

## Моделирование баллистической стойкости двойной стенки космических аппаратов при высокоскоростном соударении

© Б.Т. Добрица<sup>1</sup>, Д.Б. Добрица<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

<sup>2</sup>ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», г. Химки, Московская область, 141400, Россия

*Для оценки стойкости элементов конструкции космических аппаратов, находящихся под воздействием метеорно-техногенных частиц, предложена инженерная методика моделирования для расчета баллистической предельной зависимости двойной стенки при высокоскоростном соударении. Приведены результаты расчетов по рассматриваемой методике для двух вариантов моделей, эквивалентных типовым элементам конструкции космических аппаратов. В качестве моделей выбраны фрагменты топливного бака с защитой и профиль радиатора с встроенной тепловой трубой. Проведен анализ применения предложенной методики при увеличении толщины стенки бампера для конструкции топливного бака, давший положительный результат. Отмечена обоснованность применения различных подходов для оценки и снижения риска повреждения космического аппарата от воздействий метеорно-техногенных частиц: экспериментов по высокоскоростным соударениям, численных методов и инженерных методик.*

**Ключевые слова:** баллистическое уравнение, высокоскоростное соударение, космический аппарат, экранная защита, экспериментальные исследования, численное моделирование.

**Введение.** Защита от угрозы воздействия высокоскоростных фрагментов космического мусора и метеорных частиц на элементы космического аппарата (КА) основана на процедуре оценки и снижения риска от таких воздействий. Если уязвимые компоненты КА идентифицированы, для них находят баллистические предельные уравнения (БПУ) — аналитические уравнения, определяющие порог непробоя высокоскоростными частицами для систем или компонентов КА. Для формулировки и проверки БПУ в рамках данной процедуры проведены тестирование высокоскоростных соударений на баллистических установках, численное моделирование, использованы полуэмпирические подходы и другие аналитические методы.

Основы механики деформируемого твердого тела систематизировано изложены в работе [1]. Алгоритм численного расчета двумерных упруго-пластических течений на основе метода конечных объемов рассмотрен в [2], основы численного моделирования задач из разных областей механики деформируемого твердого тела, жидкости и газа, в том числе трехмерных, — в работе [3]. Важность использования математического моделирования физических процессов и яв-

лений, а также применения методов численного моделирования для различных прикладных задач проиллюстрировано в [4]. Опубликованы расчетно-теоретические работы, посвященные численному моделированию динамических процессов деформирования композитных материалов [5, 6], в которых приведены примеры численной реализации разработанных математических моделей: они могут служить основой для выбора рациональных конструкций защитных преград. В работах [7, 8] представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований по высокоскоростным взаимодействиям, проведенных для отработки противометеорной защиты.

Основы инженерных подходов для расчета баллистической стойкости различных типов экранов для защиты элементов КА от воздействий метеорных частиц и фрагментов космического мусора изложены в [9, 10]. Конкретные примеры расчета стойкости конструкций КА на основе инженерных подходов с применением моделей пространственного распределения частиц космического мусора и метеорных тел рассмотрены в работе [11]. С целью адаптации полуэмпирических подходов к типовым конфигурациям КА разработана инженерная методика моделирования баллистической стойкости конструкций при высокоскоростном соударении. На примерах типовых элементов КА проведено моделирование баллистической стойкости конструкций на основе предложенной методики, построены баллистические зависимости для выбранных модельных конструкций, соответствующих баку КА с защитой, а также находящимся под обшивкой в сотовой панели аксиальным тепловым трубам.

**Разработка инженерной методики моделирования баллистической стойкости конструкций при высокоскоростном соударении.** Стойкость элементов конструкции КА к воздействию высокоскоростных твердых тел оценивается по БПУ, которые связывают критический диаметр ударника  $d_c$  со скоростью воздействия  $v_0$ , его углом, плотностью материала ударника и другими параметрами в виде множества точек  $(d_c, v_0)$ , характеризующих границу пробоя или отсутствия пробоя преграды для наиболее распространенных материалов и конфигураций.

Для построения баллистических уравнений используются обобщенные зависимости критического размера частиц  $d_c$  от параметров конструкции стенки, значения и направления скорости столкновения  $v_0$ , а также удельного веса частиц [12]:

$$d_c = f(t_b, S, t_w, v_0, \cos \theta, \rho_p, \rho_w). \quad (1)$$

Здесь  $d_c$  — критический диаметр ударника, см, который вызывает поражение конструкции на скорости воздействия;  $t_b$  — толщина внешнего слоя защиты, см;  $S$  — расстояние между бампером и задней

стенкой, см;  $t_w$  — толщина преграды, см;  $v_0$  — скорость соударения, км/с;  $\theta$  — угол между вектором скорости частицы и нормалью к поверхности;  $\rho_p$  — удельный вес частицы, г/см<sup>3</sup>;  $\rho_w$  — удельный вес материала стенки, г/см<sup>3</sup>. Поражение конструкции определяется как перфорация задней стенки или потеря материала (отделение осколка) от задней поверхности тыльной стенки конструкции.

Оценка стойкости элементов КА без учета экранной защиты (как одиночной стенки) к пробоя при воздействии на них высокоскоростных метеорно-техногенных частиц проводится по БПУ для одиночной стенки [13]:

$$d_c = \left( 0,106022 t_w H B^{1/4} \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_p}} \left( \frac{c_w}{v_0 \cos \theta} \right)^{2/3} \right)^{18/19}. \quad (2)$$

Переход к критической массе частицы сферической формы, при которой происходит пробой одиночной стенки, осуществляется по соотношению

$$m_c = \rho_p \pi d_c^3 / 6,$$

где  $m_c$  — критическая масса пробивающей частицы, г;  $HB$  — твердость по Бринеллю;  $c_w$  — скорость звука в материале преграды, км/с.

Влияние экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ) на проникающую способность высокоскоростных частиц при одиночной стенке можно оценить по формуле для увеличения эффективной толщины преграды при наличии ЭВТИ для скорости менее 7 км/с [14]:

$$t_{w\text{eff}} = t_w + K_{MLI} \frac{AD_{MLI}}{\rho_w}, \quad (3)$$

где  $t_w$  — толщина монолитной преграды, см;  $K_{MLI} = 4,5$  — коэффициент, учитывающий влияние ЭВТИ;  $AD_{MLI}$  — поверхностная плотность (масса, приходящаяся на единицу площади) ЭВТИ, г/см<sup>2</sup>;  $\rho_w$  — плотность материала преграды, г/см<sup>3</sup>.

Для расчетов параметров пробоя высокоскоростными частицами (ударниками) разнесенной конструкции (экран + стенка) применяется уравнение Кристиансена и Керра [10]. Скорости соударения в этом уравнении разбиты на три диапазона в связи с различным характером баллистических кривых, которым соответствуют определенные функциональные зависимости.

Высокоэнтальпийный интервал скоростей  $v_0 \geq \frac{v_H}{\cos \theta}$ :

$$d_c = k_h \rho_p^{-1/3} (v_0 \cos \theta)^{-2/3} \rho_b^{-1/9} S^{1/2} (t_w \rho_w)^{2/3} \sigma_h^{1/3} + \Delta_{MLI}, \quad (4)$$

где  $v_H = 7$  км/с;  $k_h = 1,35$  при большой толщине бампера,

$$k_h = 7,451 \frac{t_b}{t_n^{2/3} S^{1/3}} + 0,411.$$

Условие малости толщины бампера:

$$\frac{t_b}{t_w^{2/3} S^{1/3}} < 0,126. \quad (5)$$

Здесь  $\sigma'_h = 2,072 \cdot 10^{-3} \sigma_w$  — приведенное значение предела текучести (в оригинале задано в единицах ksi);  $\sigma_w$  — предел текучести материала

задней стенки (преграды), МПа;  $\Delta_{MLI} = k_{MLI} m_{MLI} \left( \frac{S_{MLI}}{S} \right)^{1/2}$ ;  $k_{MLI} = 1,4$ ;  $m_{MLI}$  — поверхностная плотность ЭВТИ, г/см<sup>2</sup>.

Баллистический диапазон скоростей  $v_0 \leq \frac{v_L}{(\cos \theta)^{1,5}}$ :

$$d_c = k_l \left( t_w \sigma_L^{0,5} + C_L t_b \rho_b \right) \rho_p^{-0,5} v_0^{-2/3} (\cos \theta)^{-11/6}, \quad (6)$$

где  $k_l = 1,9$ ;  $\sigma'_L = 3,626 \cdot 10^{-3} \sigma_w$ ;  $v_L = 3$  км/с, если ЭВТИ отсутствует;  $v_L = 2$  км/с, если ЭВТИ имеется;  $C_L = 0,37$  см<sup>3</sup>/г.

Диапазон дробления  $\frac{V_L}{(\cos \theta)^{1,5}} < V < \frac{V_H}{\cos \theta}$  (область линейной регрессии):

$$d_c = \left( k_{hi} \rho_p^{-1/3} \rho_b^{-1/9} S^{1/2} (t_w \rho_w)^{2/3} \sigma_h^{1/3} + \Delta_{MLI} \right) \left( \frac{v_0 - V_L (\cos \theta)^{-1,5}}{V_H (\cos \theta)^{-1} - V_L (\cos \theta)^{-1,5}} \right) + k_{li} \left( t_w \sigma_L^{0,5} + C_L t_b \rho_b \right) \rho_p^{-0,5} (\cos \theta)^{-5/6} \left( \frac{V_H (\cos \theta)^{-1} - v_0}{V_H (\cos \theta)^{-1} - V_L (\cos \theta)^{-1,5}} \right), \quad (7)$$

где  $k_{hi} = v_H^{-2/3} k_h$ ;  $k_{li} = v_L^{-2/3} k_l$ .

Отметим, что применение этих и других известных соотношений для двустенных конструкций к расчету пробоя двойных стенок, находящихся на сравнительно близком расстоянии (например, для тепловых труб под обшивкой), некорректно. Эти формулы разработаны для оптимальных параметров экранной защиты, в которых расстояние между стенками  $S > 15d_c$  [9], а соотношение толщины переднего бампера и критического диаметра пробивающей частицы  $t_b/d_c = 0,15 \dots 0,20$ .

Несложно убедиться, что в соответствии с уравнением (4) наращивание толщины бампера двустенной конструкции эффективно только до определенного предела, определяемого соотношением

$$t_{b\max} = 0,126t_w^{2/3}S^{1/3}, \quad (8)$$

следующим из условия (5).

**Примеры моделирования баллистической стойкости конструкций на основе предложенной методики.** Рассмотрим конфигурацию двойной стенки. Такие конструкции регулярно встречаются при исследованиях стойкости КА к метеорно-техногенным воздействиям. Зададим следующие параметры двойной стенки (конфигурация 1):  $t_b = 2$  мм;  $t_w = 2$  мм;  $S = 4$  см; материал бампера и задней стенки — сплав АМг6.

На рис. 1 приведена баллистическая предельная зависимость (БПЗ) для данной конфигурации, построенная по уравнению Кристиансена и Керра, нанесены экспериментальные точки, полученные в работе [7].

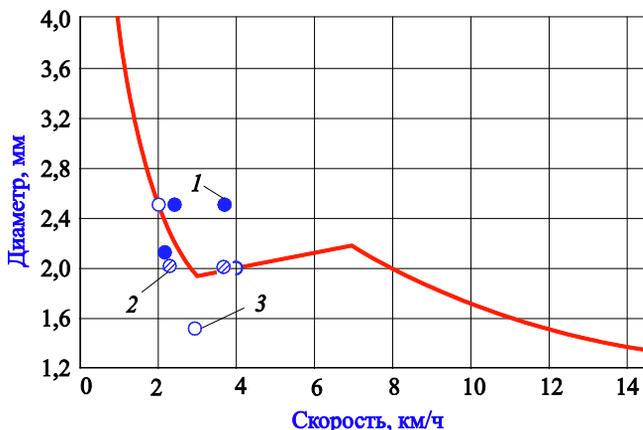


Рис. 1. БПЗ конфигурации 1 с нанесением экспериментальных точек: 1 — пробой; 2 — на грани пробоя; 3 — непробой

Согласно соотношению (8), максимальная эффективная толщина бампера для конфигурации 1  $t_{b\max} = 0,684$  мм, следовательно, дальнейшее увеличение его толщины не приводит к улучшению характеристик БПЗ для высокоэнтальпийного интервала скоростей.

Предел роста толщины бампера для конфигурации 1 показан на рис. 2. Для расчета использован ударник из сплава Д16 (дюралюминий). Согласно графику на рис. 2, начиная с толщины бампера  $t_b = 0,7$  мм кривые баллистической зависимости сливаются на высокоскоростном отрезке.

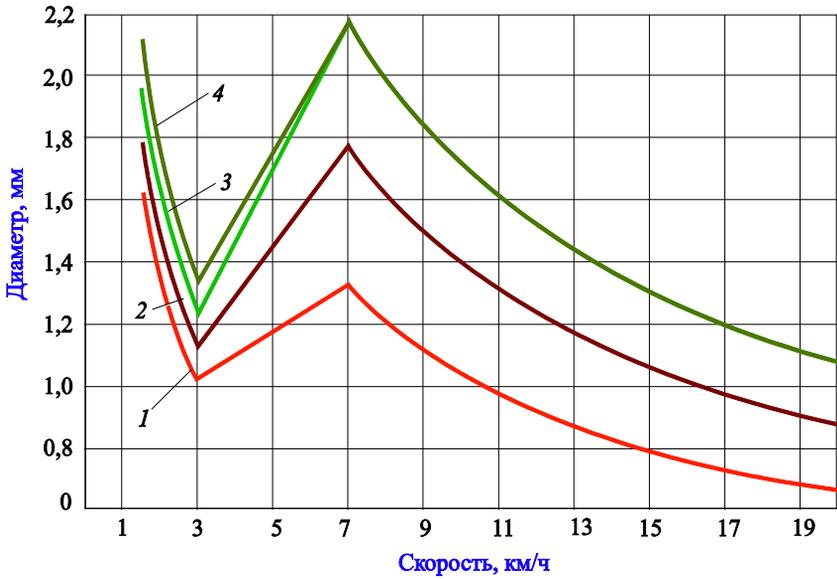


Рис. 2. БПЗ конфигурации 1 при изменении толщины стенки бампера: 1–5 —  $t_b = 0,5; 0,6; 0,7; 0,8$  и  $0,9$  мм соответственно

Конфигурация 2, характерная для расчетов стойкости элементов КА к воздействию метеорно-техногенных частиц, имеет следующие параметры:  $t_b = 1,5$  мм,  $t_w = 1$  мм,  $S = 4$  мм, материал бампера и задней стенки — алюминиевый сплав АД31.

Для расчета БПЗ в конфигурации 2 определим по соотношению (8) предельную толщину бампера. В данном случае рассматриваем упрощенную конструкцию, которая сводится к двум стенкам с расстоянием между ними  $t_{b \max} = 0,2$  мм, что значительно меньше имеющейся толщины  $1,5$  мм. Очевидно, что при увеличении толщины бампера расчет по формуле (2) для суммарной толщины бампер + задняя стенка даст значение стойкости конструкции выше, чем расчет по формуле (4) для двойной стенки на высокоэнтальпийном интервале скоростей. При произвольном увеличении толщины бампера  $t_b \gg t_w$  БПЗ структуры будет стремиться к БПЗ одностенной конструкции, толщина которой равна  $t_b + t_w$ . Очевидно также, что эффект бампера должен проявляться плавно при увеличении расстояния между стенками, начиная от нулевого. Если эффект бампера проявляется в расщеплении ударника на вторичное облако осколков, которые разлетаются в конический сноп [15], то площадь воздействия вторичного облака на заднюю стенку (т. е. эффект рассеяния вторичных осколков) будет увеличиваться пропорционально квадрату расстояния между стенками.

Для расчета БПЗ двухстенных конструкций с относительно близким расстоянием между стенками уравнение Кристиансена и Керра модифицировано с учетом этих соображений. Суть усовершенство-

вания состоит в следующем. Рассчитываем идеальное (с точки зрения соотношения стойкости конструкции и массы бампера) межстеночное расстояние по формуле (5):

$$S_{id} = \left( \frac{t_b}{0,126t_w^{2/3}} \right)^3. \quad (9)$$

Затем для высокоэнтальпийного интервала скоростей  $v_0 \geq \frac{v_H}{\cos \theta}$  вво-

дим коэффициент пропорциональности  $K_{prop} = \frac{S^2}{S_{id}^2}$  (считаем, что соотношение (4) корректно применять только при  $S = S_{id}$ ).

Расчет БПЗ для  $v_0 \geq \frac{v_H}{\cos \theta}$  проводим на основе выбора при  $v_0 = \frac{v_H}{\cos \theta}$  одного из трех вариантов, дающего наибольшее значение диаметра пробивающей частицы:

1) модифицированное соотношение

$$d_c = K_{prop} \left( k_h \rho_p^{-1/3} (v_0 \cos \theta)^{-2/3} \rho_b^{-1/9} S^{1/2} (t_w \rho_w)^{2/3} \sigma_h^{1/3} + \Delta_{MLI} \right) + \\ + (1 - K_{prop}) \left( 0,106022 t_w \text{HB}^{1/4} \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_p}} \left( \frac{c_w}{v_0 \cos \theta} \right)^{2/3} \right)^{18/19};$$

2) формула (2) для  $t_b + t_w$  (расчет как по одностенной конструкции);

3) формулы (4)–(5).

Расчет БПЗ для диапазона дробления  $\frac{V_L}{(\cos \theta)^{1,5}} < V < \frac{V_H}{\cos \theta}$ :

• если используется 1-й вариант, то применение модифицированного соотношения дает формулу

$$d_c = \left( K_{prop} \left( k_{hi} \rho_p^{-1/3} \rho_b^{-1/9} S^{1/2} (t_w \rho_w)^{2/3} \sigma_h^{1/3} + \Delta_{MLI} \right) + \right. \\ \left. + (1 - K_{prop}) \left( (v_H)^{-2/3} 0,106022 t_w \text{HB}^{1/4} \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_p}} (c_w)^{2/3} \right)^{18/19} \right) \times \\ \times \left( \frac{v_0 - V_L (\cos \theta)^{-1,5}}{V_H (\cos \theta)^{-1} - V_L (\cos \theta)^{-1,5}} \right) + k_{li} \left( t_w \sigma_L^{0,5} + C_L t_b \rho_b \right) \times \\ \times \rho_p^{-0,5} (\cos \theta)^{-5/6} \left( \frac{V_H (\cos \theta)^{-1} - v_0}{V_H (\cos \theta)^{-1} - V_L (\cos \theta)^{-1,5}} \right);$$

- для 2-го варианта формула будет иметь вид

$$d_c = \left( (v_H)^{-2/3} 0,106022 t_w \text{HB}^{1/4} \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_p}} (c_w)^{2/3} \right)^{18/19} \left( \frac{v_0 - V_L (\cos \theta)^{-1,5}}{V_H (\cos \theta)^{-1} - V_L (\cos \theta)^{-1,5}} \right) +$$

$$+ k_{ii} \left( t_w \sigma_L^{0,5} + C_L t_b \rho_b \right) \rho_p^{-0,5} (\cos \theta)^{-5/6} \left( \frac{V_H (\cos \theta)^{-1} - v_0}{V_H (\cos \theta)^{-1} - V_L (\cos \theta)^{-1,5}} \right);$$

- для 3-го варианта применяли формулу Кристиансена и Керра для двойной стенки.

На рис. 3 показаны БПЗ для конфигурации 2, построенные по стандартному методу Кристиансена и Керра и по разработанному методу. На рисунке кривая БПЗ, построенная по разработанному методу, дает значения  $d_c$  в высокоэнтальпийном интервале скоростей, значительно превышающие рассчитанные по стандартному методу. Для подтверждения правильности модели необходимо проведение экспериментальных исследований на конструкции, аналогичной конфигурации 2, в высокоэнтальпийном интервале скоростей.

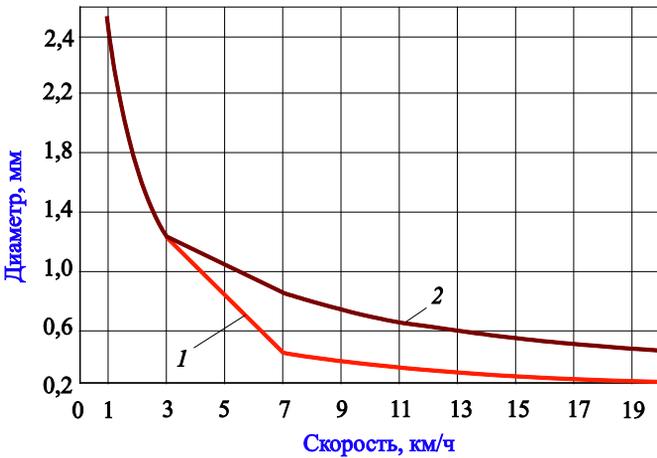


Рис. 3. БПЗ для конфигурации 2, построенные по стандартному (1) и модифицированному (2) методам

Применение модифицированной формулы Кристиансена и Керра к конфигурации 1 дает результаты при определенном увеличении толщины стенки бампера (рис. 4). Без модификации все кривые совпадали бы с самой нижней кривой на участке  $v_0 \geq 7$  км/с.

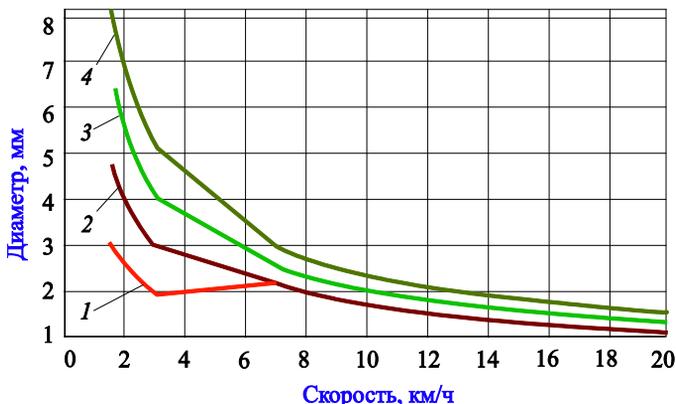


Рис. 4. БПЗ конфигурации 1 при увеличении толщины стенки бампера по разработанному методу:  
 1–4 —  $t_b = 2; 4; 6$  и  $8$  мм соответственно

**Заключение.** Применение эмпирических соотношений при расчете стойкости конструкций и вероятности пробоя в космической технике является необходимостью, поскольку расчет метеорно-техногенных воздействий в течение срока активного существования КА основан на данных пространственных моделей метеорно-техногенной обстановки, которые содержат значительное число комбинаций параметров высокоскоростных частиц (плотность, диаметр, скорость, направление и угол подлета, временной фактор). Поэтому применение численных методов, а также экспериментального подхода обосновано только для получения или уточнения данных о стойкости отдельных конструкций, учитываемых в таком расчете. Эмпирические БПУ вследствие ограничений не всегда удовлетворяют применяемым в космической технике конструкциям, что обуславливает необходимость их модификации или использования в расчете готовых БПЗ таких конструкций, полученных с применением численного моделирования и подтвержденных экспериментально.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Димитриенко Ю.И. *Механика сплошной среды. В 4 т. Т. 4. Основы механики твердых сред.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 624 с.
- [2] Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений. В кн.: *Вычислительные методы в гидродинамике.* Москва, Мир, 1967, с. 212–263.
- [3] Wilkins M.L. *Computer simulation of dynamic phenomena.* Berlin-Heidelberg-New-York, Springer-Verlag, 1999, 264 p.
- [4] Александров А.А., Димитриенко Ю.И. Математическое и компьютерное моделирование — основа современных инженерных наук. *Математическое моделирование и численные методы*, 2014, № 1 (1), с. 3–4.
- [5] Димитриенко Ю.И., Димитриенко И.Д. Моделирование динамических процессов деформирования гибких тканевых композиционных материалов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 5 (29). URL: <http://engjournal.ru/search/author/40/page1.html>

- [6] Димитриенко Ю.И., Дзагания А.Ю., Беленовская Ю.В., Воронцова М.А. Численное моделирование проникания ударников в анизотропные упруго-пластические преграды. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2008, № 4, с. 100–117.
- [7] Герасимов А.В., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф. Защита космических аппаратов от техногенных и естественных осколков. Эксперимент и численное моделирование. *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*, 2011, № 4 (16), с. 70–78.
- [8] Добрица Б.Т., Добрица Д.Б. Работоспособность защитных экранов с двойной сеткой при воздействии высокоскоростных частиц. *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*, 2015, № 4 (36), с. 64–70.
- [9] Christiansen E.L. Design and performance equations for advanced meteoroid and debris shields. *Int. J. Impact Engineering*, 1993, vol. 14, pp. 145–156.
- [10] Christiansen E.L., Kerr J.H. Ballistic Limit Equations for Spacecraft Shielding. *Int. J. Impact Engineering*, 2001, vol. 26, pp. 93–104.
- [11] Добрица Д.Б. К вопросу расчета стойкости элементов конструкции космического аппарата при воздействии частиц космического мусора. *Вестник ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина»*, 2012, № 5 (16), с. 53–58.
- [12] Николаевский В.Н., ред. *Высокоскоростные ударные явления*. Москва, Мир, 1973, 528 с.
- [13] Панасюк М.И., Новиков Л.С., ред. *Модель космоса. В 2 т. Т. 2. Воздействии космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов*. Москва, КДУ, 2007, 989 с.
- [14] Ryan S., Christiansen E. Micrometeoroid and Orbital Debris Shield Ballistic Limit Analysis Program. *NASA/TM -2009 214789*.
- [15] Солодов А.В., ред. *Инженерный справочник по космической технике*. Москва, Воениздат, 1977, 430 с.

Статья поступила в редакцию 01.10.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Добрица Б.Т., Добрица Д.Б. Моделирование баллистической стойкости двойной стенки космических аппаратов при высокоскоростном соударении. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 11.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-11-1554>

**Добрица Борис Тимофеевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Вычислительная математика и математическая физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 научных публикаций в области математики. e-mail: fs11@bmstu.ru

**Добрица Дмитрий Борисович** — канд. техн. наук, ведущий математик ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». Автор более 30 научных публикаций в области проблематики защиты космических аппаратов от метеорно-техногенных воздействий. e-mail: dobrica@laspace.ru

## Ballistic spacecraft double wall simulation at high speed collision

© B.T. Dobritsa<sup>1</sup>, D.B. Dobritsa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

<sup>2</sup>Federal State Unitary Enterprise NPO named after S.A. Lavochkin, Moscow, Region, Khimki town, 141400, Russia

*The article considers an engineering simulation method to calculate the ballistic limit depending on the double wall at the high-speed collision, which can be used in assessing space vehicles structural elements stability under the man-made meteor particles influence, looks at the method calculations results for two model variants equivalent to spacecraft design standard elements. We selected as models the fuel tank fragments with protection and a radiator cross-section with the built-in thermal tube, analyzed the proposed method application at increasing the bumper wall thickness for the fuel tank design that gave a positive result. The article shows various approaches validity while assessing spacecraft risks from the space debris or meteoroid impact damage - impact testing experimental results, numerical and engineering techniques.*

**Keywords:** ballistic equation, high-speed collision, spacecraft, screen protection, experimental studies, numerical modeling.

### REFERENCES

- [1] Dimitrienko Yu.I. *Mekhanika sploshnoy sredy. V 4 tomakh. Tom 4. Osnovy mekhaniki tverdykh sred* [Continuum Mechanics. In 4 vols. Vol. 4. Fundamentals of solids]. Moscow, BMSTU Publ., 2014, 624 p.
- [2] Wilkins M.L. *Raschet uprugoplasticheskikh techeniy. Vychislitelnye metody v gidrodinamike* [Calculation of elastic-plastic flow. Computational methods in fluid dynamics]. Moscow, Mir Publ., 1967, pp. 212–263 [in Russ.].
- [3] Wilkins M.L. *Computer simulation of dynamic phenomena*. Springer-Verlag Publ., Berlin-Heidelberg-New-York, 1999, 264 p.
- [4] Aleksandrov A.A., Dimitrienko Yu.I. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody — Mathematical Modeling and Computational Methods*, 2014, no. 1 (1), pp. 3–4.
- [5] Dimitrienko Yu.I., Dimitrienko I.D. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2014, no. 5 (29). Available at: <http://engjournal.ru/search/author/40/page1.html>
- [6] Dimitrienko Yu.I., Dzaganiya A.Yu., Belenovskaya Yu.V., Vorontsova M.A. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennyye nauki — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Natural Sciences*, 2008, no. 4, pp. 100–117.
- [7] Gerasimov A.V., Pashkov S.V., Khristenko Yu.F. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Matematika i Mekhanika — Bulletin of the Tomsk State University. Mathematics and Mechanics*, 2011, no. 4 (16), pp. 70–78.
- [8] Dobritsa B.T., Dobrica D.B. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Matematika i Mekhanika — Bulletin of the Tomsk State University. Mathematics and Mechanics*, 2015, no. 4 (36), pp. 64–70.
- [9] Christiansen E.L. Design and performance equations for advanced meteoroid and debris shields. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, vol. 14, pp. 145–156.

- [10] Christiansen E.L., Kerr J.H. Ballistic Limit Equations for Spacecraft Shielding. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, vol. 26, pp. 93–104.
- [11] Dobritsa D.B. *Vestnik FGUP NPO im. S.A. Lavochkina — Bulletin of FSUE NPO Lavochkin* (Lavochkin Association), 2012, no. 5 (16), pp. 53–58.
- [12] Nikolaevskiy V.N., ed. *Vysokoskorostnye udarnye yavleniya* [High Shock Phenomena]. Moscow, Mir Publ., 1973, 528 p.
- [13] Panasyuk M.I., Novikov L.S., ed. *Model kosmosa: Nauchno-informatsionnoe izdanie. V 2 tomakh. Tom 2. Vozdeystvie kosmicheskoy sredy na materialy i oborudovanie* [Scientific-information publication. In 2 vols. Vol. 2. The impact of the space environment on materials and spacecraft equipment]. Moscow, KDU Publ., 2007, 989 p.
- [14] Ryan S., Christiansen E. Micrometeoroid and Orbital Debris Shield Ballistic Limit Analysis Program. *NASA / TM -2009-214789*.
- [15] Solodov A.V., ed. *Inzhenernyy spravochnik po kosmicheskoy tekhnike* [Engineering Guide on Space Technology]. Moscow, Voenizdat Publ., 1977, 430 p.

**Dobritsa B.T.**, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Computational Mathematics and Mathematical Physics, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 30 research publications in the field of mathematics. e-mail: fs11@bmstu.ru

**Dobritsa D.B.**, Cand. Sci. (Eng.), Leading mathematician of Federal State Unitary Enterprise NPO. S.A. Lavochkin. Author of over 30 scientific publications in the field of spacecraft protection against orbital debris and micrometeoroids. e-mail: dobrica@laspace.ru