water. *Indian Journal of Physics*, 1972, vol. 46, pp. 547–555.
- [4] Герасимов С.И., Кикеев В.А., Тотышев К.В., Фомкин А.П., Яненко Б.А. Визуализация сверхзвукового движения сферы в воздухе и в воде. *Научная визуализация*, 2017, № 1, т. 9, с. 1–25.
- [5] Голденко Н.А., Грязнов Е.Ф., Судомоев А.Д., Фельдштейн В.А. Исследование влияния конструктивных параметров взрывного метательного устройства на скорость и характер метаемого элемента. *Космонавтика и ракетостроение*, 2016, т. 7(92), с. 42–47.
- [6] Янилкин Ю.В., Бондаренко Ю.А. Тесты для гидрокодов, моделирующих ударноволновые течения в многокомпонентных средах. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2018. 281 с.
- [7] Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений. Вычислительные методы в гидродинамике. Москва, Мир, 1967.
- [8] Копышев В.П. О простейшем уравнении состояния твердых тел. *ВАНТ. Сер. ТИПФ*, 2002, вып. 1–2, с. 12–23.
- [9] Жерноклетов Н.В., Зубарев В.Н., Телегин Г.С. Изэнтропы расширения продуктов взрыва конденсированных ВВ. *Прикладная механика и техническая физика*, 1969, № 4, с. 127–132.
- [10] Герасимов С.И., Князев А.С., Маляров Д.В., Яненко Б.А., Герасимова Р.В., Хорошайло Е.С. Коллективный разгон и регистрация компактных элементов, формируемых при взрывном обжатии комбинированных облицовок полусфера-цилиндр. *Прикладная механика и техническая физика*, 2018, т. 59, № 4(350), с. 3–9.
- [11] Герасимов С.И., Захаров Д.В., Зубанков А.В., Кикеев В.А., Герасимова Р.В., Полиенко Г.А., Хорошайло Е.С., Яненко Б.А. Рентгенорегистрация на испытательных стендах. *Научная визуализация*, 2018, т. 10, № 2, с. 122–137.
- [12] Толстикова Л.А., Ковтун А.Д. Определение плотности вещества по рентгеновскому изображению с использованием аппарата численного моделирования процесса рентгенографирования. *Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения. Сб. матер. конф.*, Саров, 12–16 октября 1998, Саров, ВНИИЭФ, 2000, с. 281–285.
- [13] Демидов А.А., Ковтун А.Д., Толстикова Л.А. Определение масс осколочных элементов по рентгеновским изображениям. *Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения. Сб. матер. конф.*, Саров, 12–16 октября 1998, Саров, ВНИИЭФ, 2000, с. 286–290.

References

- [1] Shumikhin T.A., Semenov A.S., Bezrukov L.N., Malkin A.I., Myagkov N.N., Kononenko M.M. On fragmentation of aluminum projectile on mesh bumpers. *Proceedings of the Fourth European Conference on Space Debris*, 18–20 April 2005, Darmstadt, Germany, 2005, pp. 471–476.
- [2] Myagkov N.N., Shumikhin T.A., Bezrukov L.N. Experimental and Numerical Study of Peculiarities at High-Velocity Interaction between a Projectile and Discrete Bumpers. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, vol. 37, pp. 980–994, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2010.04.001
- [3] Singh V.P., Boia M.S. Spherical shock waves in water. *Indian Journal of Physics*, 1972, vol. 46, pp. 547–555.
- [4] Gerasimov S.I., Kikeev V.A., Totyshev K.V., Fomkin A.P., Yanenko B.A. Visualization of supersonic motion of a sphere in air and in water. *Scientific Visualization*, 2017, no. 1, vol. 9, pp. 1–25.
- [5] Goldenko N.A., Gryaznov E.F., Sudomoyev A.D., Fel'dshteyn V.A. Research of the Influence of Design Parameters of Throwing Explosive Device on the Speed and Nature of the Projectile. *Cosmonautics and rocket engineering*, 2016, vol. 7(92), pp. 42–47 (in Russ.).
- [6] Yanilkin Yu.V., Bondarenko Yu.A. *Testy dlya gidrokodov, modeliruyushchikh udarnovolnovyye techeniya v mnogokomponentnykh sredakh* [Tests for hydrocodes simulating shock-wave currents in multicomponent media]. Sarov, RFYATS-VNIIEF publ., 2018. 281 p.
- [7] Uilkins M.L. *Raschet uprugoplasticheskikh techeniy. Vychislitel'nyye metody v gidrodinamike* [Calculation of elastic-plastic flows. Computational methods in hydrodynamics]. Moscow, Mir publ., 1967.
- [8] Kopyshv V.P. On the simplest equation of state of solids. *VANT. Ser. TiPF*, 2002, iss. 1–2, pp. 12–23 (in Russ.).
- [9] Zhernokletov N.V., Zubarev V.N., Telegin G.S. Isentropes Expansion of Explosive Explosive Explosives. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 1969, no. 4, pp. 127–132 (in Russ.).
- [10] Gerasimov S.I., Knyazev A.S., Malyarov D.V., Yanenko B.A., Gerasimova R.V., Khoroshaylo E.S. Collective Projection and Detection of Compact Elements Formed in an Explosive Closure of Combined Hemisphere-Cylinder Cladding. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2018, vol. 59, no. 4(350), pp. 3–9 (in Russ.), doi: 10.15372/PMTF20180401
- [11] Gerasimov S.I., Zakharov D.V., Zubankov A.V., Kikeev V.A., Gerasimova R.V., Polienko G.A., Khoroshaylo E.S., Yanenko B.A. X-ray method in test benches. *Scientific Visualization*, 2018, vol. 10, no. 2, pp. 122–137 (in Russ.).
- [12] Tolstikova L.A., Kovtun A.D. Determination of the substance density by X-ray image using the apparatus for numerical simulation of the process of radiography. *Sovremennyye metody proektirovaniya i otrabotki raketno-artilleriyskogo vooruzheniya. Sb. mater. konf.* [Modern methods of designing and developing missile and artillery weapons. Collection of conference materials]. Sarov, 2000, pp. 281–285.
- [13] Demidov A.A., Kovtun A.D., Tolstikova L.A. Determination of the mass of frag elements using X-ray images. *Sovremennyye metody proektirovaniya i otrabotki raketno-artilleriyskogo vooruzheniya. Sb. mater. konf.* [Modern methods of designing and developing missile and artillery weapons. Collection of conference materials]. Sarov, 2000, pp. 286–290.

Информация об авторах

ГЕРАСИМОВ Сергей Иванович — доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Спецприборостроение». Саровский физико-технический институт — филиал НИЯУ МИФИ; ведущий научный сотрудник. Институт проблем машиностроения РАН (607190, Саров, Нижегородская область, Российская Федерация ул. Духова, д. 6, e-mail: s.i.gerasimov@mail.ru).

ОДЗЕРИХО Ирина Александровна — аспирант кафедры «Экспериментальная механика». Саровский физико-технический институт — филиал НИЯУ МИФИ; научный сотрудник. Институт проблем машиностроения РАН (607190, Саров, Нижегородская область, Российская Федерация, ул. Духова, д. 6, e-mail: odzeriho.irina@mail.ru).

ГЕРАСИМОВА Римма Валериановна — инженер кафедры «Спецприборостроение». Саровский физико-технический институт — филиал НИЯУ МИФИ (607186, Саров, Нижегородская область, Российская Федерация, ул. Духова, д. 6, e-mail: r.v.gerasimova@mail.ru).

ЯНЕНКО Борис Александрович — преподаватель кафедры «Спецприборостроение». Саровский физико-технический институт — филиал НИЯУ МИФИ (607186, Саров, Нижегородская область, Российская Федерация, ул. Духова, д. 6, e-mail: Yanenkoba@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Герасимов С.И., Одзерихо И.А., Герасимова Р.В., Яненко Б.А. Определение скорости гиперзвуковых компактных элементов в наземной испытательной установке. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 8, с. 65–72, doi: 10.18698/0536-1044-2019-8-65-72

Please cite this article in English as:

Gerasimov S.I., Odzeriho I.A., Gerasimova R.V., Yanenko B.A. Determining the Velocity of Hypersonic Compact Elements in Ground Testing Plants. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 8, pp. 65–72, doi: 10.18698/0536-1044-2019-8-65-72

Information about the authors

GERASIMOV Sergei Ivanovich — Doctor of Science (Physics and Maths), Professor, Department of Special Instrumentation Engineering. Sarov Institute of Physics and Technology — Branch of National Research Nuclear University MEPhI; Lead Researcher. Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences (607190, Sarov, Nizhegorodsky region, Russian Federation, Dukhov St., Bldg. 6, e-mail: s.i.gerasimov@mail.ru).

ODZERIHO Irina Aleksandrovna — Post Graduate, Department of Experimental Mechanics. Sarov Institute of Physics and Technology — Branch of National Research Nuclear University MEPhI; Researcher. Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences (607190, Sarov, Nizhegorodsky region, Russian Federation, Dukhov St., Bldg. 6, e-mail: odzeriho.irina@mail.ru).

GERASIMOVA Rimma Valerianovna — Engineer. Department of Special Instrumentation Engineering. Sarov Institute of Physics and Technology — Branch of National Research Nuclear University MEPhI (607186, Sarov, Nizhegorodsky region, Russian Federation, Dukhov St., Bldg. 6, e-mail: r.v.gerasimova@mail.ru).

YANENKO Boris Aleksandrovich — Lecturer. Department of Special Instrumentation Engineering. Sarov Institute of Physics and Technology — Branch of National Research Nuclear University MEPhI (607186, Sarov, Nizhegorodsky region, Russian Federation, Dukhov St., Bldg. 6, e-mail: Yanenkoba@mail.ru).