

Численное моделирование соударения высокоскоростных элементов с корпусом и заполнителем аэрокосмической конструкции

А.В. ГЕРАСИМОВ,
д-р физ.-мат. наук,
С.В. ПАШКОВ,
канд. техн. наук
(ТГУ, Томск)
ger@mail.tomsknet.ru

Исследуется характер разрушения оболочек с заполнителем при соударении с высокоскоростными ударниками. Выявлены особенности фрагментации ударников и преград, формирования осколочных полей и воздействия ударной волны на заполнитель.

Численное моделирование, высокоскоростное соударение, тонкостенные конструкции с заполнителем, сферические и цилиндрические ударники, фрагментация, вероятность

Исследование воздействия локальных импульсов давления, включая ударное нагружение, на оболочки с заполнителем необходимо для совершенствования защиты объектов современной техники, оценки возможных последствий аварийных ситуаций и т.д. В работе [1] рассматривалось соударение оболочки с заполнителем и преграды под углом. Экспериментальные и теоретические исследования детонации взрывчатого вещества (ВВ), экранированного металлической оболочкой, при ударе под углом шарами из стали приведены в работе [2]. Проведено численное моделирование пробития слоистой преграды под углом к поверхности [3]. Исследовались подходы к численному моделированию разрушения твердых тел при интенсивном динамическом нагружении [4].

В данной работе в трехмерной постановке рассмотрен ряд задач пробития и разрушения оболочек с твердым заполнителем ударниками при взаимодействии как по нормали, так и под углом к поверхности оболочки. Задачи решаются в лагранжевой постановке для широкого диапазона скоростей (до 7000 м/с) с учетом дробления материала взаимодействующих тел.

Одним из факторов, определяющих характер разрушения реальных материалов, является естественная неоднородность их структуры, влияющая на характер распределения физико-механических характеристик материала (ФМХ) по объему рассматриваемого тела. Для того чтобы моделируемый процесс дробления отражал реальную картину поведения разрушаемых тел, полученную в экспериментах, необходим учет естественной неоднородности в уравнениях механики деформируемого твердого тела, что возможно при использовании вероятностных законов распределения ФМХ по объему рассматриваемого элемента конструкции. Для этого необходимо внести случайное распределение начальных отклонений прочностных свойств от номинального значения в ФМХ тела (моделирование начальных дефектных структур материала).

Общие соотношения

Уравнения, описывающие пространственное адиабатное движение прочной сжимаемой среды, являются дифференциальными следствиями фундаментальных законов сохранения массы, импульса и энергии. В общем случае это уравнения неразрывности, движения, энергии, имеющие вид [5–7]. К этим уравнениям необходимо добавить уравнения, учитывающие соответствующие термодинамические эффекты, связанные с адиабатным сжатием среды и прочностью. В общем случае при воздействии сил на твердое деформируемое тело происходит изменение как объема, так и формы тела, причем по различным зависимостям, поэтому тензор напряжений представляется в виде суммы шарового тензора и деватора тензора напряжений.

Для описания сопротивления тела сдвигу использовались соотношения Прандля – Рейса и условие пластичности Мизеса, уравнение состояния твердого тела выбиралось в форме Ми – Грюнайзена [5–7].

В качестве критерия сдвигового разрушения был выбран критерий предельной эквивалентной пластической деформации [8]. В этом случае при выполнении критерия сдвигового разрушения расчетная ячейка считается разрушенной. Система основных уравнений дополнялась необходимыми начальными и граничными условиями. В начальный момент времени все точки ударника имеют осевую скорость V_0 с учетом ее знака, а состояние преграды предполагается невозмущенным. Гранич-

ные 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.

Моделирование было выполнено с помощью разработанного в НИИПММ программного комплекса, ориентированного на задачи высокоскоростного ударно-взрывного разрушения. Для моделирования процессов в трехмерной постановке комплекс использует лагранжев метод Уилкинса [6, 7], реализованный на тетраэдрической сетке. Метод Джонсона [9, 10] применяется для расчета контактных взаимодействий и свободных границ, что значительно упрощает отслеживание свободных границ, массово образующихся при фрагментации. Для описания разрушения используется метод раздвоения по узлам, предусмотрено внесение начальных неоднородностей в ФМХ материала для описания вероятностного разрушения. Разбиение трехмерной области на тетраэдры происходит последовательно с помощью подпрограмм автоматического построения сетки. В комплексе имеются возможности для визуализации процесса. Время счета зависит от числа расчетных ячеек. Естественная фрагментация ударника и преграды рассчитывается с помощью введения вероятностного механизма распределения начальных дефектов структуры материала для описания отрывных и сдвиговых трещин. В качестве критерия разрушения при интенсивных сдвиговых деформациях в задачах используется свойство эквивалентной пластической деформацией достигать своего предельного значения [5, 8]. Начальные неоднородности 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.

Тестовые расчеты

Задача о пробитии двухслойной и трехслойной преграды (сталь – керамика, сталь – керамика – сталь) цилиндрическим ударником из вольфрамового сплава в трехмерной постановке рассматривалась в работе [11]. Сравнение численных результатов с экспериментальными данными [12] показало хорошее совпадение остаточных длин (l_4 и l_3) и скоростей (V_4 и V_3) ударника: $l_3 = 0,037$ м, $V_3 = 1120$ м/с; $l_4 = 0,035$ м, $V_4 = 1200$ м/с (двухслойная преграда); $l_3 = 0,0115$ м, $V_3 = 890$ м/с, $l_4 = 10,0$ мм, $V_4 = 855$ м/с (трехслойная преграда).

Для уменьшения времени расчета рассматривалась только верхняя часть оболочки, составляющая половину всей конструкции. Этот прием можно использовать в том случае, когда время двойного пробега волны до границы больше времени процесса соударения. Данное условие выполняется для оболочек, у которых радиус значительно превышает глубину проникания ударника. На правом и левом торцах использовалась разработанная авторами методика, позволяющая избежать отражения волн и рассчитывать нагружение протяженных объектов только на ограниченной их части. В работе [13] описан вариант неотражающих граничных условий, позволяющий при моделировании конечного участка бесконечного пространства пропускать упругопластические волны за границы расчетной области без ложных отражений. На примере взаимодействия ударника с полупространством в трехмерной постановке показано, что описываемый подход позволяет уменьшить размеры расчетной области при сохранении точности.

Результаты численного моделирования

Рассматривалось соударение оболочки с заполнителем с шариком из сплава вольфрам – никель – железо (ВНЖ). Удар происходил по нормали и под углом 45° к образующей оболочки. Скорость ударника – 2000 м/с. Размеры взаимодействующих объектов: длина стальной оболочки – 0,08 м; внешний радиус – 0,075 м; внутренний радиус – 0,07 м; радиус шарика – 0,00635 м. Материал оболочки – сталь, имеющая следующие ФМХ: плотность $\rho_0 = 7,7$ г/см³, модуль сдвига $G = 8,6 \cdot 10^{10}$ Па, предел текучести $\sigma_T = 9,4 \cdot 10^8$ Па; ударник – ВНЖ, $\rho_0 = 17,1$ г/см³; заполнитель имеет следующие характеристики: $\rho_0 = 1,75$ г/см³, $G = 3,47 \cdot 10^9$ Па, предел текучести $\sigma_T = 10^8$ Па.

На рис. 1–6, *a–в* представлены результаты расчетов для трех моментов времени 1 мкс (рис. 1, *a – б, а*), 8 мкс (1, *б – б, б*), 15 мкс (1, *в – б, в*). В случае соударения шарика с оболочкой по нормали к поверхности оболочки приведены пространственные конфигурации системы шарик – оболочка – наполнитель (см. рис. 1, *a–в*), фазовый состав (ВНЖ, сталь, наполнитель) (см. рис. 2, *a–в*) и 2D-сечения, показывающие распределение скоростей в рассчитываемой системе (см. рис. 3, *a–в*). В случае соударения шарика с оболочкой под углом 45° к поверхности оболочки пространственные конфигурации системы шарик – оболочка – наполнитель для тех же моментов времени показаны на рис. 4, *a–в*, фазовый состав (ВНЖ, сталь, наполнитель) приведен на рис. 5, *a–в*. Рис. 6, *a–в* демонстрирует 2D-сечения, показывающие распределение скоростей в рассчитываемой системе шарик – оболочка – наполнитель.

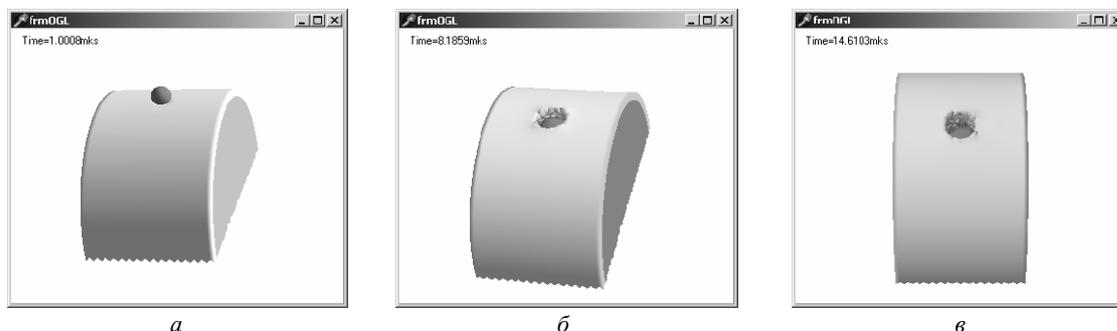


Рис. 1

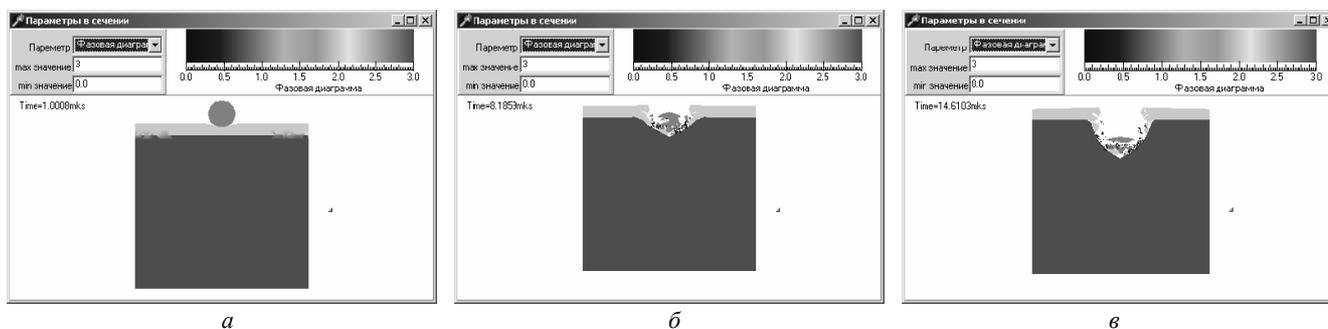


Рис. 2

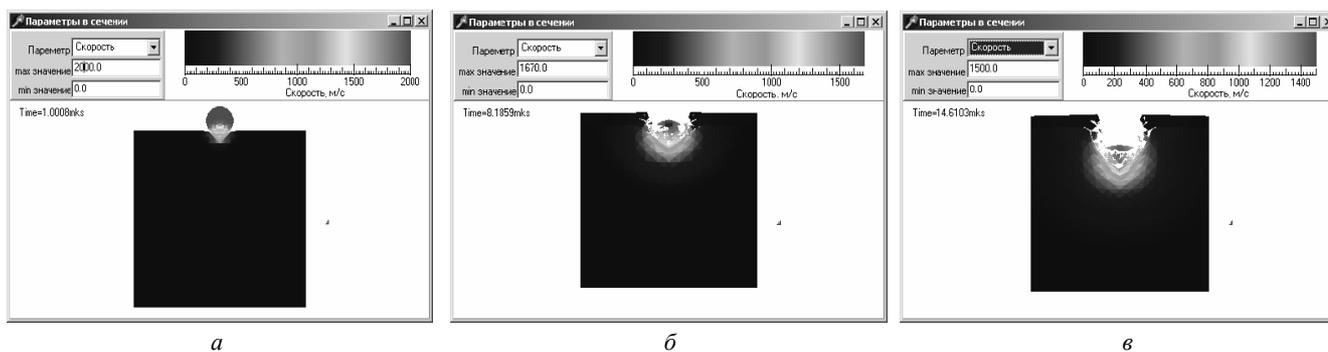


Рис. 3

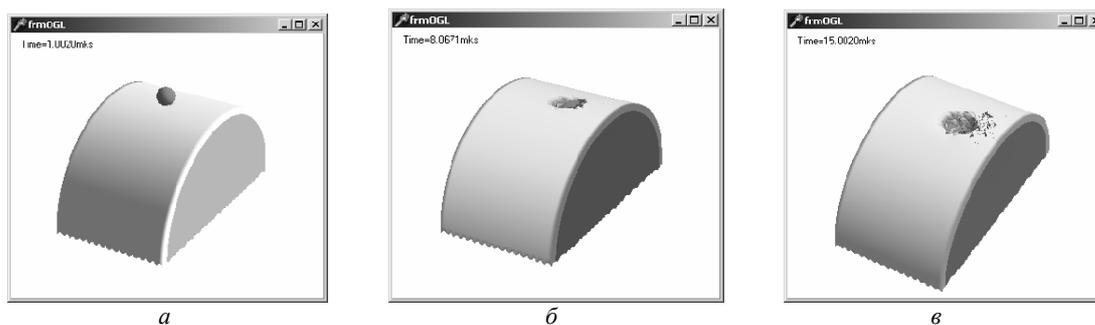


Рис. 4

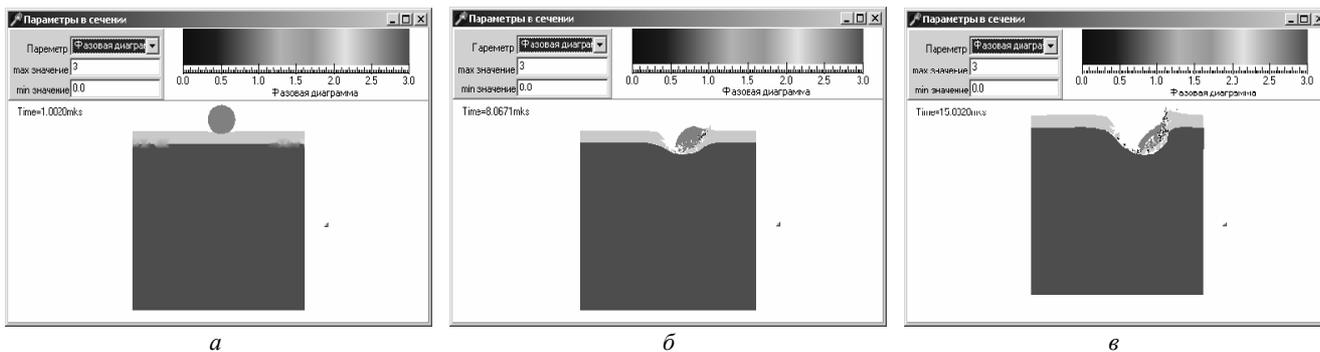


Рис. 5

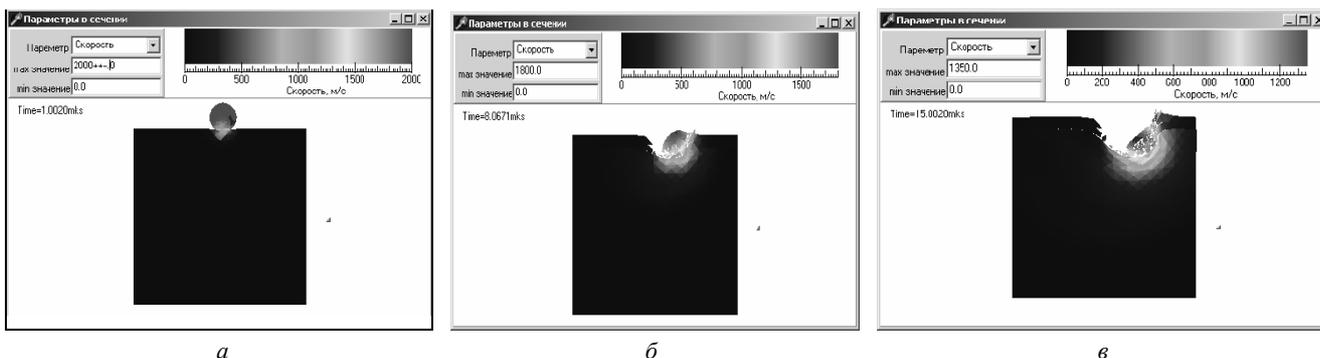


Рис. 6

Процесс взаимодействия происходит с интенсивным дроблением шарика и оболочкой и дальнейшим прониканием осколков в наполнитель.

Изменение давления со временем в центральной точке области контакта шарика с поверхностью оболочки приведено на рис. 7 (кривая 1), изменение давления в точке на внутренней стороне оболочки, лежащей под центральной точкой контакта, иллюстрируется кривой 2. Аналогично кривая 3 – изменение давления во внешней точке наполнителя. Наблюдается скачок давления различной амплитуды и дальнейшее его падение со временем. В случае реагирующего наполнителя достаточно большое значение амплитуды давления может привести к его несанкционированному подрыву.

Движение шарика в жидком наполнителе (вода) при пробитии тонкой оболочки, наличие которой не приводит к дроблению шарика, представлено на рис. 8. Внешний радиус алюминиевой оболочки – 0,035 м, внутренний – 0,033 м, длина оболочки – 0,05 м. Стальной шарик радиусом 0,003 м метался со скоростью 2560 м/с.

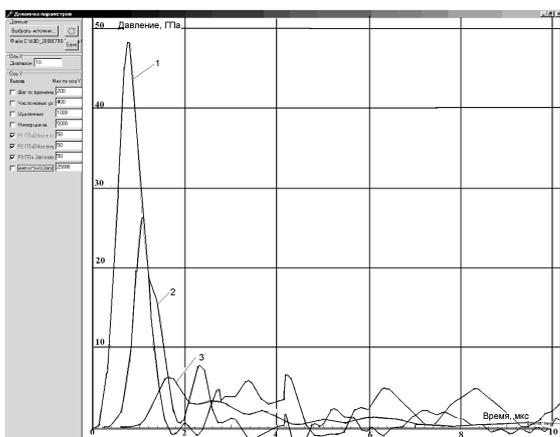


Рис. 7

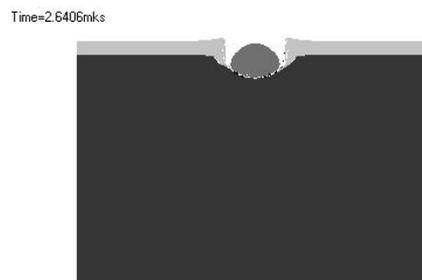


Рис. 8

Формирование ударной волны в жидкости и развитие во времени тангенциальных напряжений в шарике иллюстрирует рис. 9.

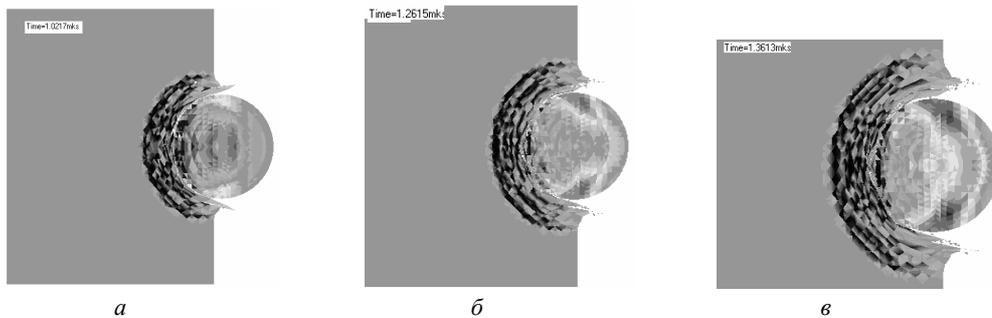


Рис. 9

Как видим (см. рис. 9), по мере внедрения шарика в воду и распространения по нему ударной волны на внешней поверхности шарика наблюдается рост растягивающих тангенциальных напряжений, которые превышают предельные для данной хрупкой стали предельные значения и способны привести к разделению шарика на две части. Так как картина напряжений симметрична относительно оси, вдоль которой движется шарик, то для рассмотрения процесса разрушения использовался вероятностный подход [4] для выделения меридиональной трещины. На рис. 10 в нижней части шарика наблюдается формирование меридиональной трещины.

С целью проверки полученных численных результатов было проведено сравнение расчетных данных с результатами экспериментов, полученными ранее [14] на вертикальном стенде с использованием пороховой пушки калибром 8 мм. Была проведена серия экспериментов со скоростями 800–2100 м/с, методика которых подробно приведена в работе [14]. В состав стенда входит метательная баллистическая установка с электромагнитным датчиком дульной скорости, резервуар с исследуемой средой, в которую помещена металлическая преграда. На преграде крепится контактный датчик, регистрирующий момент удара метаемого тела о преграду. Для получения более высоких скоростей использовалась легкогазовая баллистическая установка (ЛГУ) МПХ 23/8 и горизонтальная схема проведения эксперимента с метанием в вакуумируемую трассу. ЛГУ МПХ 23/8 калибром 0,008 м позволяет получить скорость до 4500 м/с. Было выявлено, что при скорости порядка 2600 м/с шарик начинает разрушаться в воде. Характер разрушения шарика после удара по воде представлен на рис. 11.

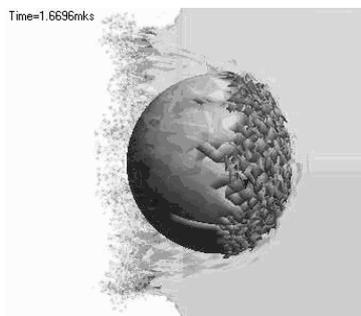


Рис. 10

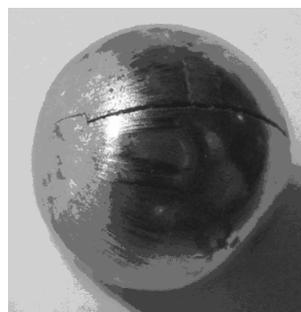


Рис. 11

Результаты проведенного исследования показывают возможности предложенного вероятностного подхода и лагранжевой численной методики в наиболее полной с физической точки зрения трехмерной постановке воспроизводить процессы пробития неоднородных конструкций высокоскоростными элементами и осколками естественного и заданного дробления; оценивать влияние скорости соударения, материала ударника, оболочки и заполнителя, а также угла подхода ударника к оболочке на напряженно-деформированное состояние и разрушение системы оболочка – заполнитель.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 2014/223 (код проекта 1567) и программы повышения конкурентоспособности ТГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов А.В., Михайлов В.Н. Соударение оболочки с заполнителем и преграды под углом // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Материалы 5-й Всерос. науч. конф., г. Томск, 3–5 окт. 2006. Томск: Изд-во ТГУ, 2006. С. 232–233.

2. Герасимов А.В. и др. Экспериментальные и теоретические исследования детонации ВВ, экранированного металлической оболочкой, при ударе под углом шарами из стали // Изв. вузов. Физика. 2010. Т. 53. № 12/2. С. 69–76.
3. Gerasimov A.V., Pashkov S.V. Numerical simulation of the perforation of layered barriers // Composites: Mechanics, Computations, Applications. 2013. Vol. 4. Iss. 2. P. 97–111.
4. Gerasimov A.V. Numerical modeling of solids fracture under intensive dynamic loading: Zbornik Radova Konferencije MIT – 2013. Beograd, 2014. P. 201–207.
5. Физика взрыва / Под ред. К.П. Станюковича. М.: Наука, 1975. 704 с.
6. Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967. С. 212–263.
7. Wilkins M.L. Computer simulation of dynamic phenomena. Berlin – Heidelberg – N.Y.: Springer, 1999. 266 p.
8. Крейнхаген К.Н. и др. Нахождение баллистического предела при соударении с многослойными мишенями // Ракетная техника и космонавтика. 1970. Т. 8. № 12. С. 42–47.
9. Johnson G.R., Colby D.D., Vavrick D.J. Tree-dimensional computer code for dynamic response of solids to intense impulsive loads // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 1979. Vol. 14. № 12. P. 1865–1871.
10. Johnson G.R. Dynamic analysis of explosive-metal interaction in three dimensions // Journal of Applied Mechanics. 1981. Vol. 48. Iss. 1. P. 30–34.
11. Герасимов А.В., Пашков С.В. Численное моделирование пробития слоистых преград // Механика композиционных материалов и конструкций. 2013. Т. 19. № 1. С. 49–62.
12. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел / Под ред. А.В. Герасимова. Томск: Изд-во ТГУ, 2007. 572 с.
13. Герасимов А.В., Пашков С.В. Прозрачные границы. Уменьшение погрешности, вносимой границей расчетной области при численном моделировании конечного участка бесконечного пространства // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Материалы 6-й Всерос. науч. конф., г. Томск, 30 сент. – 2 окт. 2008. Томск: Изд-во ТГУ, 2008. С. 209–210.
14. Герасимов А.В. и др. Экспериментально-теоретическое исследование разрушения металлического шарика при ударном взаимодействии с водой // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 7/2. С. 57–60.

Поступила в редакцию 9.09.14

Numerical Simulation of High-Velocity Element Collisions with Shell and Filler of Aerospace Structures

A.V. GERASIMOV AND S.V. PASHKOV

The fracture pattern of shells with a filler at collision with high-speed projectiles is analyzed. The special features of the projectile and barrier fragmentation and formation of debris fields, and the impact of the shock wave on the filler are revealed.

Numerical simulation, high-velocity collision, thin-walled structures with a filler, spherical and cylindrical projectiles, fragmentation, probability