

УДК 539.3

А.В. Герасимов, С.В. Пашков

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРУППОВОГО УДАРА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО КОСМИЧЕСКОМУ АППАРАТУ¹

Создание надежной системы защиты космических аппаратов от удлинённых осколков космического мусора диктует необходимость исследования характера взаимодействия высокоскоростных удлинённых ударников с защищаемыми объектами. В работе рассматривается взаимодействие группы ударников с плоской формой носовой части с системой разнесённых пластин.

Ключевые слова: численное моделирование, высокоскоростное соударение, космический аппарат, разрушение, слоистые преграды.

Присутствие в сформированном приземном слое (протяженностью от 300 до 2 000 км) огромного количества техногенных осколков различных размеров и формы, образовавшихся в процессе разрушения спутников, последних ступеней ракет-носителей, разгонных блоков и других аппаратов и устройств, представляет серьезную угрозу безопасности автоматических и пилотируемых космических объектов. Численное моделирование высокоскоростного взаимодействия твердых тел с защитными системами позволяет воспроизвести характерные особенности физических процессов, протекающих при столкновении, рассмотреть и выбрать оптимальные схемы экранов. В работе [1] численно моделировался процесс взаимодействия группы ударников с преградой и использовался эрозионный критерий для описания разрушения материала преграды. Применение к исследованию данной проблемы современных компьютеров и численных методов, позволяющих решать задачи высокоскоростного соударения в трехмерной постановке с учетом фрагментации ударников и защитных элементов конструкции космического аппарата (КА), представляется теоретически и практически важной задачей. Учет фрагментации и взаимодействия осколков между собой и с корпусом космического аппарата позволяет дать более полное представление о процессах, протекающих при высокоскоростном взаимодействии частиц космического мусора с оболочкой космического объекта.

Учет фрагментации материала твердых тел при интенсивных динамических нагружениях позволяет использовать лагранжев подход к задачам высокоскоростного удара для достаточно широкого диапазона скоростей взаимодействия. Этот подход особенно удобен при рассмотрении многоконтактных взаимодействий сталкивающихся тел, особенно при решении трехмерных задач удара. Начальная гетерогенность структуры реальных материалов, влияющая на характер распределения физико-механических характеристик материала по объему рассматриваемого тела, является важным фактором, определяющим характер разрушения. Одним из способов учета этого факта является введение в уравнения механики деформируемого твердого тела случайного распределения начальных отклонений прочностных свойств от номинального значения, то есть моделирование, таким образом,

¹ Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ №13-08-00296-а и №12-08-00641-а.

начальных структурных особенностей материала, а именно: наличие пор, включений, дислокаций и т.д.

Основные соотношения

В данной работе в лагранжевой 3D-постановке рассматривается процесс высокоскоростного взаимодействия разнесенных пластин с высокоскоростными удлиненными осколками.

Для описания процессов деформирования и дробления твердых тел используется модель прочного сжимаемого идеально упругопластического тела. Основные соотношения, описывающие движение этой среды, базируются на законах сохранения массы, импульса и энергии и замыкаются соотношениями Прандтля – Рейсса при условии текучести Мизеса [2–4]. Уравнение состояния берется в форме Тета и Ми – Грюнайзена [2]. Известно, что пластические деформации, давление и температура оказывают влияние на предел текучести и модуль сдвига, поэтому модель дополнялась соотношениями, апробированными в работе [5].

Для расчета упругопластических течений используется методика, реализованная на тетраэдрических ячейках и базирующаяся на совместном использовании метода Уилкинса [3, 4] для расчета внутренних точек тела и метода Джонсона [6, 7] для расчета контактных взаимодействий. Разбиение трехмерной области на тетраэдры происходит последовательно с помощью подпрограмм автоматического построения сетки.

В качестве критерия разрушения при интенсивных сдвиговых деформациях используется достижение эквивалентной пластической деформацией своего предельного значения [2, 8].

Начальные неоднородности структуры моделировались распределением предельной эквивалентной пластической деформации по ячейкам расчетной области с помощью модифицированного генератора случайных чисел, выдающего случайную величину, подчиняющуюся выбранному закону распределения. Плотности вероятности случайных величин брались в виде нормального гауссовского распределения со средним арифметическим равным табличному значению и варьируемой дисперсией.

Используемые в современных работах по динамическому разрушению конструкций и материалов соотношения механики деформируемого твердого тела не учитывают вероятностного фактора в задаче дробления твердых тел, что может существенно исказить реальную картину ударного и взрывного разрушения рассматриваемых объектов. Последнее особенно проявляется при решении осесимметричных задач, где все точки по окружной координате рассчитываемого элемента исходно равноправны в силу используемых при численном моделировании стандартных уравнений механики сплошных сред. На практике, однако, имеется широкий ряд задач, где фрагментация является преимущественно вероятностным процессом, например, взрывное разрушение осесимметричных оболочек, где характер дробления заранее неизвестен, пробитие и разрушение тонких преград ударником по нормали к поверхности, так называемое «лепесткование», и т.д. Внесение случайного распределения начальных отклонений прочностных свойств от номинального значения в физико-механические характеристики тела приводит к тому, что в этих случаях процесс разрушения приобретает вероятностный характер, что более соответствует экспериментальным данным, используемым в данной работе. Наиболее полно идеология и методология вероятностного подхода к проблеме разрушения твердых тел приведена в [11].

Граничные и начальные условия

Система основных уравнений дополняется необходимыми начальными и граничными условиями. В начальный момент времени все точки ударников имеют осевую скорость V_0 с учетом ее знака, а состояние преград предполагается невозмущенным. Граничные условия ставятся следующим образом: на границах, свободных от напряжений, выполняются условия: $\sigma_n = \tau_n = 0$. На участке контакта между телами ставится условие идеального скольжения одного материала относительно другого вдоль касательной и условие непротекания по нормали: $\sigma_{n1} = \sigma_{n2}$, $v_{n1} = v_{n2}$, $\tau_{n1} = \tau_{n2} = 0$, где σ_n, τ_n – нормальная и касательная компоненты вектора напряжений; v_n – нормальная компонента вектора скорости в точке контакта; индексы 1 и 2 относятся к контактирующим телам.

Метод решения

Для расчета упругопластических течений используется методика, реализованная на тетраэдрических ячейках и базирующаяся на совместном использовании метода Уилкинса для расчета внутренних точек тела и метода Джонсона для расчета контактных взаимодействий [2, 5, 6]. Разбиение трехмерной области на тетраэдры происходит последовательно с помощью подпрограмм автоматического построения сетки. Наиболее полно идеология и методология применения вероятностного подхода к проблеме разрушения твердых тел приведена в монографии [11].

Тестовые расчеты

Рассматривалась задача о расширении медной оболочки с надетым на нее стальным кольцом под действием продуктов детонации [11].

Расчетная сетка, используемая в данном расчете, составляла около 500 тысяч тетраэдрических ячеек. Для описания разрушения использовался метод раздвоения по узлам – при выполнении в окрестности узла критерия разрушения происходит расщепление узлов и образование поверхности разрушения. Для моделирования начальных неоднородностей использовалось распределение предельного значения эквивалентной пластической деформации по ячейкам расчетной области по нормальному закону с дисперсией 10-процентного отклонения.

По мере расширения кольца наблюдалась локализация деформаций в вершинах радиальных трещин, образовавшихся на начальных неоднородностях и формирование достаточно крупных осколков. Расчетный осколочный спектр вполне удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными [12].

В трехмерной постановке рассматривалась задача о пробитии двухслойной преграды (стеклотекстолит СТ-НТ + сплав Д16) шариком из стали ШХ-15 [13]. Были проведены расчеты соударения шарика и преграды по нормали к поверхности последней. Скорость ударника равнялась 700 и 900 м/сек. Сравнение численных результатов с экспериментальными данными показало вполне удовлетворительное совпадение.

В трехмерной постановке рассматривалась задача о пробитии дву- и трехслойной преграды (сталь – керамика, сталь – керамика – сталь) цилиндрическим ударником из вольфрамового сплава [13]. Сравнение численных результатов (ч) с экспериментальными (э) данными [10] показало хорошее совпадение остаточных длин ($l_ч$ и $l_э$) и скоростей ($V_ч$ и $V_э$) ударника для случаев двухслойной и трехслой-

ной преград. Двухслойная преграда: $l_3 = 37$ мм, $V_3 = 1120$ м/с; $l_4 = 35$ мм, $V_4 = 1200$ м/с. Трехслойная преграда: $l_3 = 11,5$ мм, $V_3 = 890$ м/с; $l_4 = 10,0$ мм, $V_4 = 855$ м/с.

Результаты расчетов

Ранее в работах [9, 10] рассматривалось взаимодействие сферических элементов с тонкими преградами при различных углах соударения.

В настоящей работе рассматривается взаимодействие группы из семи стержней из вольфрамового сплава с системой стальных пластин. Радиус стержня – 1,5 см, длина – 15 см. Толщина первой пластины – 7 см, второй – 3 см, расстояние между ними – 6 см, диаметр – 35 см. Скорость соударения – 1000 м/с. стержни располагаются по окружности с переменным радиусом R . Один ударник размещался в центре, остальные шесть равномерно по окружности. Расстояние между центром первого ударника и центрами остальных R в ходе расчетов варьировалось. Результаты расчетов, приведенные на рис. 1–5, позволили определить наилучшую конфигурацию системы ударников для пробития первой преграды и разрушения второй. На рис. 1 показано расположение ударников с плоской головной частью на лицевой стороне системы преград в начальный момент времени.

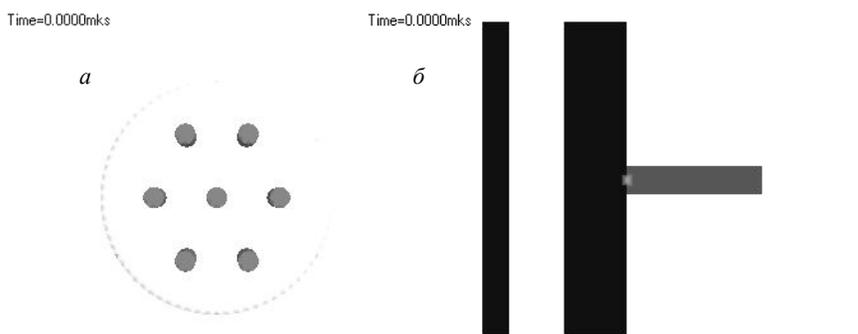


Рис. 1. Начальная конфигурация системы «преграды – ударники»: *а* – трехмерная картина; *б* – 2D-сечение трехмерной расчетной области

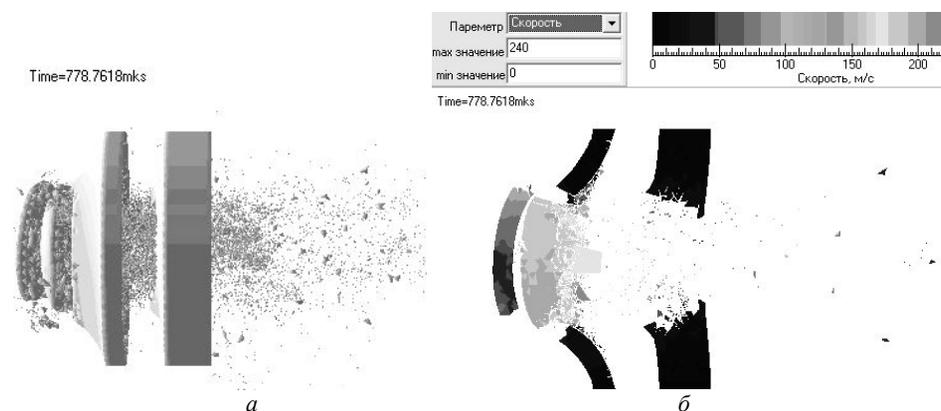


Рис. 2. Взаимодействие ударников с преградой при $R = 5$ см: *а* – трехмерная картина; *б* – 2D-сечение трехмерной расчетной области

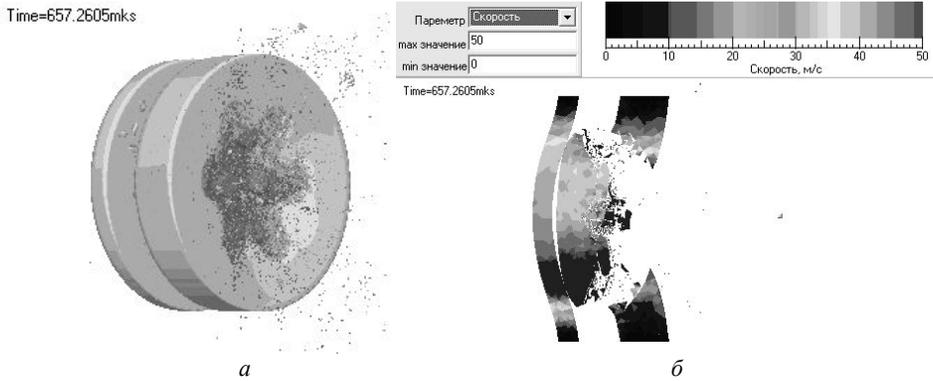


Рис. 3. Взаимодействие ударников с преградой при $R = 8$ см:
a – трехмерная картина; *б* – 2D-сечение трехмерной расчетной области

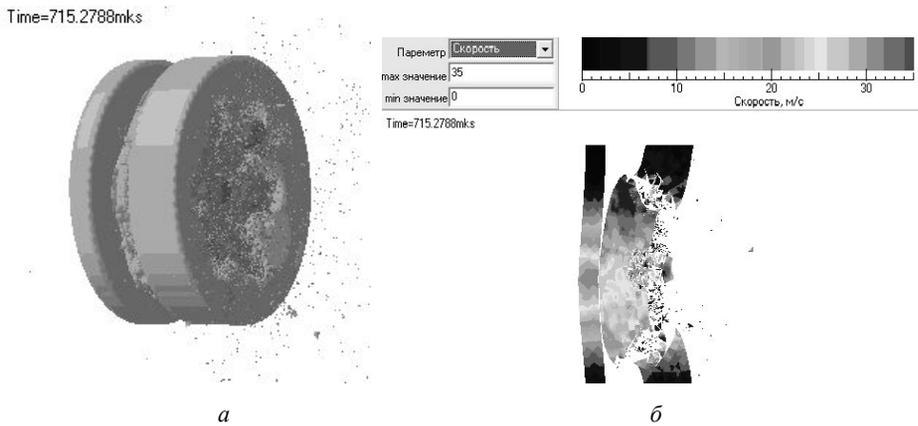


Рис. 4. Взаимодействие ударников с преградой при $R = 9$ см:
a – трехмерная картина; *б* – 2D-сечение трехмерной расчетной области

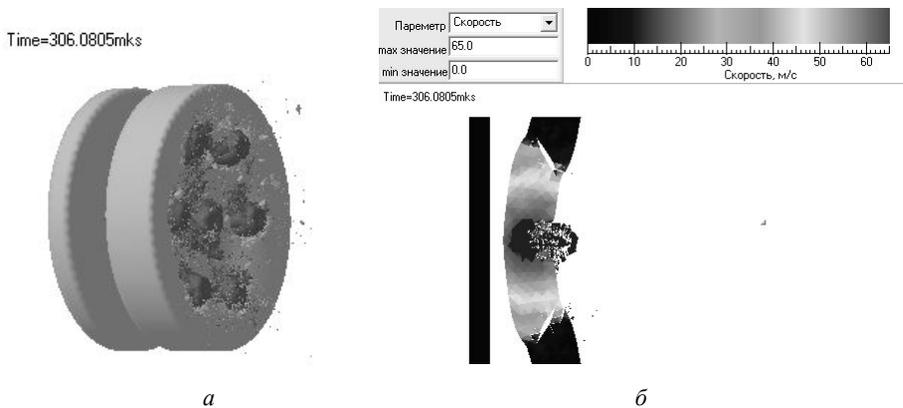


Рис. 5. Взаимодействие ударников с преградой при $R = 10$ см:
a – трехмерная картина; *б* – 2D-сечение трехмерной расчетной области

На рис.6 приведены результаты расчета соударения одиночного ударника с массой, равной массе семи ударников, рассмотренных выше. Видно, что размер выбиваемой пробки (более светлая область рис. 6, б) заметно меньше выбиваемых областей для семи ударников (рис. 2–5).

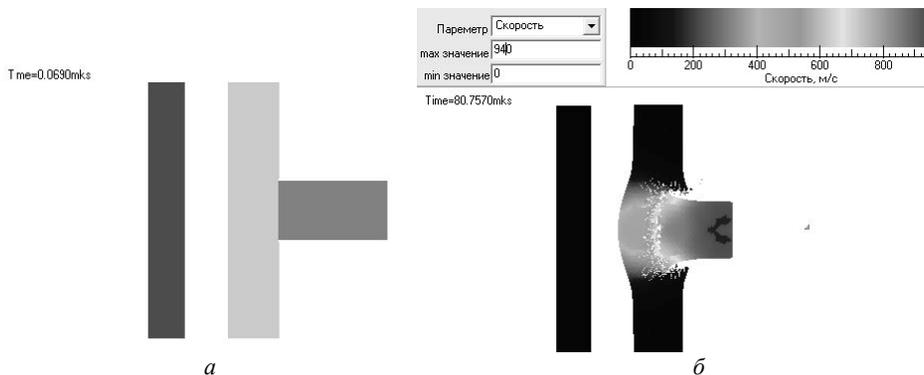


Рис. 6. Взаимодействие одиночного ударника с преградами: *а* – начальная конфигурация системы «преграда – ударник»; *б* – 2D-сечение трехмерной расчетной области

В работе приведено сравнение эффективности воздействия группы ударников и дана оценка их влияния на степень поражения преград. Увеличение радиуса R от 5 до 9 см приводит к увеличению выбиваемого объема материала первой преграды, но к заметному падению его скорости. Если при $R = 5$ см происходит пробитие и второй преграды и формирование значительного потока осколков с тыльной и лицевой сторон преграды, то для $R = 8$ и 9 см этого не наблюдается. При $R = 10$ см происходит только частичное проникание ударников в первую преграду и не наблюдается в полной мере эффекта коллективного воздействия группы элементов на данную преграду. Первая преграда выпучивается в направлении второй, но не пробита и полностью не разрушена, однако в ней наблюдается формирование трещины в окружном направлении. Как видно из расчетов, существует определенная конфигурация группы ударников, наиболее опасная с точки зрения пробития преграды и массы выбитого материала.

Заключение

Результаты расчетов, приведенные на рис. 1–6, показали большую опасность воздействия группы стержней по защищаемому корпусу космического аппарата по сравнению с воздействием одиночного ударника с массой, равной массе семи ударников, и такой же скоростью. Разработанная численная методика позволяет моделировать процессы взаимодействия оболочек космических аппаратов с высокоскоростными длинными стержнями в широком диапазоне скоростей и углов соударения, а также исследовать процессы фрагментации стержней и преград и характер формирующихся осколочных полей

ЛИТЕРАТУРА

1. Зелепугин С.А., Коняев А.А., Сидоров В.Н. и др. Экспериментально-теоретическое исследование соударения группы частиц с элементами защиты космических аппаратов // Космические исследования. 2008. Т. 46. № 6. С. 559–570.

2. *Физика взрыва* / под ред. К.П. Станюковича. М.: Наука, 1975. 704 с.
3. *Уилкинс М.Л.* Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967. С. 212–263.
4. *Wilkins M.L.* Computer simulation of dynamic phenomena. Berlin – Heidelberg – New-York: Springer, 1999. 246 p.
5. *Steinberg D.J., Cochran S.G., Guinan M.W.* A constitutive model for metals applicable at high – strain rate // *J. Appl. Phys.* 1980. V. 51. No. 3. P. 1496–1504.
6. *Johnson G.R., Colby D.D., Vavrick D.J.* Tree-dimensional computer code for dynamic response of solids to intense impulsive loads // *Int. J. Numer. Methods Engng.* 1979. V. 14. No. 12. P. 1865–1871.
7. *Johnson G.R.* Dynamic analysis of explosive-metal interaction in three dimensions // *Trans. ASME. J. of Appl. Mech.* 1981. V. 48. No. 1. P. 30–34.
8. *Крейнхаген К.Н., Вагнер М.Х., Пьечоцки Дж. Дж., Бьорк Р.Л.* Нахождение баллистического предела при соударении с многослойными мишенями // *Ракетная техника и космонавтика.* 1970. Т. 8. № 12. С. 42–47.
9. *Герасимов А.В., Барашков В.Н., Пашков С.В.* Удар группы компактных элементов по тонкой преграде // *Изв. вузов. Физика.* 2009. Т. 52. № 7/2. С. 59–63.
10. *Герасимов А.В., Пашков С.В.* Трехмерное моделирование разрушения преград группой ударников // Сб. докл. VI Научн. конф. Волжского регион. Центра РАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения». Саров, 2–4 июня 2009 г. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2010. Т. 1. С. 392–399.
11. *Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел* / под ред. А.В. Герасимова. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. 572 с.
12. *Quoc Bao Diep, John F. Moxnes, Gunnar Nevstad.* Fragmentation of projectiles and steel rings using 3D numerical simulations // 21th International Symposium of Ballistics 19–23 April 2004, Adelaide, Australia.
13. *Герасимов А.В., Пашков С.В.* Численное моделирование пробития слоистых преград // *Механика композиционных материалов и конструкций.* 2013. Т. 19. № 1. С. 49–61.

Статья поступила 23.03.2014 г.

Gerasimov A. V., Pashkov S. V. NUMERICAL SIMULATION OF THE GROUP HYPERVELOCITY ELEMENTS IMPACT ON A SPACECRAFT. The presence of a large number of man-made fragments of various sizes and shapes in the near-Earth space due to destruction of satellites and launch vehicles is a serious threat to the safe functioning of automatic and manned space vehicles. At present, protection of spacecrafts from man-made fragments is a highly relevant task for the successful development of modern astronautics. To solve it, it is necessary to research the process of interaction between hypervelocity projectiles and protected objects. Numerical simulation of the hypervelocity interaction between solids and protective systems allows one to reproduce the characteristic features of physical processes occurring in the collision, to consider and select the optimum scheme of protective shields. Involving present-day computers and numerical methods made it possible to solve problems of hypervelocity collision in a three-dimensional formulation with allowance for fragmentation of projectiles and shock protection elements of the spacecraft. Taking into account fragmentation and interaction of fragments between each other and the space vehicle body allows us to give a more complete picture of processes occurring upon the hypervelocity interaction between elements of space debris and the shell of a space object. In this paper, we consider the interaction of a group of elongated projectiles with the flat shape nose with a system of spaced plates.

Keywords: numerical simulation, hypervelocity impact, spacecraft, destruction, layered barriers

GERASIMOV Alexander Vladimirovich (Doctor of Physics and Mathematics, Prof., Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)
E-mail: ger@niipmm.tsu.ru

PASHKOV Sergey Vladimirovich (Candidate of technical Sciences,
Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)
E-mail: ps@contek.ru

REFERENCES

1. Zelepugin S.A., Konyaev A.A., Sidorov V.N., Khorev I.E., Yakushev V.K. Eksperimental'no-teoreticheskoe issledovanie soudareniya gruppy chastits s elementami zashchity kosmicheskikh apparatov (2008) *Kosmicheskie issledovaniya*. V. 46. No 6, pp. 559–570. (in Russian)
2. *Fizika vzryva*. Pod red. K.P. Stanyukovicha. Moscow, Nauka Publ., 1975. 704 p. (in Russian)
3. Uilkins M.L. Raschet uprugoplasticheskikh techeniy. Vychislitel'nye metody v gidrodinamike. Moscow, Mir Publ., 1967, pp. 212–263 (in Russian)
4. Wilkins M.L. Computer simulation of dynamic phenomena. Berlin, Heidelberg, New York, Springer, 1999. 246 p.
5. Steinberg D.J., Cochran S.G., Guinan M.W. A constitutive model for metals applicable at high – strain Rate (1980) *J. Appl. Phys.* V.51. No. 3, pp. 1496–1504.
6. Johnson G.R., Colby D.D., Vavrick D.J. Tree-dimensional computer code for dynamic response of solids to intense impulsive loads (1979) *Int. J. Numer. Methods Engng.* V. 14. No. 12, pp. 1865–1871.
7. Johnson G.R. Dynamic analysis of explosive-metal interaction in three dimensions (1981) *Trans. ASME. J. of Appl. Mech.* V. 48. No. 1, pp. 30–34.
8. Kreynkhagen K.N., Vagner M.Kh., P'echotski Dzh. Dzh., B'ork R.L. Nakhozhdenie ballisticheskogo predela pri soudarenii s mnogoslownymi mishenyami (1970) *Raketnaya tekhnika i kosmonavtika*. V. 8. No. 12, pp. 42–47. (in Russian)
9. Gerasimov A.V., Barashkov V.N., Pashkov S.V. Udar gruppy kompaktnykh elementov po tonkoy pregrade (2009) *Izv. vuzov. Fizika*. V. 52. No. 7/2, pp. 59–63. (in Russian)
10. Gerasimov A.V., Pashkov S.V. Trekhmernoe modelirovanie razrusheniya pregrad gruppy udarnikov. Sb. dokl. VI Nauchn. konf. Volzhskogo region. Tsentra RARAN “Sovremennye metody proektirovaniya i otrabotki raketno-artilleriyskogo vooruzheniya”. Sarov, 2–4 iyunya 2009. Sarov, RFYaTs-VNIIEF, 2010. V. 1, pp. 392–399. (in Russian)
11. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya vysokoskorostnogo vzaimodeystviya tel. Pod red. A.V. Gerasimova. Tomsk, Izdatel'stvo Tomskogo universiteta, 2007. 572 p. (in Russian)
12. Quoc Bao Diep, John F. Moxnes, Gunnar Nevstad. Fragmentation of projectiles and steel rings using 3D numerical simulations. 21th International Symposium of Ballistics 19–23 April 2004, Adelaide, Australia
13. Gerasimov A.V., Pashkov S.V. Chislennoe modelirovanie probitiya sloistyykh pregrad (2013) *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksiy*. V. 19. No 1, pp. 49–61. (in Russian)